



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



**DETERMINACIÓN DE LOS MODELOS DE
EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL EMPÍRICA EN FUNCIÓN
DE LOS PARÁMETROS CLIMÁTICOS EN LOS PISOS
ECOLÓGICOS A, B y C EN LA CUENCA DEL RIO DE
ILAVE-PUNO**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. FABIOLA ALEXANDRA HUAMAN CARRASCO

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AGRICOLA

PUNO – PERÚ

2023



NOMBRE DEL TRABAJO

**DETERMINACIÓN DE LOS MODELOS DE
EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL EM
PÍRICA EN FUNCIÓN DE LOS PARÁMETR
OS CLIMÁTICOS EN LOS PISOS ECOLÓGI
COS A, B y C EN LA CUENCA DEL RIO DE
ILAVE-PUNO**

AUTOR

**FABIOLA ALEXANDRA HUAMAN CARRA
SCO**

RECuento DE PALABRAS

27309 Words

RECuento DE CARACTERES

141017 Characters

RECuento DE PÁGINAS

130 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

6.2MB

FECHA DE ENTREGA

Oct 10, 2023 3:02 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Oct 10, 2023 3:04 PM GMT-5

● **18% de similitud general**

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

- 18% Base de datos de Internet
- 7% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de Crossref
- Base de datos de contenido publicado de Crossref
- 10% Base de datos de trabajos entregados

● **Excluir del Reporte de Similitud**

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


ASESOR
Dr. Edward Flores C.




Ph. D. Isidro Alberto Flores Hualpa
DIRECTOR UNIDAD DE INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

Resumen



DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a: A Dios quien ha sido mi guía, fortaleza y su mano de fidelidad y amor han estado conmigo hasta el día de hoy. A mis padres Adela y Juan Carlos quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mi el ejemplo de esfuerzo y valentía, de no temer las adversidades porque Dios está conmigo siempre. A mi hermana Shirley y mi menor hija Catalina por su cariño y apoyo incondicional, durante todo este proceso, por estar conmigo en todo momento gracias.

A toda mi familia porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas. Finalmente quiero dedicar esta tesis a todas mis amigas, por apoyarme cuando más las necesito, por extender su mano en momentos difíciles y por el amor brindado cada día, de verdad mil gracias.

F. Alexandra H. C.



AGRADECIMIENTO

Todo el trabajo realizado fue posible gracias al apoyo incondicional de mi madre Adela, que estuvo a mi lado en los momentos difíciles, y a mi hija, Catalina, cuya paciencia fue puesta a prueba en incontables ocasiones.

Gracias, también, a mi padre y hermana, que me dieron todo lo que necesité, y a mis amigas, que me dieron su contención.

Nada de esto hubiera sido posible sin ustedes. Este trabajo es el resultado de un sinfín de acontecimientos que poco tuvieron que ver con lo académico, sino más bien, con el amor.

Gracias infinitas a ustedes y, por supuesto, a Dios, por ponerlos en mi camino.

F. Alexandra H.C.



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS	
RESUMEN	16
ABSTRACT.....	17
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	19
1.2.1. Problema general	19
1.2.2. Problemas específicos	19
1.3. HIPÓTESIS	20
1.3.1. Hipótesis general.....	20
1.3.2. Hipótesis específicas.....	20
1.4. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	20
1.5. OBJETIVOS.....	21
1.5.1. Objetivo general.....	21
1.5.2. Objetivos específicos	21



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. MARCO CONCEPTUAL	23
2.1.1. Antecedentes.....	23
2.1.2. El ciclo hidrológico.....	25
2.1.3. Cuenca hidrográfica.....	26
2.1.4. El clima.....	27
2.1.5. Factores del clima.....	29
2.1.6. Latitud.....	29
2.1.7. Altitud.....	30
2.1.8. Orografía.....	31
2.1.9. Corrientes Marinas.....	31
2.1.10. La presión atmosférica.....	31
2.1.11. Elementos del clima.....	32
2.1.11.1. La temperatura del aire.....	32
2.1.11.2. Radiación solar.....	33
2.1.11.3. La precipitación.....	34
2.1.11.4. Humedad relativa.....	35
2.1.11.5. La velocidad del viento.....	36
2.2. MARCO TEORICO	38
2.2.1. Evaporación.....	38
2.2.2. Transpiración.....	39
2.2.3. Evapotranspiración.....	39
2.2.4. Evapotranspiración de referencia (ET ₀).....	40



2.2.5. Métodos de determinación de evapotranspiración.....	42
2.2.5.1. Métodos directos.....	42
2.2.5.2. Métodos indirectos.....	42
2.3. ETP DEL CULTIVO BAJO CONDICIONES ESTÁNDAR (ETC).....	43
2.4. COEFICIENTE DE CULTIVO (K_c).....	43
2.5. PRECIPITACIÓN EFECTIVA (PE).....	44
2.6. DEMANDA HÍDRICA.....	45
2.7. DEMANDA AGRÍCOLA.....	46
2.8. REQUERIMIENTO DE AGUA DE LOS CULTIVOS.....	46
2.9. CEDULA DE CULTIVO.....	47
2.10. DEMANDA DE AGUA DE USO AGRÍCOLA:.....	47
2.11. BALANCE HIDRICO.....	48
2.12. ZONAS CLIMÁTICAS EN EL ALTIPLANO.....	48
2.12.1. Sub – tipo climático “A” circunlacustre.....	49
2.12.2. Sub – tipo climático “B”.....	49
2.12.3. Sub – tipo climático “C” o clima de altiplano.....	49
2.12.4. Sub – tipo climático “D” o clima de las alturas.....	49
2.13. ZONA DE VIDA O ECOSISTEMA.....	50
2.14. ZONAS DE VIDA DE HOLDRIDGE.....	50
2.15. MÉTODOS DE CALCULO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL.	50
.....	50
2.15.1. Método de Hargreaves.....	51
2.15.1.1. Por Temperatura.....	51
2.15.1.2. Por Radiación.....	52



2.15.2. Método de Hargreaves Modificado (Linacre, E.T., 1977).....	53
2.15.3. Método de Thornthwaite.....	54
2.15.4. Método Serruto	55
2.15.5. Método de Penman Monteith - FAO	55
2.15.6 Tanque de Evaporación Clase A.....	57
2.15.7. Selección del método de cálculo de evapotranspiración potencial	59

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA EN ESTUDIO	60
3.2. CLIMATOLOGÍA DE LA CUENCA	61
3.2.1. Clima frío o boreal (de los valles meso andinos).....	61
3.2.2. Clima frígido (de tundra)	61
3.2.3. Clima de Nieve (Gélido).....	62
3.3. ECOLOGÍA	62
3.3.1. Nivel Subtropical (NS)	62
3.3.2. Bosque Húmedo Montano SubTropical (bh-MS).....	62
3.3.3. Páramo húmedo - Subalpino Subtropical (ph-SaS)	63
3.3.4. Páramo muy húmedo - Subalpino Subtropical (pmh-SaS).....	63
3.3.5. Tundra muy húmeda - Alpino Subtropical (tmh-AS).....	64
3.3.6. Tundra pluvial - Alpino Subtropical (tp-AS).....	64
3.4. VARIABILIDAD CLIMÁTICA POR PISOS ECOLÓGICOS A, B, Y C....	65
3.4.1. Análisis de consistencia de datos meteorológicos	65
3.4.2. Prueba de bondad de ajuste.....	65
3.5. METODOLOGIA POR OBJETIVOS ESPECIFICO	66



3.5.1. Análisis de tendencia de datos meteorológicos (OE1)	66
3.5.2. Modelación de ETP en función de elementos climáticos (OE2)	67
3.5.2.1. Generación de la ETP mediante el modelo de Cropwat 8.0.	67
3.5.3. Calibración y validación del modelo obtenido (OE3)	69

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. ANÁLISIS DE DATOS METEOROLOGICAS	70
4.1.1. Análisis de doble masa de las estaciones Puno, Ilave y Laraqueri	70
4.1.2. Análisis de tendencia de datos meteorológicos de Puno, Ilave y laraqueri ..	71
4.2. MODELAMIENTO DE ETP EN LOS SUBTIPOS CLIMATICOS.....	72
4.2.1. Modelamiento de ETP para subtipos climáticos de la Cuenca del rio Ilave. 72	
4.2.1.1. Modelamiento de ETP aplicando regresión lineal múltiple (STC-A)	72
4.2.1.2. Modelamiento de ETP de regresión no lineal múltiple (STC-A)	75
4.2.1.3. Modelamiento de ETP aplicando EMV en el subtipoclimatico (STC-A) . 79	
4.2.2. Modelamiento de ETP con regresión lineal múltiple para (STC-B)	82
4.2.2.1. Modelamiento de ETP aplicando regresión no lineal tres variables (STC- B)	85
4.2.2.2. Modelamiento de ETP mediante EMV para (STC-B).....	87
4.2.3. Modelamiento de ETP regresión lineal múltiple de tres variables (STC-C) 89	
4.2.3.1. Modelamiento de ETP aplicando regresión no lineal múltiple para (STC- C)	91
4.2.3.2. Modelamiento de ETP aplicando EMV para (STC-C).....	93
4.3. CALIBRACION Y VALIDACION DE LOS MODELOS PARA STC.....	95
4.3.1. Subtipo climático “A” estación meteorológica de Puno (STC-A)	96



4.3.2. Subtipo climático “B” Estación meteorológica de Ilave (STC-B)	98
4.3.3. Subtipo climático “C” estación Laraqueri (STC-C)	100
4.4. COMPARATIVO ENTRE CROPWAT, HARGREAVES Y MODELO DE PUNO	102
4.5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	104
V. CONCLUSIONES.....	108
VI. RECOMENDACIONES	110
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	111
ANEXOS.....	115

Área : Modelación de la evapotranspiración potencial

Línea : Recursos Hídricos

FECHA DE SUSTENTACION: 12 de octubre de 2023



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Factor de evapotranspiración potencial (MF) en mm por mes	53
Tabla 2. La Radiacion extraterrestre Ra, expresada en equivalentes de evaporación en mm/día.....	53
Tabla 3. Número de horas de sol máxima media diaria probable para diferentes meses y latitud Sur (N).....	53
Tabla 4. Factor de corrección f , por duración media de olas horas de sol expresada en unidades de 30 días, con 12 horas de sol cada una.	55
Tabla 5. Coeficientes del Tanque de Evaporación Clase A (k) para diferentes cubiertas, niveles de humedad relativa media y velocidad media del viento	59
Tabla 6. Identificación de pisos ecológicos del altiplano de la región de Puno	65
Tabla 7. Prueba estadística de análisis de tendencia de datos de temperatura media.	71
Tabla 8. Modelo de regresión lineal múltiple estación meteorológica de Puno (STC-A)	73
Tabla 9. Modelo de regresión lineal múltiple estación meteorológica de Puno (STC-A)	75
Tabla 10. Modelo de regresión no lineal múltiple estación meteorológica de Puno (STC- A).....	76
Tabla 11. Modelo de regresión no lineal múltiple estación de Puno (STC-A).....	78
Tabla 12. Modelo de ETP aplicando estimadores de máxima verosimilitud estación meteorológica de Puno (STC-A).....	79
Tabla 13. Modelo de ETP aplicando y EMV con dos variables estacion de Puno (STC- A).....	81
Tabla 14. Modelo de regresión lineal múltiple tres variables estacion llave (STC-B)...	83



Tabla 15. Modelo de regresión lineal múltiple de dos variables de estación Ilave (STC-B).....	84
Tabla 16. Modelo de regresión no lineal múltiple estación meteorológica de Ilave (STC-B).....	85
Tabla 17. Modelo de regresión no lineal múltiple dos variables estación Ilave (STC-B)	86
Tabla 18. Modelo de ETP aplicando EMV de tres variables estación Ilave (STC-B) ...	87
Tabla 19. Modelo de ETP aplicando EMV de dos variables estación Ilave (STC-B)....	88
Tabla 20. Modelo de regresión lineal múltiple estación meteorológica de Laraqueri (STC-C).....	89
Tabla 21. Modelo de regresión lineal múltiple dos variables estación Laraqueri (STC-C)	90
Tabla 22. Modelo de regresión no lineal múltiple tres variables estación Laraqueri (STC-C).....	92
Tabla 23. Modelo de regresión no lineal múltiple dos variables estación Laraqueri (STC-C).....	92
Tabla 24. Modelo de Eto mediante EMV de tres variables estación Laraqueri (STC-C)	93
Tabla 25. Modelo de ETP aplicando EMV de dos variables estación Laraqueri (STC-C).....	94
Tabla 26. Análisis de variancia para modelos de evapotranspiración potencia en el (STC-A).....	96
Tabla 27. Estadística descriptiva y el rango de valores de ETP (STC-A)	96
Tabla 28. Prueba de significancia de Tukey (95%) para modelos del (STC-A)	97



Tabla 29. Análisis de variancia para modelos de evapotranspiración potencial (STC-B)	98
Tabla 30. Estadística descriptiva y el rango de valores de ETP (STC-B) estación Ilave	98
Tabla 31. Prueba de significancia de Tukey (95%) para (STC-B) estación Ilave	99
Tabla 32. Análisis de variancia para modelos de evapotranspiración potencia en el (STC-C)	100
Tabla 33. Estadística descriptiva y el rango de valores de ETP (STC-C)	101
Tabla 34. Prueba de significancia de Tukey (95%) para modelos del (STC-C)	101
Tabla 32. Análisis de variancia para modelos de evapotranspiración potencia en el (STC-A)	103
Tabla 31. Prueba de significancia de Tukey (95%) para (STC-B) estación Ilave	103



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Proceso del ciclo hidrológico del agua.....	26
Figura 2. Representación geográfica de la cuenca hidrográfica	27
Figura 3. Esquema de factores y elementos climáticos.	29
Figura 4. Tipos de precipitación pluvial.	34
Figura 5. Humedad relativa del aire.....	35
Figura 6. Velocidad del viento a dos metros	37
Figura 7. Procesos de evaporación y transpiración.....	38
Figura 8. Proceso de evapotranspiración potencial (ETP).....	39
Figura 9. Evapotranspiración de referencia- (ETo).	40
Figura 10. evapotranspiración de cobertura vegetal.	41
Figura 11. Necesidades de agua por los cultivos	46
Figura 12. Esquema del balance hídrico.....	48
Figura 13. Características del tanque clase A	58
Figura 14. Ubicación de la Cuenca Hidrográfica del rio de Ilave (ANA, 2019).....	60
Figura 15. Análisis de doble masa de temperatura media mensuales.....	71
Figura 16. Gráfico de calibración y validación (STC-A)	97
Figura 17. Gráfico de comparación de calibración y validación de (STC-B)	99
Figura 18. Grafico de comparativo entre calibración y validación de la zona (STC-C)	102



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

ADT	agua disponible total en la zona radicular [mm]
AFA	agua fácilmente aprovechable de la zona radicular del suelo [mm]
ANA	Autoridad Nacional del Agua
CC	Capacidad de campo
CIP	Centro Internacional de la Papa
CR	ascenso capilar [mm día-1]
CU	Coefficiente de uniformidad
D.C.A.	Diseño completamente al azar
DP	percolación profunda [mm]
DPe	percolación profunda que abandona la capa evaporante [mm]
E	evaporación [mm día-1]
ET	evapotranspiración [mm día-1]
ETc	evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar [mm día-1]
ETo	evapotranspiración del cultivo de referencia [mm día-1]
EUA	Eficiencia de uso de agua
FAO	Food and Agriculture Organization
INIA	Instituto Nacional de Innovación Agraria
Kc	Coefficiente de cultivo
pH	Potencial de hidrogeno
PMP	Punto de marchitez permanente
RAS	Sodium adsorption ratio
SDI	Riego por goteo subsuperficial
SPR	Secado parcial de raíces
TDR	Reflectometría en el dominio temporal



RESUMEN

La estimación de la evapotranspiración potencial (ETP) es importante en el uso del agua con aplicaciones agrícolas, ecológicas y otras actividades; la investigación es de tipo correlacional y tiene como objetivo: Determinar los modelos de la evapotranspiración potencial en función de parámetros climatológicos en los pisos ecológicos A, B y C en la cuenca del río de Ilave de Puno; la metodología para el análisis de tendencia fue utilizada los métodos paramétricos y no paramétricos; la relación entre evapotranspiración potencial y elementos climáticos se ha solucionado mediante regresión lineal y no lineal; múltiple aplicando métodos de MCO y los EMV; para la calibración del modelo se hizo uso de datos de series desde 1967 a 2012 y la validación se utilizó datos de 2013 a 2021; como resultados se obtuvieron los modelos E(35) con $r^2=73.98\%$ corresponde a STC-A; E(41) con $r^2=75.68\%$ para STC-B y el modelo E(48) con $r^2= 62.21\%$ para STC-C; estos modelos seleccionados tienen mejor capacidad predictiva en base de las variables predictoras de: T, HR y V; el- resultado del ANVA a la probabilidad $P\leq 0.01$ presentan alta significancia estadística; los parámetros de regresión obtenidos para STC-A tiene implicancia que el aumento $1\text{ }^\circ\text{C}$ de T incrementara 0.677728 mm/día de ETP y se concluye que para el uso de los modelos seleccionados se debe calibrar previamente.

Palabras clave: ETP empírica, pisos ecológicos, parámetros climáticos, máxima verosimilitud.



ABSTRACT

The estimation of potential evapotranspiration (ETP) is important in the use of water with agricultural, ecological and other activities; The research is of a correlational type and its objective is: To determine the models of potential evapotranspiration based on climatological parameters in ecological floors A, B and C in the Ilave de Puno river basin. the methodology for trend analysis was used parametric and non-parametric methods; the relationship between potential evapotranspiration and climatic elements has been solved by multiple line, non-linear regression; multiple applying OLS and EMV methods; For the calibration of the model, data from series from 1967 to 2012 were used and the validation used data from 2013 to 2021; As results, the E(35) models were obtained with $r^2=73.98\%$ corresponding to STC-A; E(41) with $r^2=75.68\%$ for STC-B and the E(48) model with $r^2= 62.21\%$ for STC-C; these selected models have better predictive capacity based on the predictor variables of: T, HR and V; the result of the ANVA at probability $P\leq 0.01$ present high statistical significance; the regression parameters obtained for STC-A have an implication that the 1 °C increase of T will increase 0.677728 mm/day of ETP and it is concluded that for the use of the selected models it must be calibrated previously.

Keywords: Empirical ETP, ecological floors, climatic parameters, maximum likelihood.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El problema de la determinación de la evapotranspiración potencial en el Altiplano de Puno merece especial atención, debido a la falta de modelos matemáticos adecuados a las características singulares de la zona. La presencia del Lago Titicaca, crea un medio ambiente diferente a otras zonas del altiplano ubicadas a la misma altitud, del mismo modo, zonas más alejadas al lago tienen condiciones meteorológicas diversas que influyen en la evapotranspiración potencial (Flores, Silva, & Flores, 2015).

Sin embargo, la cuenca hidrográfica del río de Ilave, es una de las cuencas que tiene épocas de lluvias muy limitadas y en algunas zonas se utiliza el riego complementario para algunos cultivos de pan llevar, por lo tanto, la deficiencia en manejo del agua de riego, siendo este último un recurso socioeconómico escaso, puesto que hay una creciente demanda de agua para fines tanto domésticos como industriales, amenazando la sostenibilidad de las aguas subterráneas y afectando la agricultura, la silvicultura, la industria y el agua potable, motivo por el cual es esencial que los recursos hídricos sean gestionados de manera estratégica y sostenible (Gabriel, 2017).

En la cuenca, la disponibilidad del agua para la agricultura está disminuyendo rápidamente, lo que impone una utilización más eficiente de este recurso, y para lograr el incremento de la productividad del agua es imprescindible el estudio de las funciones agua-rendimiento (Gonzales, Herrera, Lopez, & Cid, 2011).

Los recursos hídricos son esenciales para la sostenibilidad de la vida en la Tierra y están vinculados a todos los componentes del sistema climático, por lo que los cambios en



este sistema afectarán directamente al ciclo hidrológico y, por tanto, provocarán cambios en su disponibilidad. Por ello, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura predice que para 2025, el 35% de la población mundial se enfrentará a escasez de agua. Los países más afectados son Etiopía, India, Kenia, Nigeria y Perú. Bajo este escenario de escasez hídrica, la agricultura que es la principal consumidora de agua, se verá obligada a aplicar algunas medidas correctivas que le permitan hacer un uso más eficiente del agua (Gomez, 2016).

La razón fundamental del estudio de demanda de agua de riego es identificar, comparar y analizar las diferencias entre la demanda, oferta y consumo de agua de riego en diferentes unidades de superficie para estimar la viabilidad de la demanda de cultivos. Cubrir las necesidades de suministro garantizado identificadas en el plan hidrológico de la cuenca. El cálculo se realiza tanto para los regadíos existentes como para el resto de las zonas estudiadas (Flores, Silva, & Flores, 2015).

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Problema general

¿De qué manera influyen los parámetros climatológicos en la determinación de la evapotranspiración potencial empírico en los pisos ecológicos A, B y C en la cuenca del río de Ilave de la Región de Puno en 2022?

1.2.2. Problemas específicos

¿Por qué las tendencias de los datos de los elementos climáticos no son significativas con la aplicación de los métodos paramétricos y no paramétricos en la cuenca del río de Ilave en 2022?

¿De qué manera se relacionan entre los modelos empíricos de ETP y los parámetros de temperatura, precipitación pluvial, radiación solar, humedad



relativa, velocidad del viento en la cuenca del río Ilave para el año 2022?

¿De qué manera influyen los procesos de calibración y validación de los modelos empíricos de ETP que sean eficientes en relación de los elementos climáticos en los pisos ecológicos de la cuenca del río de Ilave?

1.3. HIPÓTESIS

1.3.1. Hipótesis general

Los modelos de la evapotranspiración potencial están determinados por los parámetros climatológicos en los pisos ecológicos A, B y C en la cuenca del río Ilave de Puno.

1.3.2. Hipótesis específicas

Las tendencias de las series históricas de datos meteorológicos son positivas en la cuenca del río de Ilave en 2022.

Los modelos de la evapotranspiración potencial están en función de los parámetros de como la: temperatura, precipitación pluvial, radiación solar, humedad relativa, velocidad del viento en la cuenca del río Ilave.

Los valores generados y observados de la evapotranspiración potencial son similares estadísticamente en los diferentes pisos ecológicos de la cuenca del río de Ilave.

1.4. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

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



requerimientos de riego bajo las condiciones prevalecientes de clima y suelo (Michel, 1997).

La estimación del potencial de evapotranspiración (ETP) es importante para el uso del agua en actividades agrícolas, ecológicas y de planificación. La falta de datos de estaciones meteorológicas (ME) en países en desarrollo llevó a la búsqueda de modelos simples capaces de estimar la ETP. Los métodos para calcular la evapotranspiración a partir de datos meteorológicos requieren diferentes parámetros climáticos y físicos. Algunos de estos parámetros se miden directamente en estaciones meteorológicas.

Otros parámetros están relacionados con datos de medición comunes y se pueden obtener mediante correlaciones directas o empíricas. Este capítulo describe las mediciones y el cálculo de datos necesarios para calcular la evapotranspiración de referencia utilizando el método Penman-Monteith de la FAO. Diferentes ejemplos ilustran diferentes procesos de cálculo. También se presentan procedimientos para estimar datos faltantes. (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. Objetivo general

Determinar los modelos de la evapotranspiración potencial en función de parámetros climatológicos en los pisos ecológicos A, B y C en la cuenca del río de Ilave de la Región de Puno en 2022.

1.5.2. Objetivos específicos

Evaluar las tendencias de las series de datos históricos de los elementos climáticos aplicando los métodos paramétricos y no paramétricos en la cuenca del río de Ilave en 2022.

Establecer los modelos empíricos en función de los parámetros de



temperatura, precipitación pluvial, radiación solar, humedad relativa, velocidad del viento en la cuenca del río Ilave para el año 2022

Calibrar y validar los modelos empíricos más eficientes que influyen al proceso de evapotranspiración potencial en función de los elementos climáticos en los pisos ecológicos de la cuenca del río de Ilave.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. MARCO CONCEPTUAL

2.1.1. Antecedentes.

La evapotranspiración es de los principales componentes del ciclo hidrológico y balance de energía; constituye uno de los procesos críticos e indispensables en diversos campos como hidrología, ecología, agricultura y planeación de los recursos hídricos; en las últimas dos décadas se han desarrollado diversas técnicas para estimar la evapotranspiración, que incluyen el uso de la Covarianza de Torbellinos, lisímetro, relación de Bowen, balance de agua en el suelo, Scintilometría y Percepción Remota (Zhang & Liu, 2015).

En muchos países con baja disponibilidad de agua, por lo que resulta imprescindible no solo mejorar la eficiencia en el uso del agua en la agricultura, sino también promover su uso de manera sustentable (Salazar et al., 2014) además, la limitación de los recursos hídricos se ha convertido en uno de los principales problemas de la agricultura, en la medida que los períodos de sequía son cada vez más recurrentes y prolongados, particularmente en el valle de Culiacán, México (Ravelo et al., 2014), lo que conlleva a poner mayor énfasis a la estimación del consumo real de agua por las plantas en la agricultura.

En este sentido, han resurgido estimaciones precisas del uso del agua de los cultivos y se han vuelto más influyentes, particularmente en áreas con menores suministros diarios de agua para la agricultura; Técnicas como la covarianza de remolinos, las mediciones de centelleo y la teledetección continúan obteniendo



evaluación y validación para calibrar otras técnicas menos sofisticadas pero menos costosas (Balbontin-nesvara, Calera.Belmontes, Gonzales-Pequeras, Campos-Rodriguez, & Torres-Prieto, 2011) y aunque el uso de la ecuación de la FAO Penman-Monteith y coeficientes de cultivo (K_c), continúan siendo de las metodologías más sencillas y económicas, presentan el inconveniente de que los valores de K_c deben obtenerse y validarse para condiciones locales.

La Organización para la Agricultura y Alimentación de las Naciones Unidas, propuso la metodología FAO-56 basada en la evapotranspiración de referencia que se calcula con la ecuación FAO Penman-Monteith y un coeficiente de cultivo (K_c); este método ha sido ampliamente utilizado debido a que ha arrojado resultados satisfactorios bajo diversas condiciones climáticas alrededor del mundo; el K_c representa las características específicas del cultivo, tales como altura, resistencia superficial, albedo, entre otras; el K_c varía poco con el clima sin embargo, es afectado por el manejo del cultivo y el riego, así como por condiciones ambientales tales como presencia de plagas y enfermedades, salinidad en el suelo, etc., lo que conduce a diferentes condiciones de estrés hídrico y conlleva a ajustar el valor de K_c a las condiciones actuales o reales mediante el uso de un coeficiente de estrés (K_s) (Zhang & Liu, 2015).

El método FAO-56 utiliza dos tipos de K_c , por un lado el K_c único, el cual integra el efecto combinado de la transpiración del cultivo y la evaporación del suelo; mientras que el K_c dual proporciona un cálculo separado de estos dos fenómenos físicos, este se integra por un coeficiente basal del cultivo (K_{cb}) y un coeficiente de evaporación del suelo (K_e) (Allen et al., 2005); el coeficiente dual del cultivo permite evaluar mejor el impacto del humedecimiento del suelo por



la lluvia o riego, así como los impactos por mantener parte del suelo seco o utilizar acolchado plástico para evitar la evaporación directa del suelo (Rosa, y otros, 2012).

Los valores de K_c deben calibrarse para condiciones locales de clima y manejo del cultivo, sin embargo, existen pocos estudios de evapotranspiración del cultivo en Chile para determinar estos valores bajo condiciones reales de campo; algunos estudios realizados con diversos cultivos mostraron que los valores de K_c obtenidos experimentalmente no concuerdan con aquellos propuestos por FAO-56 en Allen et al. (1998) (Zhanget al., 2013, Villagra et al., 2014).

2.1.2. El ciclo hidrológico

La ciencia del agua se ocupa de las aguas terrestres: su distribución y circulación, sus propiedades físicas y químicas, su interacción con el medio ambiente y los seres vivos, especialmente con los humanos. Se puede considerar que la hidrología abarca todas las ciencias del agua. De forma más rigurosa, se puede definir como el estudio del ciclo hidrológico. El cuál es la importancia de la hidrología. No tiene principio ni fin y sus procesos ocurren en forma continua: el agua se evapora desde los océanos y de la superficie terrestre para volver a la atmósfera; el vapor de agua se transporta y se eleva hasta que condensa y precipita sobre la superficie terrestre o los océanos (Mijares, 1989).

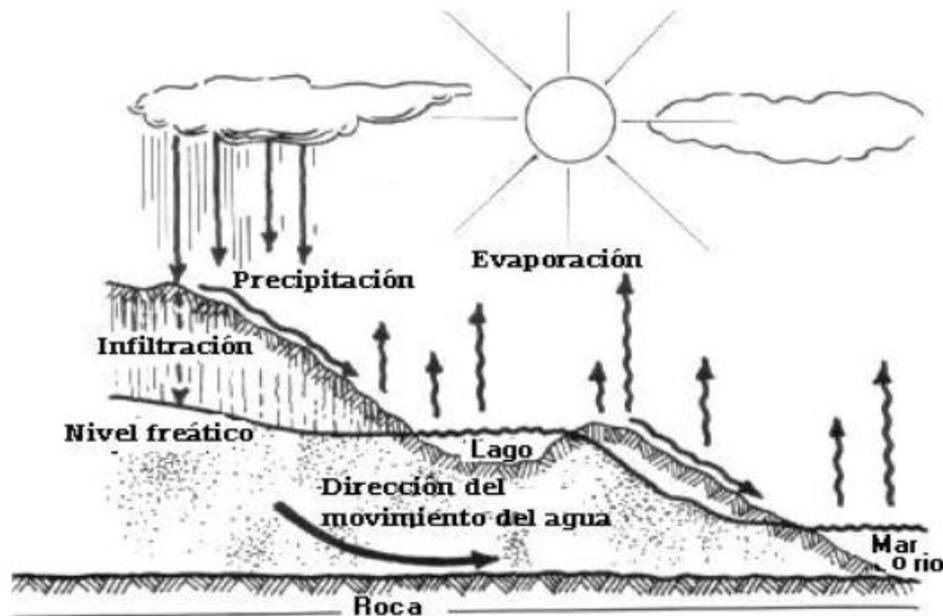


Figura 1. Proceso del ciclo hidrológico del agua.

El agua de precipitaciones pluviales puede ser interceptada por la vegetación, convertirse en flujo superficial sobre el suelo, infiltrarse en él, escurrir por el suelo como flujo subsuperficial y descargar en ríos como escorrentía superficial. El agua infiltrada puede percolar profundamente para recargar el agua subterránea de donde emerge en manantiales o se desliza hacia ríos para formar la escorrentía superficial y finalmente fluye hacia el mar o se evapora y por tal dándose una retroalimentación del ciclo (Chow, Maidment, & Mays, 1994)

2.1.3. Cuenca hidrográfica

Es un espacio geográfico cuyos aportes de agua son alimentados exclusivamente por precipitaciones que caen en el interior y el excedente de agua o en materia sólida transportadas por el agua forman, en un punto espacial único, una desembocadura, una estación de aforo, o un punto arbitrario (Llamas, 1993).

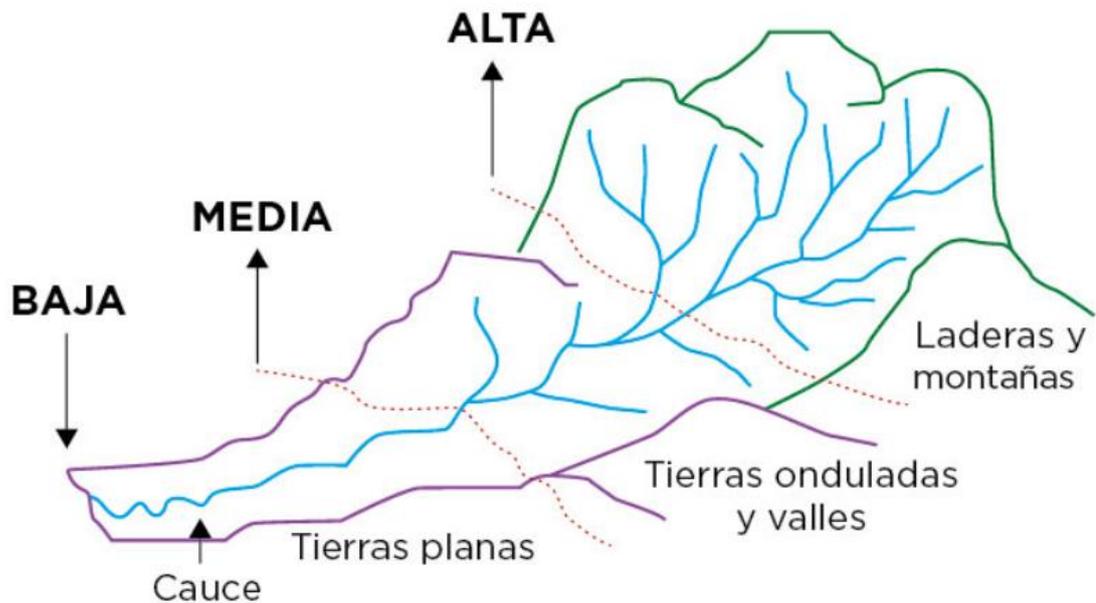


Figura 2. Representación geográfica de la cuenca hidrográfica

Las cuencas geográficas forman una unidad hidrológica, descrita como una unidad biológica física y una unidad sociopolítica para la planificación y secuenciación de los recursos naturales. Dentro de una cuenca se pueden dividir subcuencas o microcuencas. Las cuencas que dividen subcuencas se denominan subcuencas. Las cuencas pueden subdividirse en tres zonas de funcionamiento hídrico principales: Zona de cabecera; Zona de captación-transporte; y Zona de emisión (Chow, Maidment, & Mays, 1994). Para definir mejor las cuencas hidrográficas, se clasifican por el tipo de agua circulante. Por lo tanto, una cuenca hidrológica se considera una unidad geomórfica que considera solo aguas superficiales, mientras que una cuenca hidrográfica se considera un concepto más completo que incluye tanto aguas superficiales como subterráneas.

2.1.4. El clima

El clima está formado por varios elementos y factores atmosféricos que son esenciales para la vida diaria, así como para actividades como la industria, la



agricultura y la ganadería. Por lo tanto, es muy interesante aprender y la autocomprensión puede contribuir a actividades ilimitadas en la vida cotidiana. El clima, sus elementos y factores atmosféricos están interconectados para mantener el equilibrio de las actividades climáticas como: temperatura, precipitación, estación, etc. El crecimiento demográfico modifica algunos factores y daña el propio equilibrio climático.

El clima es un sistema complejo, por lo que su comportamiento es difícil de predecir. Por un lado, a menudo hay tendencias a largo plazo debido a cambios sistémicos (como aumentos de la radiación solar o cambios de ciclo), pero, por otro lado, hay fluctuaciones caóticas causadas por interacciones entre refuerzos, retroalimentaciones y reguladores. Ni siquiera los mejores modelos climáticos tienen en cuenta todas las variables existentes por lo que, hoy en día solamente se puede aventurar una previsión de lo que será el tiempo atmosférico del futuro más próximo asimismo el conocimiento del clima del pasado es también más incierto a medida que se retrocede el tiempo (Trewartha, 1995).

Así, el clima es el estado promedio de las condiciones meteorológicas durante un período de tiempo, según la Organización Meteorológica Mundial, se necesitan al menos 30 años de datos para caracterizar el clima. Las principales variables analizadas son la temperatura y la precipitación. A continuación se ilustra el gráfico:

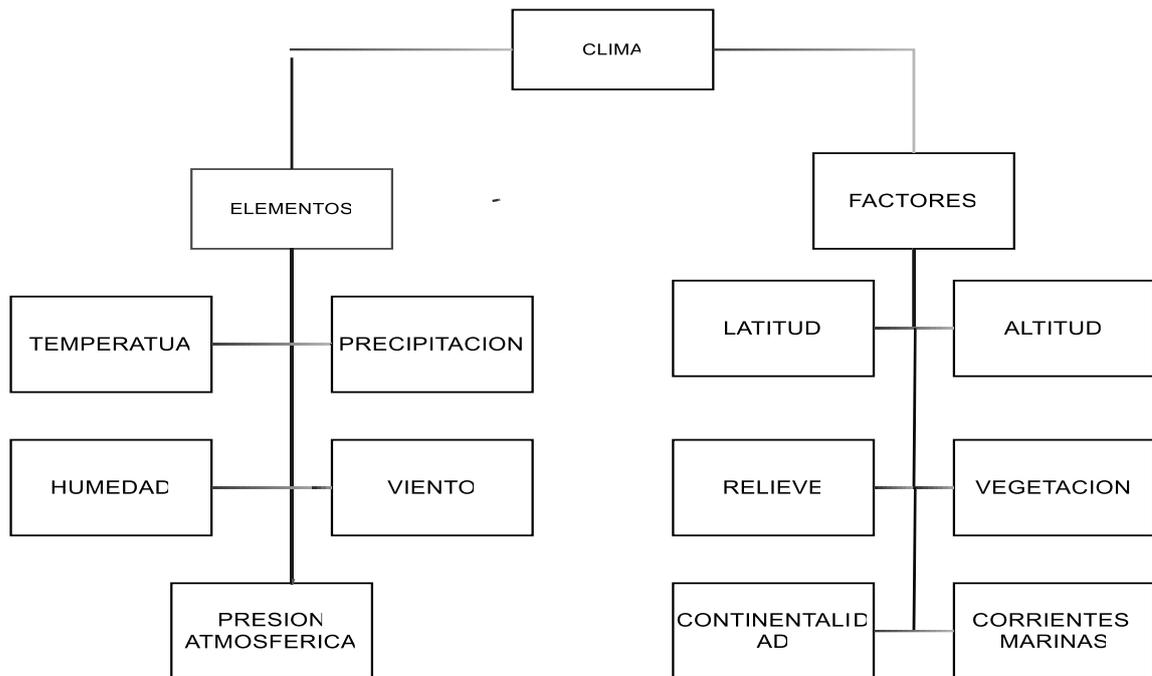


Figura 3. Esquema de factores y elementos climáticos.

2.1.5. Factores del clima

Los elementos climáticos son: la latitud, la altitud, la distribución de tierras y mares, la topografía, las corrientes oceánicas, entre otros. La distribución del entorno geográfico y el clima de la Tierra está limitada por factores climáticos, ya que el entorno geográfico no sólo está relacionado con la temperatura y las precipitaciones, sino que también es causado por la interacción de factores geográficos como la altitud, la latitud y las corrientes oceánicas. , continental, etc y condiciones astronómicas o termodinámicas en los centros de actividad, masas de aire y frentes.

2.1.6. Latitud.

Este es un factor importante porque nos dice cuánto calor recibe un punto o área en un momento o período de tiempo determinado. Europa se encuentra entre los 36° y 75° de latitud norte. Forma parte de la zona templada fría del hemisferio norte. También es la zona de intercambio de masas de aire polares y



tropicales, la parte sur del frente polar y la zona afectada por los vientos del oeste. Cuanto más cerca estés del ecuador, más calor recibirás, por lo que la cantidad de calor en Europa será muy diferente, porque el sur recibe los rayos del sol más verticalmente, se calienta y pierde más calor que el norte. El impacto de los rayos del sol es mayor cuando impacta contra el suelo. El sol del verano europeo dura más porque los rayos del sol caen verticalmente sobre el Trópico de Cáncer a 23°N de latitud.

2.1.7. Altitud.

La elevación del terreno cambia mucho el clima, especialmente en los trópicos, donde se convierte en el factor más importante del cambio climático. Este hecho sienta los criterios para la conceptualización de pisos térmicos, zonas climáticas delimitadas por curvas horizontales, que también producen curvas de temperatura (isotermas) determinadas teniendo en cuenta el tipo de vegetación, la temperatura y la orientación topográfica. La temperatura del aire baja aproximadamente 0,6° cada 100 m. Subimos porque el aire es menos denso y contiene menos agua y dióxido de carbono, lo que dificulta su calentamiento. Esta menor densidad permite que los rayos del sol atraviesen la masa de aire con poco calor, pero cuando no hay ningún obstáculo a través de la masa de aire, los rayos del sol caen pesadamente sobre las rocas y las calientan fuertemente; pero por la noche lo hacen. Se pierde muy rápidamente por la radiación, por lo que la temperatura baja en muy poco tiempo. La altitud y el correspondiente descenso de la temperatura del aire inciden en la presencia de nieve.



2.1.8. Orografía

Este es otro factor geográfico importante, la altitud media de Europa es de 340 metros, si le sumamos que la costa occidental es plana y continua a través del océano Atlántico y la llanura centroeuropea, estamos examinando la influencia del mar a distancias superiores a los 1000 metros. km. En el sur de Europa, como España, el terreno se disponía como un muro protector, impidiendo que la influencia del mar penetrara en el interior, por lo que estas condiciones se limitaban a unas pocas zonas, limitándose a estrechas zonas costeras. Esto es lo que llamamos efecto Fehn.

2.1.9. Corrientes Marinas.

Europa está significativamente influenciada por la Corriente del Golfo, que se origina en el Golfo de México y se mueve hacia el noreste, barriendo la costa occidental de Europa hasta llegar a Noruega. Es una corriente cálida, por lo que cuando las masas de aire del oeste la atraviesan, se calientan y absorben humedad. Al interactuar con la topografía continental y costera, provocan lluvias abundantes y promueven temperaturas moderadas, como se ve en la costa atlántica de Noruega.

2.1.10. La presión atmosférica

Al nivel del mar, la atmósfera ejerce una presión de aproximadamente 1 kg/cm² sobre cualquier superficie sólida o líquida. Este sería el peso de una columna de aire que se extiende verticalmente hasta el límite exterior de la atmósfera. La presión atmosférica se mide en milímetros con un barómetro.



La presión normal marcada en el barómetro al nivel del mar es de 760 mm. Pero la unidad utilizada en ciencia es el milibar (mb). 1 mm Hg equivale a 1,33 mb. Por tanto, mb. La presión al nivel del mar es 1013,2 mb.

2.1.11. Elementos del clima

2.1.11.1. La temperatura del aire

La agrometeorología estudia la temperatura a nivel de cultivo. La temperatura del aire se mide en una marquesina meteorológica (marquesina Stevenson o cabaña ventilada) a 2 m sobre la superficie en estaciones meteorológicas convencionales y automáticas de acuerdo con los estándares de la Organización Meteorológica Mundial (OMM). La carcasa resistente a la intemperie está diseñada para proteger el instrumento de la luz solar directa. El diseño de las rejillas garantiza un flujo de aire libre alrededor del instrumento. Mida la temperatura del aire con un termómetro o termopar instalado en la marquesina. El termómetro de mínima y máxima registra la temperatura mínima y máxima del aire en un período de 24 horas.

Las cámaras térmicas generan gráficos de temperatura instantáneos para un día o una semana. Las estaciones meteorológicas electrónicas suelen tomar muestras de la temperatura del aire cada minuto y proporcionar promedios horarios, así como máximos y mínimos de 24 horas. Dado que existe una relación no lineal entre la humedad y la temperatura (ambas están incluidas en la ecuación de Penman-Monteith de la FAO), la presión de vapor para un período debe calcularse como el promedio entre la presión de vapor a la temperatura más alta y la presión de vapor por debajo. la temperatura del aire más baja en ese momento.

La temperatura máxima diaria (T_{max}) y la temperatura mínima diaria (T_{min}) son, respectivamente, las temperaturas más alta y más baja observadas en las 24 horas desde la medianoche. T_{max} y T_{min} para un período más largo (por ejemplo, semanas, diez días o meses) se obtienen dividiendo la suma de los valores diarios individuales por el número de días del período. La temperatura media diaria del aire (T_{media}) solo se utiliza en la ecuación de Penman-Monteith de la FAO para calcular la pendiente de la curva de presión de vapor saturado (Δ) y el efecto de la densidad media del aire (P_a) a medida que afectan los cambios de temperatura. el valor de estos parámetros climáticos es muy pequeño. Para la normalización, el promedio de 24 horas se define como el promedio de las temperaturas máximas (T_{max}) y mínimas (T_{min}) diarias, en lugar del promedio de las lecturas de temperatura por hora.

$$T_{media} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad E (1)$$

Donde:

T = la temperatura se expresa en grados centígrados ($^{\circ}C$) o Fahrenheit ($^{\circ}F$).

En algunos procedimientos del cálculo, la temperatura se debe expresar en grados Kelvin (K), los que se obtienen agregando 273,16 a la temperatura expresada en grados centígrados (en la práctica $K = ^{\circ}C + 273,16$). La escala centígrada y la Kelvin tienen la misma escala de intervalo. (FAO, 2006).

2.1.11.2. Radiación solar

El proceso de evaporación está determinado por la energía disponible para la evaporación del agua. La radiación solar, la fuente de energía más importante de la Tierra, puede convertir grandes cantidades de agua líquida en vapor de agua. La cantidad potencial de radiación que llega a la superficie de

evaporación depende de la ubicación de la superficie de evaporación y de la época del año. Debido a las diferencias en la posición de los planetas y su movimiento alrededor del Sol, la cantidad de radiación potencial es diferente en diferentes latitudes y en diferentes épocas del año. La radiación solar real que llega a la superficie de evaporación depende de la turbiedad de la atmósfera y de la presencia de nubes, que reflejan y absorben grandes cantidades de radiación. A la hora de determinar el efecto de la radiación solar sobre la evapotranspiración, también se debe tener en cuenta que no toda la energía disponible se utiliza para la evaporación del agua. Parte de la energía solar también se utiliza para calentar la atmósfera y la tierra.

2.1.11.3. La precipitación

La precipitación es toda forma de humedad que, originándose en las nubes, llega hasta la superficie del suelo (Villon, 2002). Siendo agua meteórica que llega hasta la superficie terrestre, la precipitación incluye básicamente a la lluvia, llovizna, nieve, granizo, rocío y escarcha (Sanchez, 2008a).

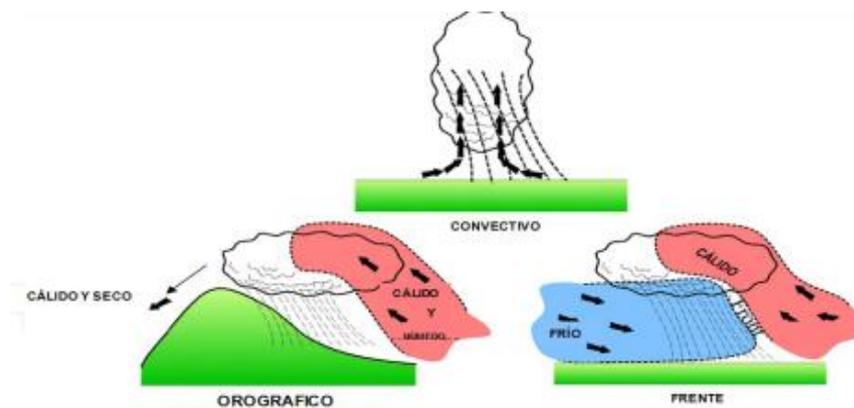


Figura 4. Tipos de precipitación pluvial.

Según los autores Cuadrat & Pita, (2004a), creen que cualquier forma de precipitación de agua en la atmósfera es el resultado de la condensación del

vapor de agua en las masas de aire, que se ven obligadas a elevarse y enfriarse. Además, establece que deben cumplirse dos condiciones para que se produzca la condensación:

b) El aire debe contener los núcleos de condensación, que son partículas sólidas microscópicas suspendidas que permiten la condensación del vapor y la formación de nubes.

Por lo tanto, conviene resaltar que, la cordillera de los Andes, influye en la formación y la distribución de las precipitaciones, las cuales se producen cuando el aire es forzado a elevarse y sufre una expansión de carácter adiabático que provoca su enfriamiento, la condensación del vapor de agua, la formación de gotas de agua y su precipitación (Pourrut, 1995).

2.1.11.4. Humedad relativa

La humedad relativa (HR) expresa el grado de saturación del aire como el cociente entre la presión real de vapor (e_a) a una temperatura dada y la presión de saturación de vapor ($e^\circ(T)$) a la misma temperatura (T):



Figura 5. Humedad relativa del aire



$$HR = \frac{e_a}{e^o(T)} * 100 \quad E (2)$$

La humedad relativa es la relación entre la cantidad de agua que realmente contiene el aire a una temperatura determinada y la cantidad de agua que podría contener si estuviera saturado a la misma temperatura. No tiene dimensiones y generalmente se expresa como porcentaje. Si bien la presión de vapor real puede ser relativamente constante a lo largo del día, la humedad relativa fluctúa entre un máximo al amanecer y un mínimo a primera hora de la tarde. La humedad relativa cambia porque la presión del vapor saturado depende de la temperatura del aire. A medida que la temperatura cambia a lo largo del día, también lo hace la humedad relativa.

Aunque la energía aportada por el sol y el aire ambiente es el principal impulsor de la evaporación del agua, la diferencia en la presión del vapor de agua entre la superficie de evaporación y el aire circundante es el factor determinante en la eliminación del vapor de agua. Las áreas bien irrigadas en regiones áridas, secas y cálidas consumen grandes cantidades de agua debido a la abundancia de energía y la capacidad de extraer vapor de la atmósfera. Por otro lado, en los trópicos húmedos, la alta humedad reduce la demanda de evaporación a pesar del mayor consumo de energía. En este último caso, como el aire está ya cerca de saturación, puede absorber menos agua adicional y por lo tanto la tasa de evapotranspiración es más baja que en regiones áridas (FAO, 2006).

2.1.11.5. La velocidad del viento

El proceso de eliminación de vapor depende en gran medida del viento y las turbulencias del aire, que transportan grandes volúmenes de aire a la

superficie de evaporación. A medida que el agua se evapora, el aire sobre la superficie de evaporación se satura gradualmente de vapor. Si este aire no se reemplaza constantemente con aire seco, la tasa de eliminación de vapor de agua disminuirá y la tasa de evaporación disminuirá. La Figura 10 muestra el efecto combinado de los factores climáticos sobre la evaporación en dos climas diferentes. Las demandas de evaporación son altas en climas cálidos y secos debido al aire seco y la energía disponible de la radiación solar directa y el calor latente.



Figura 6. Velocidad del viento a dos metros

En este caso, se puede acumular una gran cantidad de vapor de agua en el aire, y el viento puede facilitar el transporte de agua y así eliminar más vapor de agua. Por otro lado, en condiciones atmosféricas húmedas, la alta humedad y la presencia de nubes reducen la tasa de evaporación. Un aumento de la velocidad del viento en ambos climas afecta la evaporación de diferentes maneras, como se puede ver en las pendientes de las curvas. Cuanto más seca es la atmósfera, mayor es el efecto sobre la ET y más pronunciada la curva. En condiciones de

humedad, el viento sólo puede sustituir el aire saturado por aire ligeramente menos saturado y, por tanto, reducir la energía térmica. Por lo tanto, la velocidad del viento en condiciones húmedas afecta la evaporación en mucho menor medida que en climas secos, donde pequeños cambios en la velocidad del viento pueden provocar cambios mayores en la evapotranspiración.

2.2. MARCO TEORICO

2.2.1. Evaporación

La evaporación es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua y se retira de la superficie evaporante. El agua se evapora de una variedad de superficies, tales como lagos, ríos, caminos, suelos y la vegetación mojada (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

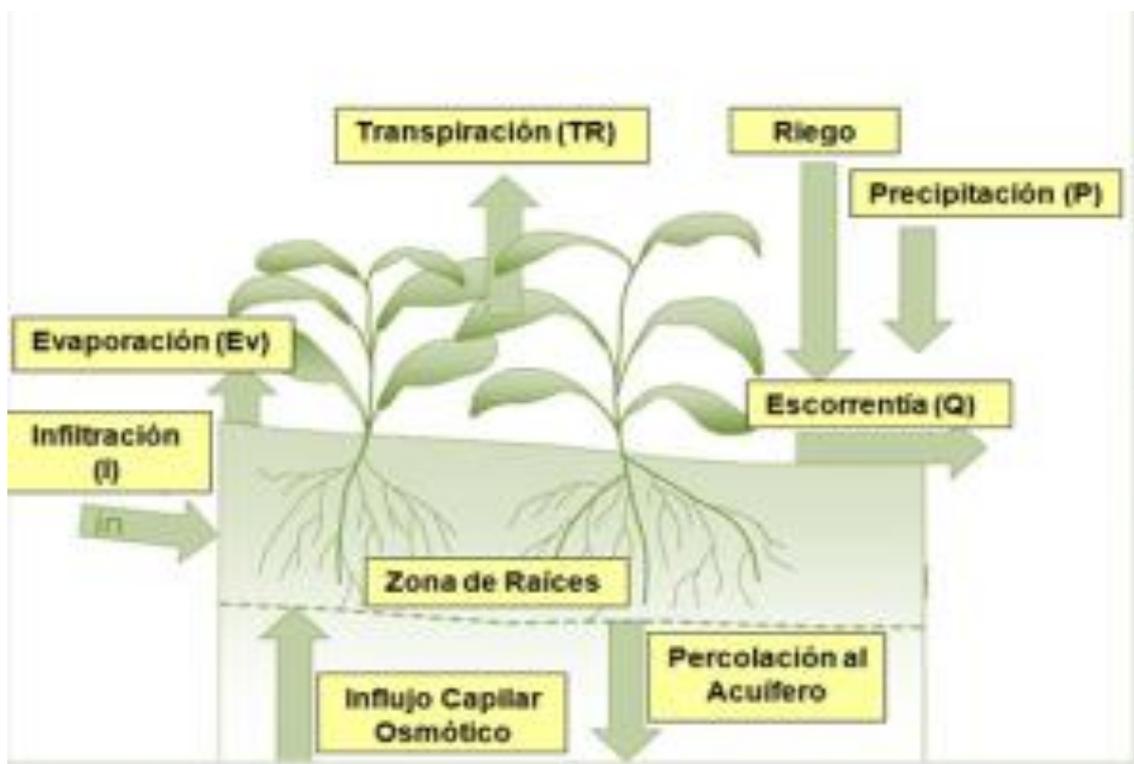


Figura 7. Procesos de evaporación y transpiración.

2.2.2. Transpiración

Implica la evaporación del agua líquida en los tejidos vegetales y su posterior liberación a la atmósfera. El agua es absorbida por las raíces junto con algunos nutrientes y transportada a través de la planta, casi toda el agua extraída del suelo se pierde por transpiración y sólo una pequeña parte pasa a formar parte de los tejidos de la planta.

2.2.3. Evapotranspiración

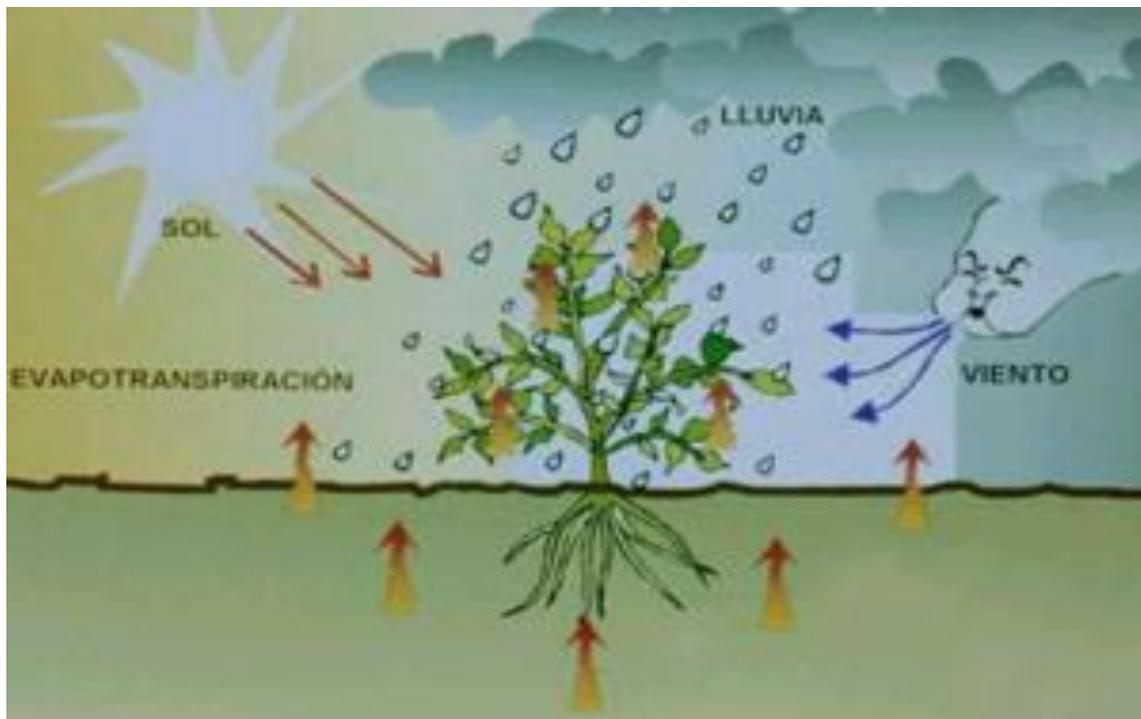


Figura 8. Proceso de evapotranspiración potencial (ETP)

La evaporación es una variable clave, incluida la cantidad de agua que pierden los cultivos mediante la transpiración y la cantidad de agua que pierde el suelo mediante la evaporación. En la práctica, se utiliza para crear planes de riego que optimicen el uso del agua durante el ciclo del cultivo para lograr el rendimiento deseado. Actualmente, el agua para la agricultura es cada vez más

limitada debido a la fuerte contaminación y la reducción de las precipitaciones debido al cambio climático global.

Con todos los desafíos que enfrenta la humanidad, es necesario conocer realmente el balance hídrico de cualquier zona en sus diferentes niveles: regional, estatal o nacional, y esto se logra mediante una buena estimación de la ETo.. Las posibles alternativas para la estimación están sujetas a la limitación de la información meteorológica existente en el país (Rodríguez, Artega, Navarro, Cervantes, & Sangerman, 2012).

2.2.4. Evapotranspiración de referencia (ET₀)

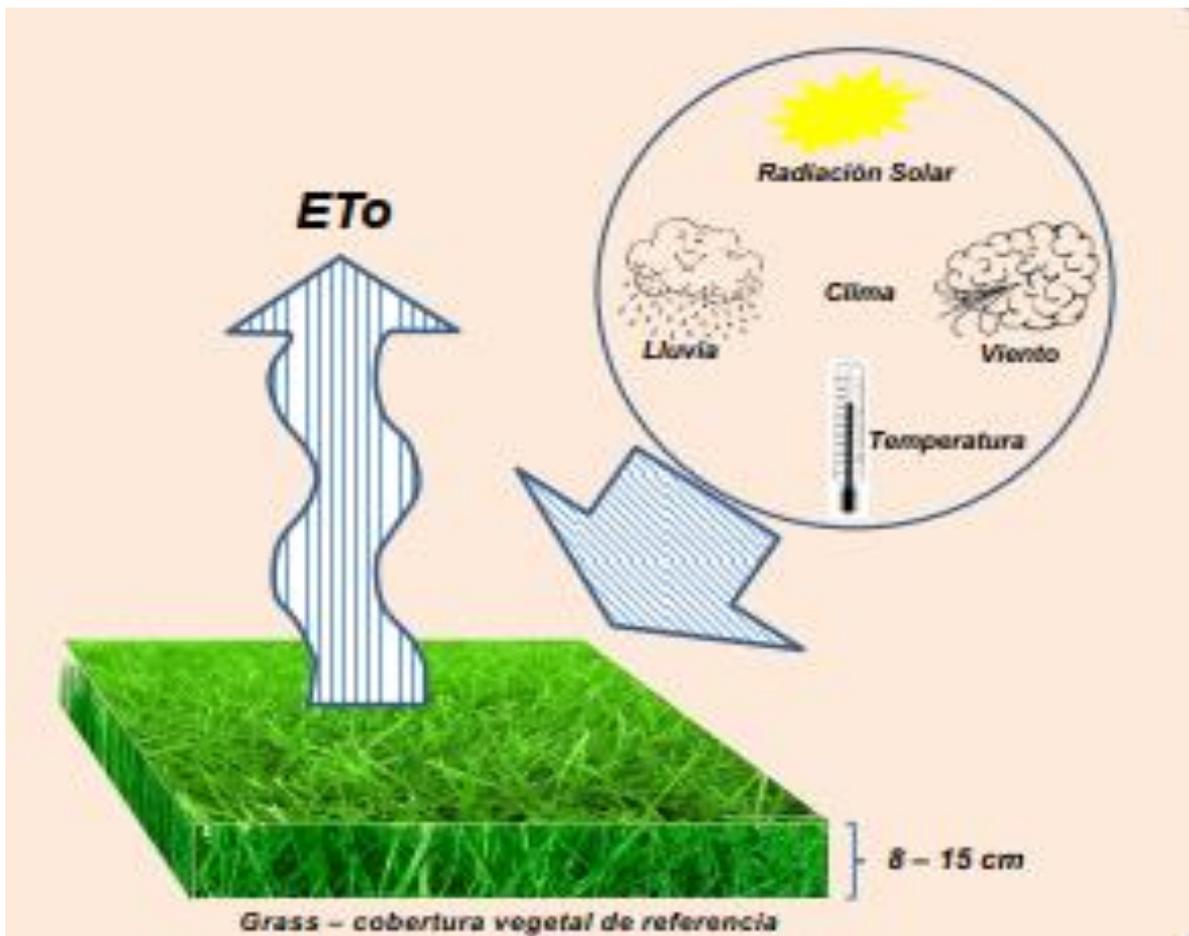


Figura 9. Evapotranspiración de referencia- (ET₀).

La tasa de evapotranspiración de la superficie de referencia en ausencia de limitación de agua se denomina tasa de evapotranspiración del cultivo de referencia. La superficie de referencia corresponde a un hipotético cultivo de pasto con características específicas. El concepto de evapotranspiración de referencia se introduce para investigar los requisitos de evapotranspiración atmosférica independientemente del tipo de cultivo y las prácticas de desarrollo y manejo. Los factores del suelo no afectan la ET_0 porque hay abundante agua en la superficie de evapotranspiración de referencia.

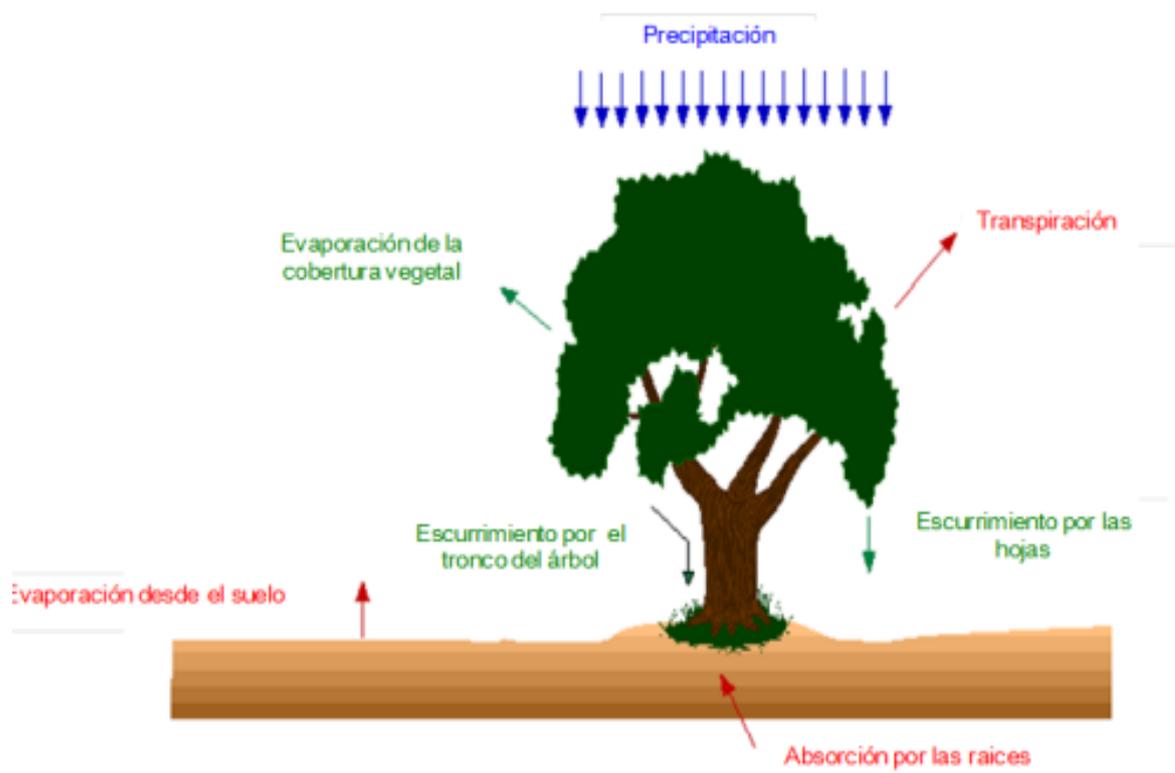


Figura 10. evapotranspiración de cobertura vegetal.

Los únicos factores que afectan ET_0 son los parámetros climáticos. Por lo tanto, ET_0 es también un parámetro climático que puede ser calculado a partir de datos meteorológicos. ET_0 expresa el poder evaporante de la atmósfera en



una localidad y época del año específicas, y no considera ni las características del cultivo, ni los factores del suelo (FAO, 2006).

2.2.5. Métodos de determinación de evapotranspiración

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

2.2.5.1. Métodos directos

Los métodos medidos o directos calculan la evaporación controlando la entrada y salida de agua del suelo que sostiene la cubierta vegetal. Aunque estos métodos proporcionan resultados mejores y más cercanos a la realidad, suelen ser costosos, engorrosos y requieren mucho tiempo para obtener resultados convincentes. Por otro lado, los resultados obtenidos son específicos y se refieren únicamente a los cultivos o plantaciones relevantes y las condiciones geográficas a las que se aplican. Los métodos directos son números se menciona a continuación los más frecuentemente indicados en otras referencias: Estanques, lisímetros, parcelas y superficies naturales de ensayo y métodos de los volúmenes afluentes y efluentes del balance hidrológico (Sanchez M. , 2001).

2.2.5.2. Métodos indirectos

Entre los métodos indirectos se pueden distinguir dos categorías: fórmulas empíricas que relacionan la evaporación con datos climáticos y fórmulas basadas en la relación entre la evaporación de las tierras de cultivo y la pérdida de agua de los estanques o bandejas de evaporación. Los modelos pertenecientes al primer grupo pueden clasificarse a su vez de acuerdo a la



variable climática sobre la que se basa la determinación de la evapotranspiración, en función a lo cual se puede hablar de:

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

2.3. ETP DEL CULTIVO BAJO CONDICIONES ESTÁNDAR (ETC)

La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar se denomina ETC, y se refiere a la evapotranspiración de cualquier cultivo cuando se encuentra exento de enfermedades, con buena fertilización y que se desarrolla en parcelas amplias, bajo óptimas condiciones de suelo y agua, y que alcanza la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas reinantes (FAO, 2006).

2.4. COEFICIENTE DE CULTIVO (K_c)

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

$$K_c = ET_c/ET_0 \quad E (3)$$

Este coeficiente refleja las diferencias entre el cultivo y la superficie de referencia. Como las características de un cultivo cambian con las distintas fases de



crecimiento, los valores del coeficiente de cultivo describen una curva a lo largo del ciclo del cultivo cuya forma refleja los cambios en la vegetación y en la cobertura vegetal debidos al crecimiento y maduración en ciclo de crecimiento del cultivo (Santos, Lorite, Allen, Tasumi, & Gavilan, 2007)

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

(Fuentes, 1996), manifiesta, que el valor del coeficiente de cultivo depende de las características de la planta, y expresa la variación de su capacidad para extraer el agua del suelo durante su período vegetativo. Esta variación es más evidente en cultivos anuales, que cubren todo su ciclo en un período reducido de tiempo.

(Doorembos & Kassam, 1979), indica que, el coeficiente del cultivo K_c , es la relación entre la evapotranspiración del cultivo, ET (Cultivo), y la evapotranspiración del cultivo de referencia, E_{to} , cuando ambas se dan en grandes campos en condiciones de crecimiento optimas Alcántara (1986) reporta que, los factores que afectan los valores de K_c son: la característica del cultivo, fecha de siembra, ritmo de desarrollo del cultivo, duración del período vegetativo, condiciones climáticas y la frecuencia de lluvia o riego especialmente durante la primera fase de crecimiento.

2.5. PRECIPITACIÓN EFECTIVA (PE)

No toda el agua de lluvia que cae sobre la superficie del suelo es realmente utilizada por las plantas. Parte del agua de lluvia se filtra en el suelo y otra parte fluye



sobre la tierra como escorrentía superficial. Cuando deja de llover, parte del agua del suelo se evapora directamente a la atmósfera, mientras que el resto se filtra lentamente hacia el suelo. Del total de agua que se infiltra, una parte llega por debajo de la zona de las raíces y el resto se almacena en la zona de las raíces y queda a disposición de la planta.

El agua de lluvia evaporada, las filtraciones profundas y la escorrentía superficial no pueden ser aprovechadas por los cultivos, es decir, son ineficientes. El resto se almacena en la zona de las raíces y se denomina precipitación efectiva. En otras palabras, el término "lluvia disponible" se utiliza para definir la cantidad de lluvia que realmente está disponible para satisfacer al menos algunas de las necesidades hídricas de la planta.. Este parámetro puede determinarse por experimentos o se estima por medio de ecuaciones empíricas (FAO, 2006), que para áreas con pendientes inferiores al 4-5% se tiene:

$$Pe = 0.8 \times PP - 25 \text{ si } PP > 75 \text{ mm/mes} \quad E (4)$$

$$Pe = 0.6 \times PP - 10 \text{ si } PP < 75 \text{ mm/mes} \quad E (5)$$

2.6. DEMANDA HÍDRICA

Se considera demanda de agua la cantidad de agua necesaria para realizar cualquier actividad humana que requiera agua. El consumo de agua se define como la cantidad de agua que realmente se utiliza para el desarrollo de la actividad humana. En ausencia de escasez de agua, el consumo coincide con la demanda, lo que da como resultado que ambos términos se utilicen indistintamente, aunque conceptualmente son diferentes. Las demandas y consumos de agua se suelen dividir a nivel general en demandas o consumos consuntivos y demandas o usos no consuntivos (Vasquez, Vasquez, & Cañamero, 2017).



Figura 11. Necesidades de agua por los cultivos

Las demandas o consumos consuntivos son aquellos que permiten el desarrollo de una actividad con consumo de agua, es decir, que el volumen de agua previo a la actividad es mayor siempre al volumen de agua existente después de la realización de la actividad. En cambio, la demanda o uso de agua no consuntivo es aquella demanda o uso que permite el desarrollo de una actividad que no produce disminución del volumen de agua por el proceso realizado (IKAUR, 2004).

2.7. DEMANDA AGRÍCOLA

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

2.8. REQUERIMIENTO DE AGUA DE LOS CULTIVOS

Módulos de riego: Es el caudal de agua que requiere un cultivo por unidad de superficie en las diferentes fases de su ciclo vegetativo, es decir la cantidad de agua en el momento oportuno de su aplicación con objetivo de compensar los déficits de humedad del suelo durante el período vegetativo de un cultivo dado (Fuentes, 1996).

2.9. CEDULA DE CULTIVO

Los certificados de cultivo se definen como la distribución del rendimiento durante el año según los siguientes factores: clima, tecnología, rentabilidad, capacidad económica del agricultor, tamaño de la unidad agrícola, demanda del mercado del producto, disponibilidad de agua, incidencia de plagas. y enfermedades, etc. La combinación de los cultivos para la estructuración de las cédulas de cultivos tiene en cuenta las fechas de siembra y cosecha, el período vegetativo y el tipo de cultivo (Vasquez, Vasquez, Vasquez, & Cañamero, 2017).

2.10. DEMANDA DE AGUA DE USO AGRÍCOLA:

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

$$Dp = \frac{Da}{Ef} \quad E (6)$$

dónde: Dp es la demanda de agua bruta para uso agrícola; Da es la demanda de agua neta para uso agrícola. Además, se complementan las siguientes ecuaciones:

$$Da = ETc - (PE + CA + N) \quad E (7)$$

$$ETc = Kc * ET0 \quad E (8)$$

dónde: ETc es la evapotranspiración del cultivo (mm/mes); Kc es el coeficiente de cultivo; $ET0$ es la evapotranspiración de referencia (mm/mes); y PE es la precipitación efectiva (mm/mes); CA es la capacidad de almacenamiento del suelo ($\theta_i - \theta_f$); y N es el aporte del nivel freático. (Vasquez, Vasquez, Vasquez, & Cañamero, 2017)

2.11. BALANCE HIDRICO

El balance hídrico es una herramienta que permite conocer características de la cuenca mediante la aplicación del principio de conservación de la masa o la ecuación de continuidad (Rose, 2004; Essam, 2007), de acuerdo con este principio, cualquier diferencia entre las entradas y salidas deben reflejarse en un cambio en el almacenamiento de agua dentro del área del presupuesto (Unesco, 1981; Shimon, 2010).

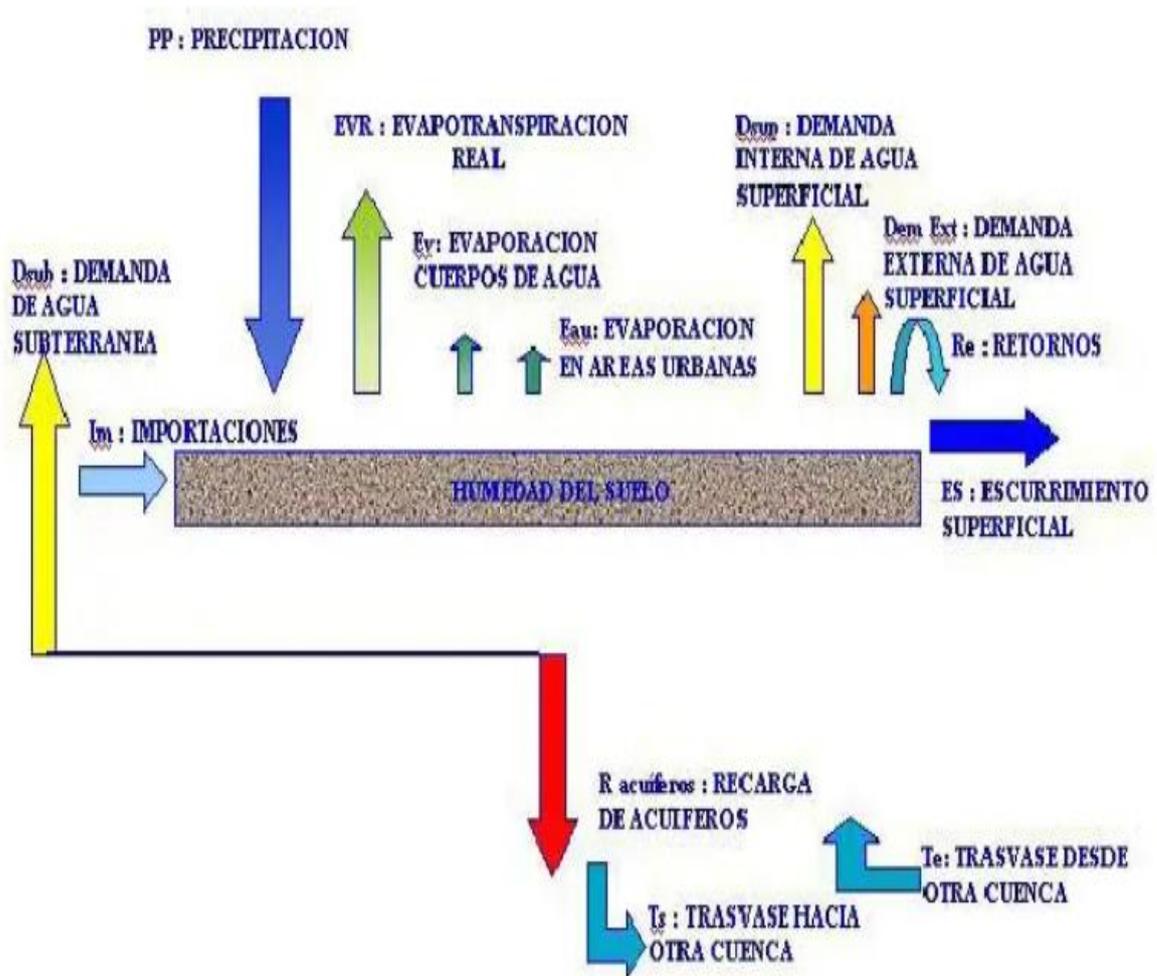


Figura 12. Esquema del balance hídrico.

2.12. ZONAS CLIMÁTICAS EN EL ALTIPLANO

Para la mejor identificación del clima de una localidad por su temperatura, es recomendable considerar primeramente el valor de la “oscilación de la temperatura” en



lugar de la temperatura media. En base a esta recomendación, en la región del altiplano, cuenca del lago Titicaca, se consideran cuatro zonas climáticas (Aquise, 1987).

2.12.1. Sub – tipo climático “A” circunlacustre

Según Aquize (1987), se caracterizó donde el valor de la oscilación de temperatura es de 10°C a 12°C, la media es de 8.5°C entre una máxima de 15°C y una mínima de 2°C aproximadamente, como por ejemplo Puno, Juli, Capachica, Moho, etc.

2.12.2. Sub – tipo climático “B”

Puna húmeda Según Aquize (1987), el valor de la oscilación de temperatura es de 13°C a 15°C con una media de 7.5°C variando entre una máxima de 15°C y una mínima de 1°C aproximadamente, como por ejemplo Huancané, Ilave, Desaguadero, Azángaro, etc.

2.12.3. Sub – tipo climático “C” o clima de altiplano

Según Aquize (1987), el valor de la oscilación es de 16°C a 19°C con una temperatura media aproximada de 6.0°C variando entre una máxima de 15°C y una mínima de -2.0°C aproximadamente, como por ejemplo Juliaca, Chuquibambilla, Lagunillas, etc. (Aquise, 1987).

2.12.4. Sub – tipo climático “D” o clima de las alturas

Aquize (1987), donde el valor de la oscilación es mayor a los 20°C con una temperatura media menor a 5°C variando entre una máxima de 15°C y una mínima de -5°C aproximadamente, como, por ejemplo: Mazo cruz, Pampahuta, etc.



2.13. ZONA DE VIDA O ECOSISTEMA

Según (Holdridge, 1967), definió el concepto zona de vida del siguiente modo:

«Una zona de vida es un grupo de asociaciones vegetales dentro de una división natural del clima, que se hacen teniendo en cuenta las condiciones edáficas y las etapas de sucesión, y que tienen una fisonomía similar en cualquier parte del mundo». Luego, se amplió el concepto de formaciones vegetales a zonas de vida, porque sus unidades no solo afectan la vegetación sino también a los animales y, en general, cada zona de vida representa un hábitat distintivo, desde el punto de vista ecológico, y al fin un estilo de vida diferente.

2.14. ZONAS DE VIDA DE HOLDRIDGE

Según (Holdridge, 1967), observó que ciertos grupos de ecosistemas o asociaciones vegetales, corresponden a rangos de temperatura, precipitación y humedad, de tal forma que pueden definirse divisiones balanceadas de estos parámetros climáticos para agruparlas, eliminando la subjetividad al hacerlo. A estos conjuntos de asociaciones, los denominó zonas de vida. Así, las zonas de vida son conjuntos naturales de asociaciones (segundo orden en su sistema jerárquico), sin importar que cada grupo incluya una cadena de diferentes unidades de paisaje o de medios ambientales, que pueden variar desde pantanos hasta crestas de colinas. Al mismo tiempo, las zonas de vida comprenden divisiones.

2.15. MÉTODOS DE CALCULO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL.

En la actualidad existen muchos métodos indirectos para la estimación de la ETP, basados principalmente en la aplicación de ecuaciones matemáticas utilizando entradas como temperatura, radiación, humedad relativa y otros elementos climáticos, de modo que las ecuaciones tengan un cierto grado de adaptabilidad y precisión. ¿Cuál



deberías usar? Se recomienda utilizar el que tenga más elementos climáticos para los cálculos, pero esta información no está disponible para algunas regiones, por lo que utilizamos lo que está disponible ajustado por condiciones o cantidades.

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

Método de Hargreaves

Por Temperatura

Por Radiación

Hargreaves Modificado

Thornthwaite

Serruto

Penman Monteith - FAO

Tanque de Evaporación Clase A

2.15.1. Método de Hargreaves

2.15.1.1. Por Temperatura

$$ETP = MF \times TMF \times CH \times CE \quad E (9)$$

Donde:

ETP = Evapotranspiración potencial (mm/mes).

MF = Factor mensual de latitud (Tabla 1).

TMF = Temperatura media mensual (°F).

CH = Factor de corrección por la humedad relativa.



$$CH = 0.166(100 - HR)^{0.5}, \text{ para } HR > 64\%$$
$$CH = 1, \text{ para } HR < 64\%$$

HR = Humedad relativa media mensual (%).

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

$$CE = 1.00 + \frac{0.04 E}{2000} \quad \text{E (10)}$$

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

2.15.1.2. Por Radiación

$$ETP = 0.0075 \times RSM \times TMF \times FA \quad \text{E (11)}$$

Donde:

ETP = Evapotranspiración potencial (mm/mes).

0.0075 = Constante de interrelación entre ETP y radiación.

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

$$RSM = 0.075 RMM(S)^{0.5} \quad \text{E (12)}$$

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

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

Se obtiene de acuerdo a la latitud de la zona (Tabla 2).

DM = Número de días del mes.

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

n = Horas de sol media diaria de la zona.

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

TMF = Temperatura media mensual (°F).

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

H = Altitud de la zona en estudio (msnm)

Tabla 1. Factor de evapotranspiración potencial (MF) en mm por mes

Latitud Sur	MESES											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
14	2.680	2.317	2.340	1.959	1.733	1.536	1.648	1.895	2.144	2.490	2.566	2.706
15	2.707	2.328	2.334	1.937	1.700	1.500	1.612	1.867	2.131	2.496	2.588	2.738
16	2.734	2.339	2.317	1.914	1.666	1.464	1.576	1.838	2.117	2.500	2.610	2.769
17	2.760	2.348	2.319	1.891	1.632	1.427	1.540	1.809	2.103	2.504	2.631	2.799
18	2.785	2.359	2.311	1.867	1.598	1.391	1.504	1.780	2.088	2.508	2.651	2.830

Fuente: Absalón Vásquez Villanueva "Manejo de Cuencas Altoandinas" Tomo 1, Lima - Perú, 2000

Tabla 2. La Radiación extraterrestre Ra, expresada en equivalentes de evaporación en mm/día

Latitud Sur	MESES											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
14	16.70	16.40	15.30	13.70	12.10	11.20	11.60	12.90	14.50	15.80	16.50	16.60
16	16.90	16.40	15.20	13.50	11.70	10.80	11.20	12.60	14.30	15.80	16.70	16.80
18	17.10	16.50	15.10	13.20	11.40	10.40	10.80	12.30	14.10	15.80	16.80	17.10
20	17.30	16.50	15.00	13.00	11.00	10.00	10.40	12.00	13.90	15.80	17.00	17.40

Fuente: ESTUDIO FAO: RIEGO Y DRENAJE N° 24 "Las necesidades de agua de los cultivos" Pág. 24.

Tabla 3. Número de horas de sol máxima media diaria probable para diferentes meses y latitud Sur (N)

Latitud Sur	MESES											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
10	12.60	12.40	12.10	11.80	11.60	11.50	11.60	11.80	12.00	12.30	12.60	12.70
15	12.90	12.60	12.20	11.80	11.40	11.20	11.30	11.60	12.00	12.50	12.80	13.00
20	13.20	12.80	12.30	11.70	11.20	10.90	11.00	11.50	12.00	12.60	13.10	13.30
25	13.50	13.00	12.30	11.60	10.90	10.60	10.70	11.30	12.00	12.70	13.30	13.70

Fuente: ESTUDIO FAO: RIEGO Y DRENAJE N° 24 "Las necesidades de agua de los cultivos" Pág. 25.

2.15.2. Método de Hargreaves Modificado (Linacre, E.T., 1977).

$$ETP = 0.0023Ra(T + 17.8)(TD)^{0.50} \quad E (13)$$

Donde:

ETP = Evapotranspiración potencial (mm/día).

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

T = Temperatura media mensual (°C).

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

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

2.15.3. Método de Thornthwaite

Fue desarrollado en experimentos estadounidenses realizados entre 29° y 43° de latitud norte en un tanque de 4 m² y una capa permanente de agua de medio metro de profundidad. En zonas con un clima similar, es decir, zonas húmedas, se puede utilizar con relativa seguridad. Los cálculos requieren datos de temperatura promedio mensual.

El proceso para calcular la evapotranspiración mensual utilizando este método es el siguiente:

1) Calcular la evapotranspiración potencial mensual ETP^o, en mm por mes de 30 días

y 12 horas de duración.

$$ETP' = 16\left(10\frac{T}{I}\right)^a \quad E (14)$$

Donde:

ETP^o = Evapotranspiración potencial mensual (mm), por mes de 30 días y 12 horas de duración.

T = Temperatura media mensual (°C).

I = Índice térmico anual. $I = \sum i$

i = Índice térmico mensual. $I = (T/5)^{1.514}$

a = Exponente que varía con el índice anual de calor de la localidad.

$$a = 0,492 + 0,0179I - 0,0000771I^2 + 0,000000675I^3 \quad E (15)$$

2) Corregir el valor calculado de ETP^o, de acuerdo el número real de días del mes considerado y a la latitud de la localidad que determina las horas de sol, cuyos valores se obtienen de la Tabla 4.

$$ETP = f \cdot ETP' \quad E (16)$$

Donde:

ETP = Evapotranspiración potencial mensual corregida (mm).

f = Factor de corrección.

ETP^o = Evapotranspiración potencial mensual sin corregir (mm).

Tabla 4. Factor de corrección f , por duración media de olas horas de sol expresada en unidades de 30 días, con 12 horas de sol cada una.

Latitud Sur	MESES											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
5	1.04	0.95	1.04	1.00	1.02	0.99	1.02	1.03	1.00	1.05	1.03	1.06
10	1.08	0.97	1.05	0.99	1.01	0.96	1.00	1.01	1.00	1.06	1.05	1.10
15	1.12	0.98	1.05	0.98	0.98	0.94	0.97	1.00	1.00	1.07	1.07	1.12
20	1.14	1.00	1.05	0.97	0.96	0.91	0.95	0.99	1.00	1.08	1.09	1.15

Fuente: Máximo Villón Belar "Hidrología" Lima - Perú 2002. Pág. 308

2.15.4. Método Serruto

$$ETP = 0.003(RS)^{2.5} + 0.16(T)^{0.88} \quad E (17)$$

Donde:

ETP = Evapotranspiración potencial (mm/día).

RS = Radiación solar extraterrestre, expresada en equivalentes de evaporación (mm/día). Se obtiene de acuerdo a la latitud de la zona (Tabla 2).

T = temperatura media mensual (°C).

2.15.5. Método de Penman Monteith - FAO

En mayo de 1990, la FAO, en colaboración con la Comisión Internacional de Riego y Drenaje y la Organización Meteorológica Mundial, organizó un grupo de expertos e investigadores en riego para revisar los métodos

de riego propuestos previamente por la FAO, las estimaciones de las necesidades de agua de los cultivos y desarrollar cuestiones relacionadas. . revisiones y recomendaciones para la actualización de procedimientos al respecto. Como resultado de una consulta de expertos celebrada en mayo de 1990, ahora se recomienda el método Penman-Monteith de la FAO como único método estándar para determinar y calcular la ETo de referencia de la evapotranspiración.

El método Penman-Monteith de la FAO requiere datos meteorológicos como radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento, así como datos de ubicación geográfica de estaciones como latitud, longitud y altitud. La ecuación de Penman-Monteith FAO se deriva de la ecuación de Penman-Monteith original y de las ecuaciones aerodinámicas y de arrastre de cultivos de la siguiente manera:

Para la determinación de la evapotranspiración de referencia se utilizó la ecuación de FAO Penman-Monteith paquete CROPWAT 8.0 de la (FAO, 2006):

$$ETo = \frac{0.408\Delta(Ra-G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0.34u_2)} \quad E (18)$$

Donde:

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

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

Ra = radiación extraterrestre (mm día⁻¹);

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

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

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

es = presión de vapor de saturación (kPa);

ea = presión real de vapor (kPa)

$e_s - e_a$ = déficit de presión de vapor ($\text{kPa } ^\circ\text{C}$);

Δ = pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{KPa}^\circ\text{C}^{-1}$);

γ = constante psicrométrica ($\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$)

Para la obtención de una nueva fórmula evapotranspiración actual se ha efectuado mediante la solución del modelo polinómico del análisis de Regresión Múltiple polinómica empleando el siguiente modelo.

2.15.6 Tanque de Evaporación Clase A

El tanque, es un depósito circular que contiene agua y está expuesto al ambiente, de donde se obtiene lecturas de evaporación, (E_v), con el propósito de simular la evapotranspiración de referencia (E_{to}) y estimar la evapotranspiración de un cultivo determinado (E_{tc}).

La evapotranspiración involucra dos procesos; la evaporación de la humedad superficial del suelo y, la transpiración relacionada al agua que la planta extrae de la zona humedad del suelo y lo expone a la atmósfera.

La bandeja o tanque de evaporación clase A, es uno de los instrumentos que más se utilizan en todo el mundo. La relación entre la ETP y la evaporación del tanque pueden ser expresadas como:

$$ETP = k \cdot E_v \quad E(19)$$

Donde:

ETP=Evapotranspiración potencial

(mm/mes).

k = Coeficiente de tanque. (Tabla 5).

E_v = Evaporación de tanque clase A.

El tanque de evaporación integra los factores de clima y provee un buen estimado de la ETP si se le da buen servicio de mantenimiento y manejo.

Los coeficientes de tanque de evaporación clase A dados por Doorenbos y Pruitt [1977], para diferentes condiciones alrededor del tanque, aparecen en la Tabla 5.



Figura 13. Características del tanque clase A

Tabla 5. Coeficientes del Tanque de Evaporación Clase A (k) para diferentes cubiertas, niveles de humedad relativa media y velocidad media del viento

Tanque Clase A	Condición A Tanque situado en cubierta verde baja				Condición B Tanque situado en un suelo desnudo			
		Baja < 40	Media 40 - 70	Alta > 70		Baja < 40	Media 40 - 70	Alta > 70
HR media (%)								
Velocidad del viento (Km/día)	Distancia de cubierta verde a barlovento (m)				Distancia del barbecho a barlovento (m)			
Suave < 175	0	0.55	0.55	0.75	0	0.70	0.80	0.85
	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
Moderada 175-425	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 425-700	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	0.45	0.60
	1000	0.65	0.70	0.75	1000	0.40	0.45	0.55
Muy Fuerte > 700	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: Estudio FAO – Riego y Drenaje N° 24 “Las necesidades de agua de los cultivos” pág. 57.

2.15.7. Selección del método de cálculo de evapotranspiración potencial

Consideramos que para seleccionar el método apropiado para el cálculo de la evapotranspiración potencial de la cuenca del río de Ilave, se ha seleccionado el método más apropiado mediante una comparación de los resultados con la ETP obtenida a partir del tanque clase A y el método Penman-Monteith (FAO, 2006).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA EN ESTUDIO

La cuenca del río Ilave es de 14,705.89 Km², su altitud máxima y mínima es de 5,750 y 3,802 m.s.n.m., respectivamente, y su altitud media es de 4,312.09 msnm.

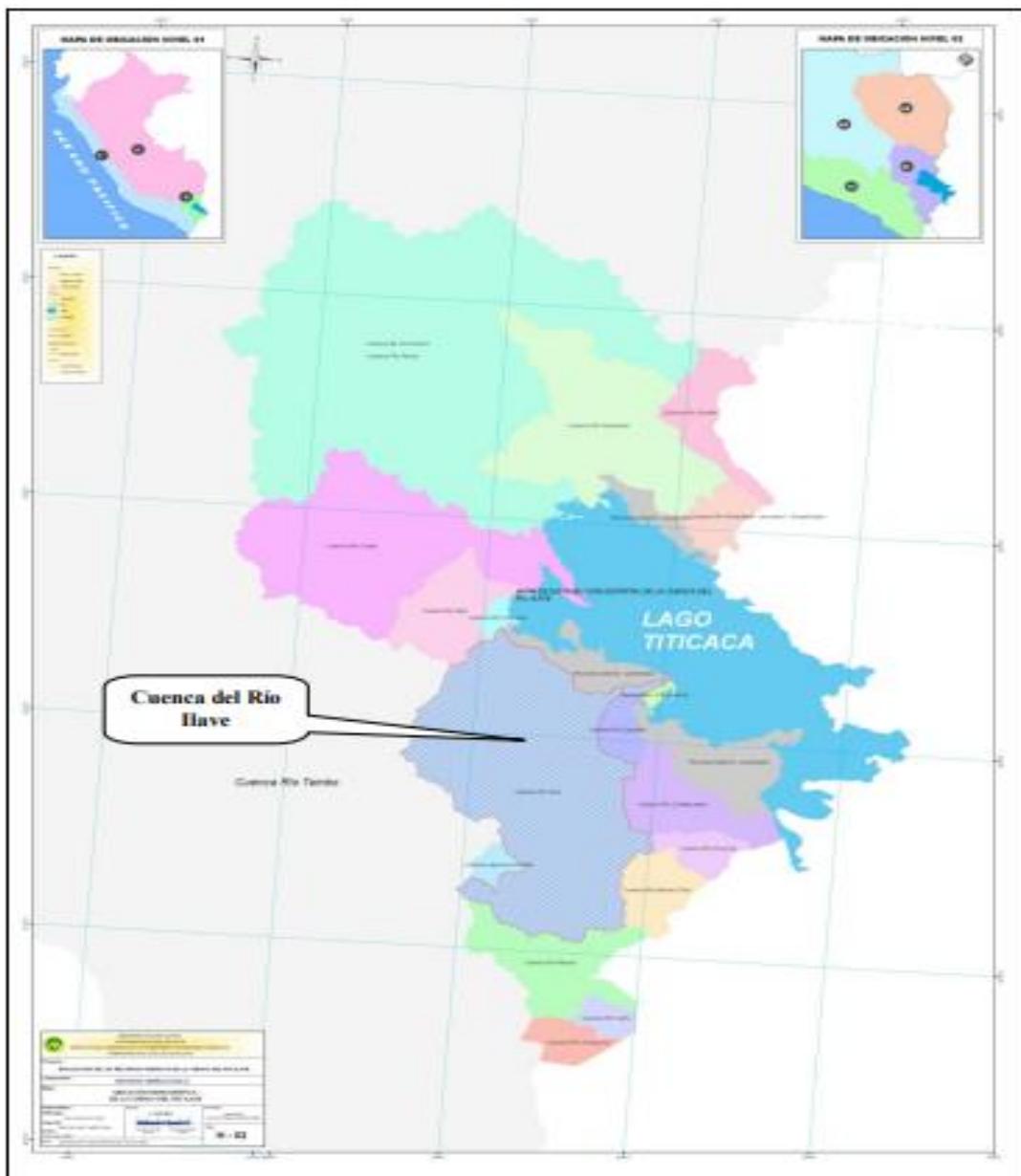


Figura 14. Ubicación de la Cuenca Hidrográfica del río de Ilave (ANA, 2019)



La longitud de curso más largo es de 363.49 Km. con una pendiente media de 1.13%. Pluviométricamente es una cuenca con buen rendimiento hídrico. La precipitación total anual en la cuenca varía de 575.2 mm. a 855 mm. Los valores más altos se registran en el entorno del Lago Titicaca y en el parte Alta de la cuenca. Las temperaturas más bajas se producen en el mes de Julio, mientras que las más elevadas se registran de noviembre a marzo, por lo general centradas en enero. En el ámbito de la cuenca del río Ilave existe áreas de riego agrícola localizado en forma dispersa. Se ha identificado 105 puntos de captación de agua superficial con fines agrícolas para un área total bajo riego de 26,458 Ha., lo que representa un volumen de demanda hídrica total anual es de 333.075 MMC (INRENA, 2008).

3.2. CLIMATOLOGÍA DE LA CUENCA

En términos generales, el clima en la cuenca del río Ilave varía desde lluvioso a frígido, en las áreas de los nevados sus temperaturas medias anuales varían desde los 19°C hasta niveles inferiores a los 0°C, respectivamente.

3.2.1. Clima frío o boreal (de los valles meso andinos)

Este tipo climático se extiende entre los 3,000 y 4,000 m.s.n.m. Se caracteriza por sus precipitaciones anuales promedio de 700 mm y sus temperaturas medias anuales de 12°C. Presenta veranos lluviosos e inviernos secos con fuertes heladas

3.2.2. Clima frígido (de tundra)

Este tipo de clima, conocido como clima de Puna, corresponde a los sectores altitudinales de la región andina comprendido entre los 4,000 y 5,000 m.s.n.m. Se caracteriza por presentar precipitaciones promedio de 700 mm anuales y temperaturas también promedio anuales de 6°C. Comprende las



colinas, mesetas y cumbres andinas. Los veranos son siempre lluviosos y nubosos; y los inviernos (junio-agosto), son rigurosos y secos

3.2.3. Clima de Nieve (Gélido)

Este clima corresponde al de nieve perpetua de muy alta montaña, con temperaturas medias durante todos los meses del año por debajo del punto de congelación (0°C). Se distribuye en los sectores altitudinales que sobrepasan los 5,000 m.s.n.m y que están representados mayormente por las grandes masas de nieve y hielo de las altas cumbres de los andes peruanos.

3.3. ECOLOGÍA

(ANA, 2019), En la cuenca del río Ilave se han identificado y cartografiado seis (06) zonas de vida:

3.3.1. Nivel Subtropical (NS)

Se distribuye, entre los 4,880 y 5,400 msnm., sobre una extensión superficial de 225.91 Km², equivalente al 2.88% del área de la cuenca. Pose un clima Súper húmedo muy frío, con temperatura media anual entre 0 °C y 15 °C; y precipitación pluvial total, promedio anual, entre 500 y 1,000 mm. La cubierta vegetal es escasa, observándose en forma muy esparcida matas de gramíneas altoandinas, tayas y algunas cactáceas. Las condiciones topográficas y ecológicas son factores que limitan toda actividad antrópica dentro de esta zona de vida.

3.3.2. Bosque Húmedo Montano SubTropical (bh-MS)

Se distribuye generalmente entre los 3,850 y 4,050 msnm., sobre una extensión superficial de 1,102.08 Km², equivalente al 14.07% del área de la cuenca. Posee un clima semiárido- Frío, con temperatura media anual entre 6 °C



y 22 °C; y precipitación pluvial total, promedio anual, entre 500 y 1,000 mm. La cubierta vegetal lo conforma especies graminales altoandinas con una distribución muy dispersa, asociada con cactáceas. Las tierras de esta zona de vida son utilizadas para el pastoreo estacional o temporal.

3.3.3. Páramo húmedo - Subalpino Subtropical (ph-SaS)

Se distribuye entre los 3,900 y 4,200 msnm sobre una extensión superficial de 1,938.27 Km², equivalente al 24.75% del área de la cuenca. Posee un clima húmedo- frío, con temperatura media anual entre 4°C y 6°C; y precipitación pluvial total, promedio anual, entre 450 y 550 milímetros. La cubierta vegetal lo conforma una vegetación típica de pradera altoandina constituida por pastos naturales principalmente de la familia Gramíneas más o menos densos con presencia de algunas cactáceas postradas del género *Opuntia*, así como arbustos y especies arbóreas del género *Polylepis*, comúnmente llamado "quinual". Las tierras de esta zona de vida son utilizadas para el pastoreo de ganado lanar y vacuno.

3.3.4. Páramo muy húmedo - Subalpino Subtropical (pmh-SaS)

Se distribuye entre los 4,200 hasta 4,500 msnm, sobre una extensión de 2,665.10 Km² equivalente al 34.03% del área de la cuenca. Posee un clima perhúmedo-frío, con temperatura media anual variable entre 3°C y 6°C; y precipitación pluvial total, promedio anual, entre 600 y 800 milímetros. La cubierta vegetal está constituida por una vegetación de pradera altoandina constituida por pastos naturales provenientes de diversas familias, pero principalmente de la familia Gramíneas; en general esta zona tiene una composición florística compleja y es más densamente poblada. Las tierras de



esta zona de vida son utilizadas para el pastoreo de ganado lanar y vacuno, y en menor proporción para pastoreo de camélidos americanos.

3.3.5. Tundra muy húmeda - Alpino Subtropical (tmh-AS)

Se distribuye entre los 4,500 y 5,000 msnm, sobre una extensión superficial de 1,831.78 Km², equivalente al 23.39% del área de la cuenca. Posee un clima perhúmedo-Muy Frío, con temperatura media anual entre 1,5°C y 3°C; Y precipitación pluvial total, promedio anual, entre 300 y 500 mm. La cubierta vegetal está conformada por matas de pastos naturales altoandinos muy dispersos; asimismo, existen especies arrosetadas y almohadilladas muy distanciadas. La composición florística y la abundancia son algo mayor que en la tundra húmeda. Las tierras de esta zona de vida son utilizadas para el pastoreo estacional o temporal trashumante.

3.3.6. Tundra pluvial - Alpino Subtropical (tp-AS)

Se distribuye entre los 4,500 y 5,000 msnm, sobre una extensión superficial de 69.40 Km², equivalente al 0.89% del área de la cuenca. Posee un clima superhúmedo-muy frío, con temperatura media anual entre 1,5°C y 3°C; y precipitación pluvial total, promedio anual, variable desde 500 hasta 1 000 mm. La cubierta vegetal es más abundante y florísticamente diversificada con relación a las otras tundras tales como: tundra húmeda y la tundra muy húmeda.

Además de las gramíneas, también existen rosetas y cojines, entre los que se puede observar la presencia de *Distichia muscoides*, que se manifiesta como un cojín curvo y de crecimiento constante en la parte superior, pero sus raíces inferiores y más profundas pasan a ser lo que comúnmente se llama . . turba. La presencia de líquenes y musgos también se puede observar en altitudes

superiores a los 5000 metros sobre el nivel del mar. La tierra de esta zona de vida se utiliza para el pastoreo nómada.

3.4. VARIABILIDAD CLIMÁTICA POR PISOS ECOLÓGICOS A, B, Y C.

Para el presente estudio se ha tomado en cuenta solamente tres estaciones meteorológicas con las siguientes características:

Tabla 6. Identificación de pisos ecológicos del altiplano de la región de Puno

Piso ecológico	Estacion meteorológica	Altitud m.s.n.m.	Temperatura media- (°C)	Precipitación media (mm)
A	Puno	3820	8.5	103
B	Ilave	3880	7.5	94
C	Laraqueri	4100	6.0	108

3.4.1. Análisis de consistencia de datos meteorológicos

Se ha efectuado el análisis de doble masa para tener confiabilidad en la información, y analizar la consistencia a fin de detectar errores, que puede producirse durante la obtención de los mismos y no para una corrección a partir de la recta de doble masa. Para ello, se compara la serie de estudio con una serie patrón que no presente ningún problema de homogeneidad, tendencia o cambio. Para realizar el contraste gráfico es necesario graficar en el eje de las abscisas los valores acumulados de la estación patrón y en el eje de las ordenadas los valores acumulados de la estación en estudio (Lobo, 2004)

3.4.2. Prueba de bondad de ajuste

Para explicar la distribución de probabilidad es un modelo teórico que trata de explicar el comportamiento de un fenómeno hidrometeorológico real. Actúa como una función que asigna a cada suceso, cuantificado mediante una variable aleatoria, la probabilidad correspondiente. Sin embargo, decimos que la distribución de probabilidad es una herramienta fundamental para la prospectiva,

puesto que con ella es posible diseñar un escenario de acontecimientos futuros considerando las tendencias actuales de diversos fenómenos. Para este procedimiento se ha utilizado el software de Hidroesta 2 (Villon, 2002).

3.5. METODOLOGIA POR OBJETIVOS ESPECIFICO

3.5.1. Análisis de tendencia de datos meteorológicos (OE1)

La prueba de Kendall Tau por Mann (1945) y Kendall (1975), es la prueba no paramétrica basada en el rango para evaluar la importancia de una tendencia. La hipótesis nula H_0 : Hay una tendencia en la serie $\{X_i, i = 1, 2, \dots, n\}$ la hipótesis alterna es, H_a : hay una tendencia en la serie (Galvez, 2017). El estadístico S de Tau de Kendall se define como:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i) \quad \text{E (20)}$$

Donde X_j son los valores de datos secuenciales, n es la longitud del conjunto de datos, y:

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{si } \theta > 0 \\ 0 & \text{si } \theta = 0 \\ -1 & \text{si } \theta < 0 \end{cases} \quad \text{E (21)}$$

Para $n \geq 8$, la estadística S es aproximadamente normal distribuido con la media y la varianza de la siguiente manera: $E(S) = 0$

$$V(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{m=1}^n t_m m(m-1)(2m+5)}{18} \quad \text{E (22)}$$

donde t_m es el número de vínculos de grado m . la prueba estadística estandarizada z se

calcula:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{V(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{V(S)}} & S < 0 \end{cases}$$

E (23)

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^Z e^{-t^2/2} dt$$

E (24)

3.5.2. Modelación de ETP en función de elementos climáticos (OE2)

3.5.2.1. Generación de la ETP mediante el modelo de Cropwat 8.0.

Es un método estándar para calcular la evapotranspiración de referencia (ET_o) a partir de información meteorológica. Se recomienda el método FAO Penman-Monteith como único método para determinar la evapotranspiración de referencia ET_o. que describe el método, su derivación, los datos meteorológicos requeridos y la correspondiente definición de la superficie de referencia. Para la obtención de la variable dependiente de la evapotranspiración de referencia se utilizará la ecuación de FAO Penman-Monteith (FAO, 2006):

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

E (25)

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

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

R_a: radiación extraterrestre (mm/día⁻¹)

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

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

u₂ = velocidad del viento a 2 metros de altura (ms⁻¹)

e_s: presión de vapor de saturación (kPa)

e_a : presión real de vapor (kPa)

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

Δ : pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$)

γ : constante psicométrico ($\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$)

Para la obtención de una nueva fórmula evapotranspiración actual se efectuará mediante la solución del modelo polinómico del análisis de Regresión Múltiple polinómica empleando el siguiente modelo:

$$ETP = \alpha T^{\beta} HR^{\delta} r^{\phi} h^{\gamma} \dots \quad \text{E (26)}$$

La transformación lineal de la función exponencial cuya solución de la regresión múltiple:

$$(\ln ETP = \ln \alpha + \beta \ln HB + \delta \ln HR + \phi \ln r + \gamma \ln h + \dots) \quad \text{E (27)}$$

$$Y = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots \quad \text{E (28)}$$

Para la solución de esta ecuación se utilizará desarrollando las ecuaciones normales de la regresión múltiple Para estimadores de máxima verosimilitud Eviews 12.0

El modelo de estimadores de máxima verosimilitud es:

$$E(ETP_i, X_i) = u_i = e^{X_i^* B} \quad \text{E (29)}$$

$$\text{donde: } X_i^* = [P_i^* / X_i] = \left[\phi' \Lambda' \rho \sum_{i=1}^{-1} P_i / X_i \right] \quad \text{E (30)}$$

$$LLikelih = -\frac{N}{2} \ln \sum (\theta) - \frac{N}{2} \text{Traza} \left[S_{ww} \sum_{i=1}^{-1} (\theta) \right] + \sum_{i=1}^N \left[\frac{1}{\sigma} \psi [V_{ji} - \beta_j X_{ji}^*] \sigma^{-1} [1 - \beta_j X_{ji}^*] \sigma^{-1} \right] \quad \text{E (31)}$$

3.5.3. Calibración y validación del modelo obtenido (OE3)

Una vez obtenido el modelo empírico más eficiente se efectuará la calibración con los valores obtenidos por el método se utilizará la ecuación de FAO Penman-Monteith (FAO, 2006) y los valores del tanque de clase “A” las ecuaciones se encuentran enunciados en la EO2. Y la validación se efectuará utilizando las pruebas de hipótesis estadísticas. Para la calibración y validación del modelo se ha utilizado el análisis del arreglo factorial considerando los pisos ecológicos como factores principales adoptado en un diseño completamente aleatorizado, cuyo modelo estadístico es:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \gamma_j + (\alpha\gamma)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad E (32)$$

$$i = 1, \dots, a; \quad j = 1, \dots, b; \quad k = 1, \dots, n$$

Donde: μ = efecto verdadero medio; α_i = efecto verdadero del i-esimo nivel del factor piso ecológico; γ_j = efecto verdadero del j-esimo nivel de método de evapotranspiración; $(\alpha\gamma)_{ij}$ = efecto verdadero de la interacción del i-esimo de factor piso ecológico con el factor j-esimo nivel de método de evapotranspiración; y ε_{ijk} = efecto verdadero del error.

El procedimiento estadístico se ha determinado con la aplicación del sistema para análisis estadístico (Software Estadístico: SAS 9.2).



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. ANÁLISIS DE DATOS METEOROLÓGICAS

La información meteorológica obtenida de las estaciones de Puno, Ilave y Laraqueri, antes de ser utilizada para su análisis, se ha verificado, porque pueden presentar inconsistencias o ausencias de datos. Para detectar la irregularidad de los datos meteorológicos, primero se analizó visualmente la distribución de toda la información disponible.

Por otra parte, se requieren datos específicos consistentes con el modelo utilizado para determinar la turbulencia, como la radiación y cubierta de nubes, el gradiente vertical de temperatura, entre otros (Villon, 2002).

4.1.1. Análisis de doble masa de las estaciones Puno, Ilave y Laraqueri

El diagrama de doble masa se obtuvo planteando en el eje de las abscisas la temperatura promedio anual acumulado de la variable de temperatura de las estaciones de Puno, Ilave y Laraqueri en ($^{\circ}\text{C}$) y en el eje de las ordenadas las temperaturas anuales acumulados de la temperatura de cada una de las estaciones en estudio. En este análisis, no se detectaron errores producidos por los fenómenos naturales y sistemáticos. Se realizó este análisis con la serie histórica de la de las estaciones en estudio, donde se tomó los datos temperaturas medias mensuales, de acuerdo a la figura 15 mostrada, los datos son confiables por no presentar quiebres.

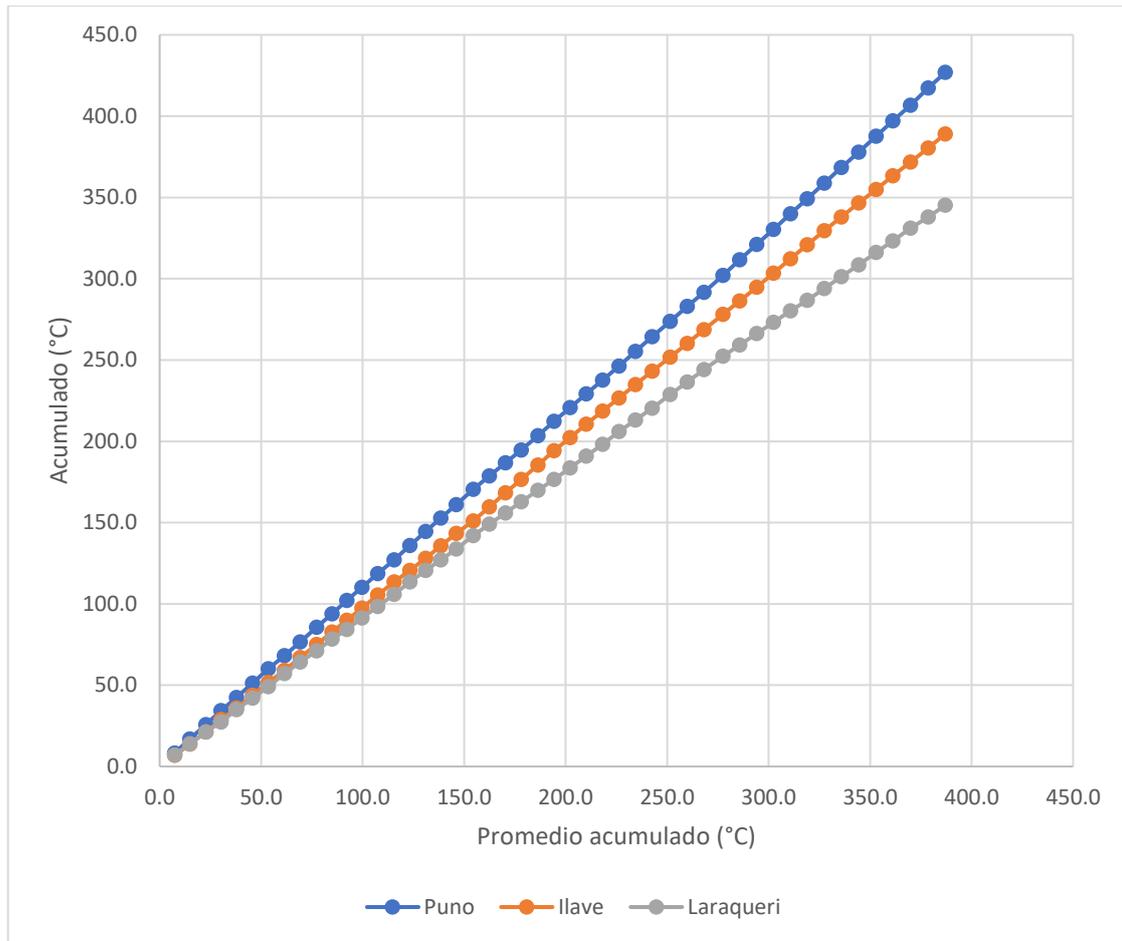


Figura 15. Análisis de doble masa de temperatura media mensuales

4.1.2. Análisis de tendencia de datos meteorológicos de Puno, Ilave y laraqueri

Tabla 7. Prueba estadística de análisis de tendencia de datos de temperatura media.

Estación	Método	P. estadística	Valores críticos		significancia
			a=0.05	a=0.01	
Puno	Mann-Kendall	-0.347	1.96	2.576	NS
	Linear regresión	1.110	2.006	2.672	NS
Laraqueri	Mann-Kendall	-0.94	1.96	2.576	NS
	Linear regresión	-0.895	2.013	2.687	NS
Ilave	Mann-Kendall	1.171	1.96	2.576	NS
	Linear regresión	1.171	2.006	2.672	NS

Fuente: Resultado de Aplicación de paquete TREND



4.2. MODELAMIENTO DE ETP EN LOS SUBTIPOS CLIMATICOS.

4.2.1. Modelamiento de ETP para subtipos climáticos de la Cuenca del río Ilave.

En el altiplano de la región de Puno, para la determinación de la evapotranspiración potencial no existe en realidad un método práctico de medición directa, sino que se necesita un equipamiento caro y difícil de instalar y mantener como son los lisímetros, lo que lleva a su estimación a través de métodos empíricos e indirectos, que generalmente se basan en datos meteorológicos que sin duda pueden llevar a una fuente de error y confusión. Además de la confiabilidad y precisión de la información, se debe tener en cuenta la cantidad de datos disponibles y la posibilidad de acceder a ellos (Rosana del Carmen, 2001).

4.2.1.1. Modelamiento de ETP aplicando regresión lineal múltiple (STC-A)

El modelo de regresión lineal múltiple es un modelo estadístico versátil para evaluar las relaciones entre la variable dependiente y las variables independientes o predictoras. Los predictores pueden ser campos continuos, y derivados, de modo que las relaciones no lineales también estén soportadas. El modelo es lineal porque consiste en términos de aditivos en los que cada término es un predictor que se multiplica por un coeficiente estimado. En la tabla 08 cuyo resultado muestra las probabilidades que tienden a ser cero para todas las variables predictoras y en comparación con el nivel de probabilidad $P \leq 0.01$ la cual muestra alta significancia estadística, respecto a la evapotranspiración potencia empírica y el coeficiente de determinación es de 73.23% y cuya media

general es de $ETP=3.34$ mm/día la cual equivale a 33.40 m³/ha se evapora diariamente y las variables independientes de humedad relativa con signo negativo la cual indica una relación inversa es decir a mayor porcentaje de humedad relativa la evapotranspiración es menor y viceversa; sin embargo las variables de temperatura (T) y velocidad de viento (V) estas variables son directamente proporcionales es decir a mayor grado de temperatura (T) mayor será la evapotranspiración potencial de igual manera ocurre con la velocidad de viento (V).

Tabla 8. Modelo de regresión lineal múltiple estación meteorológica de Puno (STC-A)

Variables independientes		Coficiente	Error estándar	t-estadística	Prob.
Coficiente	C(1)	1.031320	0.146255	7.051528	0.000000
Temperatura media	C(2)	0.251694	0.014954	16.83132	0.000000
Humedad Relativa	C(3)	-0.040058	0.002389	-16.76490	0.000000
Velocidad del viento	C(4)	0.777384	0.027172	28.60955	0.000000
R-squared		0.732301	Mean dependent var		3.343859
Adjusted R-squared		0.730836	S.D. dependent var		0.951408
S.E. of regression		0.493600	Akaike info criterion		1.433039
Sum squared resid		133.5155	Schwarz criterion		1.464297
Log likelihood		-391.5189	Hannan-Quinn criter.		1.445252
F-statistic		499.6920	Durbin-Watson stat		0.503496
Prob(F-statistic)		0.000000			

$$ETP = 1.03132 + 0.2517(T) - 0.0401(HR) + 0.7774(V)$$

E (33)

Donde:

ETP= evapotranspiración potencial (mm/día);

T= temperatura media en (°C)

HR= Humedad relativa en (%); y V= velocidad del viento en (m/s).



En nuestro país, durante los últimos 50 años se han desarrollado una gran cantidad de métodos empíricos por numerosos científicos y especialistas a nivel internacional, con el fin de estimar la evapotranspiración potencial a partir de diferentes variables climáticas (FAO, 2006).

En la tabla 04, del Modelo de regresión lineal múltiple estación meteorológica de Puno, la cual representa al subtipo climático “A” (STC-A) donde Etp es la variable dependiente y las variables climáticas como: es la temperatura media mensual (T), y humedad relativa (HR), las dos variables predictoras y de acuerdo a la probabilidad de $P \leq 0.01$ existen una alta significancia estadística, de acuerdo al coeficiente de determinación implica que 33.24% de la variable evapotranspiración potencial es determinada por las variables de temperatura media mensual (T) y humedad relativa (HR) y la media general de evapotranspiración potencial es 3.3438 mm/día es decir que existe una pérdida de 33.43859 m³/ha. La ecuación que se obtuvo es la siguiente:

$$\mathbf{ETP = 3.483 + 0.3122(T) - 0.0570(HR)} \quad \mathbf{E (34)}$$

Donde:

ETP= evapotranspiración potencial (mm/día);

T= temperatura media en (°C); y

HR= Humedad relativa en (%).

Tabla 9. Modelo de regresión lineal múltiple estación meteorológica de Puno (STC-A)

Variables independientes	Coefficiente	Error estándar	t-estadística	Prob.
Coefficiente C(1)	3.483199	0.186979	18.62887	0.000000
Temperatura media C(2)	0.312210	0.023355	13.36786	0.000000
Humedad relativa C(3)	-0.057071	0.003651	-15.63108	0.000000
R-squared	0.332459	Mean dependent var		3.343859
Adjusted R-squared	0.330028	S.D. dependent var		0.951408
S.E. of regresión	0.778745	Akaike info criterion		2.343153
Sum squared resid	332.9375	Schwarz criterion		2.366597
Log likelihood	-643.7103	Hannan-Quinn criter.		2.352313
F-statistic	136.7110	Durbin-Watson stat		0.198560
Prob(F-statistic)	0.000000			

Los signos positivos que acompañan a los coeficientes de temperatura media mensual (T) implican relación directa es decir a mayor temperatura media mensual, la ETP es mayor; y sin embargo para la humedad relativa (HR) es inversamente proporcional es decir a mayor porcentaje de humedad relativa menor es la evapotranspiración potencia (ETP), es decir el aire saturada de humedad relativa impide la evaporación y la transpiración. La ecuación utiliza datos climáticos de temperatura media del aire, y la humedad relativa solamente.

Para asegurar la precisión del cálculo, los datos climáticos deben ser medidos o ser convertidos a 2 m de altura, sobre una superficie extensa de pasto verde, cubriendo completamente el suelo y sin limitaciones de agua. En la práctica real la regresión múltiple lineal no funciona adecuadamente porque solo tiene dos variables predictoras es decir en nuestro caso el coeficiente de determinación es baja por lo tanto va a subestimar los valores de evapotranspiración potencial (ETP).

4.2.1.2. Modelamiento de ETP de regresión no lineal múltiple (STC-A)

El modelo de la regresión múltiple no lineal genera una ecuación para describir la relación no lineal entre una variable de respuesta continua en nuestro caso la evapotranspiración potencial (ETP) y las variables predictoras como

temperatura media mensual (T), humedad relativa (HR), y la velocidad del viento (V); estas variables independientes predicen nuevas observaciones

Tabla 10. Modelo de regresión no lineal múltiple estación meteorológica de Puno (STC-A)

Variables independientes		Coefficiente	Error estándar	t-estadística	Prob.
Coefficiente	C(1)	4.492208	0.519722	8.643485	0.000000
Temperatura media	C(2)	0.610199	0.036482	16.72580	0.000000
Humedad relativa	C(3)	-0.569613	0.032691	-17.42416	0.000000
Velocidad del viento	C(4)	0.608748	0.022372	27.21055	0.000000
R-squared		0.739808	Mean dependent var		3.343859
Adjusted R-squared		0.738384	S.D. dependent var		0.951408
S.E. of regresión		0.486630	Akaike info criterion		1.404596
Sum squared resid		129.7714	Schwarz criterion		1.435854
Log likelihood		-383.6686	Hannan-Quinn criter.		1.416809
Durbin-Watson stat		0.519860			

La regresión no lineal es una forma de análisis de regresión en la que los datos se ajustan a un modelo y luego se expresan como una función matemática. El objetivo del modelo es hacer que la suma de los cuadrados sea lo más pequeña posible. La suma de cuadrados es una medida que rastrea cuánto varían las observaciones de la variable dependiente de la función no lineal (curva) utilizada para predecir la evapotranspiración potencia (ETP).

El resultado del modelo de regresión no lineal múltiple en la tabla 10, muestra que todos los coeficientes de las variables predictoras muestran signo positivo la cual indica la relación directa y la humedad relativa (HR) el coeficiente tiene signo negativo indica que existe la relación inversa, es decir cuando la evapotranspiración potencial (Etp) es menor a mayor porcentaje de humedad relativa (HR) y la ETP desminuye.

Los coeficientes de T(0.610199), HR(-0.569613) y V(0.608748) con sus respectivos signos que acompañan; de cuerdo a los resultados la probabilidad $P \leq 0.01$ que los valores de las variables predictoras muestran alta significancia estadística y el coeficiente de determinación es $r^2 = 73,98\%$ que el valor de la



evapotranspiración potencial (ETP) está determinada en un valor 73.98% por las variables predictoras de temperatura media mensual (T), humedad relativa media mensual (HR) y la velocidad del viento media mensual (V), siendo este valor muy bueno y una media general es de ETP de 3.343859 mm/día cuya equivalencia es de 33.43859 m³/ha. de pérdida de agua mediante el proceso de evapotranspiración potencial en el subtipo climático “A” (STC-A). A continuación, se presenta la ecuación de ETP:

$$ETP = 4.49 \left[\frac{T^{0.61} V^{0.61}}{(HR)^{0.57}} \right] \quad E(35)$$

Donde: ETo= evapotranspiración potencial (mm/día);

T= temperatura media mensual (°C)

HR= Humedad relativa en (%); y

V= velocidad del viento en (m/s).

Tabla 11. Modelo de regresión no lineal múltiple estación de Puno (STC-A)

Variables independientes		Coficiente	Error estándar	t-estadística	Prob.
Coficiente	C(1)	15.90120	2.677744	5.938280	0.000000
Temperatura media	C(2)	0.776378	0.056754	13.67968	0.000000
Humedad relativa	C(3)	-0.831899	0.050218	-16.56575	0.000000
R-squared		0.346212	Mean dependent var		3.343859
Adjusted R-squared		0.343831	S.D. dependent var		0.951408
S.E. of regression		0.770681	Akaike info criterion		2.322336
Sum squared resid		326.0782	Schwarz criterion		2.345779
Log likelihood		-637.9647	Hannan-Quinn criter.		2.331496
Durbin-Watson stat		0.220331			

El modelo de la regresión múltiple no lineal solamente con dos variables predictoras como temperatura media mensual (T), y humedad relativa media mensual (HR), estas variables independientes predicen nuevas observaciones de ETP. La regresión no lineal es una forma de análisis de regresión en la que los datos se ajustan a un modelo y luego se expresan como una función matemática. La suma de cuadrados es una medida que rastrea cuánto varían las observaciones de la variable dependiente de la función no lineal (curva) utilizada para predecir la evapotranspiración potencia (ETP). La ecuación con dos variables predictoras es la siguiente:

$$ETP=15.90\left[\frac{T^{0.77}}{(HR)^{0.83}}\right] \quad E(36)$$

Donde:

ETP= evapotranspiración potencial (mm/día);

T= temperatura media en (°C);y

HR= Humedad relativa en (%).

Los coeficientes de T (0.776378),esto implica que un incremento un grado de temperatura se aumentara 0.776378 mm/día de evapotranspiración potencial y el signo negativo de HR (-0.831899) la cual indica que la disminución de ;% de humedad relativa causara la desminucion de -0.831899

mm/día de ETP, de acuerdo a los resultados la probabilidad $P \leq 0.01$ que los valores de las variables predictoras muestran alta significancia estadística y un coeficiente de determinación es $r^2 = 34.62\%$ que el valor de la evapotranspiración potencial ETP está determinada en un valor 34.62% por las variables de temperatura (T), y humedad relativa (HR), siendo este valor bajo y una media general es de ETP de 3.343859mm/día cuya equivalencia $33.43859\text{ m}^3/\text{ha.}$ de pérdida de agua mediante el proceso de evapotranspiración potencial (ETP) en el subtipo climático A (STC-A).

4.2.1.3. Modelamiento de ETP aplicando EMV en el subtipoclimático (STC-A)

La estimación de los parámetros mediante el método de máxima verosimilitud conduce a encontrar la función de distribución de probabilidad de que más probablemente provienen los datos de la muestra; sin embargo, es común que en las aplicaciones prácticas se recurra a igualar a cero la derivada de los logaritmos de dicha función para estimar su máximo, lo que, como se muestra en este trabajo puede llevar a resultados incorrectos.

Tabla 12. Modelo de ETP aplicando estimadores de máxima verosimilitud estación meteorológica de Puno (STC-A)

Variables climáticas		Coficiente	Error estándar	z-estadística	Probabilidad.
Coficiente	C(1)	4.491934	0.686762	6.540739	0.000000
Temperatura media	C(2)	0.610183	0.041430	14.72805	0.000000
Humedad relativa	C(3)	-0.569592	0.041958	-13.57535	0.000000
Velocidad del viento	C(4)	0.608767	0.023834	25.54228	0.000000
Sigma	C(5)	0.484867	0.013834	35.04923	0.000000
Log likelihood		-383.6686	Akaike info criterion		1.408219
Avg. log likelihood		-0.695052	Schwarz criterion		1.447291
Number of Coefs.		5.000000	Hannan-Quinn criter.		1.423486

Los resultados se presenta en la tabla 07, del modelo de ETP aplicando estimadores de máxima verosimilitud estación meteorológica de Puno para el (STC-A), de acuerdo a la probabilidad $P \leq 0.01$ para las variables de temperatura media (T), humedad relativa (HR), velocidad del viento (V) y el sigma (σ), los valores de las probabilidades tienden a cero la cual implica que existe alta significancia estadística y que acompañan los signos de los coeficientes son positivos los mismos que indican una relación directa, sin embargo la variable de humedad relativa (HR) tiene signo negativo la misma que indica relación inversa, la cual indica que a mayor humedad relativa menor es el proceso de evapotranspiración potencial (ETP).

Sabemos que las funciones de distribución de algunas variables meteorológicas e hidrológicas tienen gran importancia en los estudios de Hidrología. Para estimar sus parámetros se pueden utilizar métodos como los de momentos y de máxima verosimilitud, aprovechando diversos programas de cómputo que en su mayoría resuelven las ecuaciones correspondientes a dichos métodos con procedimientos de tipo determinístico. Mediante los estimadores de máxima verosimilitud se ha llegado obtener la ecuación siguiente:

$$ETP = 4.4919 \left[\frac{T^{0.61} V^{0.608}}{(HR)^{0.569}} \right] \quad E (37)$$

Donde: ETo= evapotranspiración potencial (mm/día); T= temperatura media en (°C)

HR= Humedad relativa en (%); y V= velocidad del viento en (m/s).

Tabla 13. Modelo de ETP aplicando y EMV con dos variables estación de Puno (STC-A)

Variables climáticas		Coefficiente	Error estándar	z-estadística	Probabilidad.
Coefficiente	C(1)	15.89741	3.249010	4.893000	0.000000
Temperatura media	C(2)	0.776148	0.059713	12.99788	0.000000
Humedad relativa	C(3)	-0.831714	0.050760	-16.38507	0.000000
Sigma	C(4)	0.768585	0.034848	22.05509	0.000000
Log likelihood		-637.9647	Akaike info criterion		2.325959
Avg. log likelihood		-1.155733	Schwarz criterion		2.357217
Number of Coefs.		4.000000	Hannan-Quinn criter.		2.338172

Los resultados se presenta en la tabla 13, del modelo de ETP aplicando EMV estación meteorológica de Puno para el subtipo climatico (STC-A), de acuerdo a la probabilidad $P \leq 0.01$ para las variables de temperatura media (T), y la humedad relativa (HR), y el sigma (σ), los valores de las probabilidades tienden a cero la cual implica que existe alta significancia estadística y que acompañan los signos de los coeficientes son positivos los mismos que indican una relación directa, sin embargo la variable de humedad relativa (HR) tiene signo negativo la misma que indica relación inversa, la cual indica que a mayor humedad relativa menor es el proceso de evapotranspiración potencial (ETP).

$$ETP=15.8974 \left[\frac{T^{0.776}}{(HR)^{0.832}} \right] \quad E (38)$$

Donde:

ETo= evapotranspiración potencial (mm/dia);

T= temperatura media en (°C); y

HR= Humedad relativa en (%)

Los coeficientes de la variables predictoras como la: temperatura media T(0.776148), y humedad relativa HR (-0.831714), estas variables predictoras tienen signos positivos las mismas que indican que existe una relación directa es



decir cuanto mayor es la temperatura media mensual, es mayor el proceso de evapotranspiración ETP; sin embargo respecto a la humedad relativa (HR) en todo los modelos tiene signo negativo la cual implica que existe una relación inversa es decir cuanto mayor es la humedad relativa la evapotranspiración potencial es menor.

4.2.2. Modelamiento de ETP con regresión lineal múltiple para (STC-B)

El resultado del modelo de regresión múltiple en la tabla 09, muestra que todos los coeficientes de las variables predictoras muestran signo positivo la cual indica la relación directa y excepto para la variable humedad relativa (HR) el coeficiente de signo negativo lo cual indica que existe la relación inversa es decir cuando la evapotranspiración potencial (ETP) es menor a mayor porcentaje de humedad relativa (HR).

Los coeficientes de $T(0.259218)$, $HR(-0.000230)$ y $V(0.084415)$ con sus respectivos signos que acompañan; de acuerdo a los resultados de la t y a la probabilidad $P \leq 0.01$ que los valores de las variables predictoras muestran alta significancia estadística y un coeficiente de correlación es de $r^2 = 75.72\%$ que indica el valor de 75.72% de la variable de la variable ETP es predicha por la variable independiente. Una media general es de 3.343859 mm/día cuya equivalencia 33.43859 m³/ha. De pérdida de agua mediante el proceso de evapotranspiración potencial en el subtipo climático (STC-B).

Tabla 14. Modelo de regresión lineal múltiple tres variables estación llave (STC-B)

Variables independientes		Coefficiente	Error estándar	t-estadística	Prob.
Coefficiente	C(1)	0.671889	0.077756	8.640968	0.000000
Temperatura media	C(2)	0.259218	0.007433	34.87206	0.000000
Humedad relativa	C(3)	-0.000230	0.001022	-0.225428	0.821700
Velocidad del viento	C(4)	0.084415	0.016434	5.136493	0.000000
R-squared		0.757185	Mean dependent var		3.033279
Adjusted R-squared		0.755856	S.D. dependent var		0.584676
S.E. of regression		0.288894	Akaike info criterion		0.361705
Sum squared resid		45.73586	Schwarz criterion		0.392962
Log likelihood		-95.83045	Hannan-Quinn criter.		0.373918
F-statistic		569.6213	Durbin-Watson stat		0.856262
Prob(F-statistic)		0.000000			

Los coeficientes de las variables predictoras como es la: temperatura media mensual T(0.259218), humedad relativa HR (-0.000230), y la velocidad del viento V (0.084415) estas variables predictoras tienen signos positivos las mismas que indican una relación directa es decir cuanto mayores son la temperatura media mensual (T), y velocidad del viento (V) es mayor el proceso de evapotranspiración (ETP); sin embargo respecto a la humedad relativa (HR) acompaña signo negativo la cual implica que existe una relación inversa es decir cuanto mayor es la humedad relativa (HR) y la evapotranspiración potencial (ETP) será menor. El valor del coeficiente de determinación de 0.757185 sugiere que el 75.72% de la variable evapotranspiración potencial (ETP) es predicha por las variables independientes como es la temperatura media mensual (T), humedad relativa (HR), y la velocidad del viento (V).

$$ETO = 0.671 + 0.2592(T) - 0.00023(HR) + 0.0844(V) \quad E (39)$$

Donde:

ETo= evapotranspiración potencial (mm/día);

T= temperatura media en (°C);

HR= Humedad relativa en (%); y

V= velocidad del viento en (m/s).

Tabla 15. Modelo de regresión lineal múltiple de dos variables de estación llave (STC-B)

Variables independientes		Coficiente	Error estándar	t-estadística	Prob.
Coficiente	C(1)	0.890087	0.066615	13.36161	0.000000
Temperatura media	C(2)	0.271916	0.007170	37.92151	0.000000
Humedad relativa	C(3)	-0.001174	0.001029	-1.141770	0.254000
R-squared		0.745495	Mean dependent var		3.033279
Adjusted R-squared		0.744568	S.D. dependent var		0.584676
S.E. of regression		0.295497	Akaike info criterion		0.405103
Sum squared resid		47.93783	Schwarz criterion		0.428547
Log likelihood		-108.8086	Hannan-Quinn criter.		0.414263
F-statistic		804.0634	Durbin-Watson stat		0.840981
Prob(F-statistic)		0.000000			

ETP es la variable dependiente y las variables climáticas de temperatura media mensual (T), y humedad relativa (HR) son dos variables predictoras de acuerdo a la probabilidad de $P \leq 0.01$ existen una alta significancia estadística; El valor del coeficiente de determinación de 0.745495 sugiere que el 74.54% de la variable evapotranspiración potencial (ETP) es predicha por las variables independientes como es la temperatura media mensual (T), y la humedad relativa (HR). La media general de evapotranspiración potencial es de 3.3438 mm/día es decir que existe una pérdida de 33.33.43859 m³/ha de agua de riego.

$$ETO = 0.89 + 0.2719(T) - 0.00117(HR) \quad E (40)$$

Donde: ETO= evapotranspiración potencial (mm/día); T= temperatura media en (°C); HR= Humedad relativa en (%).

4.2.2.1. Modelamiento de ETP aplicando regresión no lineal tres variables (STC-B)

Tabla 16. Modelo de regresión no lineal múltiple estación meteorológica de Ilave (STC-B)

Variables independientes	Coficiente	Error estándar	t-estadística	Prob.
Coficiente C(1)	0.684172	0.045009	15.20069	0.000000
Temperatura media C(2)	0.677728	0.020140	33.65123	0.000000
Humedad relativa C(3)	-0.004405	0.015349	-0.286970	0.774200
Velocidad deñ viento C(4)	0.081991	0.016197	5.062257	0.000000
R-squared	0.756863	Mean dependent var		3.033279
Adjusted R-squared	0.755532	S.D. dependent var		0.584676
S.E. of regression	0.289085	Akaike info criterion		0.363029
Sum squared resid	45.79650	Schwarz criterion		0.394287
Log likelihood	-96.19612	Hannan-Quinn criter.		0.375242
Durbin-Watson stat	0.867564			

El resultado del modelo de regresión múltiple en la tabla 16, muestra que todos los coeficientes de las variables predictoras muestran signo positivo la cual indica la relación directa y excepto para la variable humedad relativa (HR), el coeficiente tiene signo negativo indica que existe la relación inversa es decir cuando la evapotranspiración potencial (ETP) es menor a mayor porcentaje de humedad relativa. Los coeficientes de T(0.677728), HR(-0.004405) y la velocidad del viento V(0.081991) con sus respectivos signos que acompañan; de cuerdo a los resultados de la y a la probabilidad.

El valor del coeficiente de determinación de 0.756863 sugiere que el 75.86% de la variable evapotranspiración potencial (ETP) es predicha por las variables independientes como es la temperatura media mensual (T), y la humedad relativa (HR). y una media general es de 3.343859 mm/día cuya equivalencia 33.43859 m³/ha. De perdida de agua mediante el proceso de evapotranspiración potencial en el subtipo climático (STC-B). La ecuación obtenida es la siguiente:

$$ETo = 0.6842 \left[\frac{T^{0.68} V^{0.081}}{(HR)^{0.0044}} \right] \quad E (41)$$

Donde: ETo= evapotranspiración potencial (mm/día); T= temperatura media en (°C)

HR= Humedad relativa en (%); y V= velocidad del viento en (m/s).

Tabla 17. Modelo de regresión no lineal múltiple dos variables estación Ilave (STC-B)

Variables independientes		Coficiente	Error estándar	t-estadística	Prob.
Coficiente	C(1)	0.748703	0.048258	15.51464	0.000000
Temperatura media	C(2)	0.705915	0.019753	35.73705	0.000000
Humedad relativa	C(3)	-0.018404	0.015337	-1.199965	0.230700
R-squared		0.745466	Mean dependent var		3.033279
Adjusted R-squared		0.744539	S.D. dependent var		0.584676
S.E. of regression		0.295514	Akaike info criterion		0.405216
Sum squared resid		47.94322	Schwarz criterion		0.428659
Log likelihood		-108.8396	Hannan-Quinn criter.		0.414376
Durbin-Watson stat		0.850811			

El resultado del modelo de regresión múltiple en la tabla 17, muestra que todos los coeficientes de las variables predictoras muestran signo positivo la cual indica la relación directa y excepto para la variable humedad relativa (HR) y el coeficiente tiene signo negativo indica que existe la relación inversa es decir cuando la evapotranspiración potencial es menor a mayor porcentaje de humedad relativa. Los coeficientes de T(0.705915), y la humedad relativa HR(-0.018404) con sus respectivos signos que acompañan; de acuerdo a los resultados las probabilidades de la dos variables tienden a cero y de acuerdo a $P \leq 0.01$ los valores de las variables predictoras muestran alta significancia estadística.

El valor del coeficiente de determinación de 0.745466 sugiere que el 74.54% de la variable evapotranspiración potencial (ETP) es predicha por las variables independientes como es la temperatura media mensual (T), y la humedad relativa (HR). y una media general es de 3.343859 mm/día cuya equivalencia 33.43859 m³/ha. De pérdida de agua mediante el proceso de evapotranspiración potencial en el piso ecológico “A”.

$$ETo = 0.7487 \left[\frac{T^{0.71}}{(HR)^{0.018}} \right] \quad E (42)$$

Donde: ETo= evapotranspiración potencial (mm/día); T= temperatura media en (°C) y HR= Humedad relativa en (%).

4.2.2.2. Modelamiento de ETP mediante EMV para (STC-B)

La estimación de los parámetros mediante el método de EMV, conduce a encontrar la función de distribución de probabilidad de que más probablemente provienen los datos de la muestra; sin embargo, es común que en las aplicaciones prácticas se recurra a igualar a cero la derivada de los logaritmos de dicha función para estimar su máximo, lo que, como se muestra en este trabajo puede llevar a resultados incorrectos.

Tabla 18. Modelo de ETP aplicando EMV de tres variables estación llave (STC-B)

Variabes climáticas		Coefficiente	Error estándar	z-estadística	Probabilidad.
Coefficiente	C(1)	0.684169	0.043321	15.79316	0.000000
Temperatura media	C(2)	0.677729	0.021371	31.71285	0.000000
Humedad relativa	C(3)	-0.004403	0.013940	-0.315865	0.752100
Velocidad del viento	C(4)	0.081989	0.016164	5.072342	0.000000
Sigma	C(σ)	0.288035	0.009032	31.88950	0.000000
Log likelihood		-96.19612	Akaike info criterion		0.366653
Avg. log likelihood		-0.174268	Schwarz criterion		0.405725
Number of Coefs.		5.000000	Hannan-Quinn criter.		0.381919

Los resultados se presenta en la tabla 13, del modelo de Eto aplicando estimadores de máxima verosimilitud estación meteorológica de Puno (STC-B), de acuerdo a la probabilidad $P \leq 0.01$ para las variables de temperatura media (T), humedad relativa (HR), velocidad del viento (V) y el sigma (σ) cuyos signos, los valores de las probabilidades tienden a cero la cual implica que existe alta significancia estadística y que acompañan los signos de los coeficientes son positivos los mismos que indican una relación directa, sin embargo la variable de

humedad relativa (HR) tiene signo negativo la misma que indica relación inversa, la cual implica que a mayor humedad relativa menor es el proceso de evapotranspiración potencial.

Las funciones de distribución de algunas variables predictoras tienen gran importancia en los estudios de Hidrología. Para estimar sus parámetros se pueden utilizar métodos como los de momentos y de EMV, aprovechando diversos programas de cómputo que en su mayoría resuelven las ecuaciones correspondientes a dichos métodos con procedimientos de tipo determinístico. Mediante los estimadores de máxima verosimilitud se ha llegado a obtener la ecuación siguiente:

$$ETo = 0.6841 \left[\frac{T^{0.677} V^{0.0819}}{(HR)^{0.00440}} \right] \quad E (43)$$

Donde:

ETo= evapotranspiración potencial (mm/día);

T= temperatura media en (°C);

HR= Humedad relativa en (%); y

V= velocidad del viento en (m/s).

Tabla 19. Modelo de ETP aplicando EMV de dos variables estación Ilave (STC-B)

Variables climáticas		Coefficiente	Error estándar	z-estadística	Probabilidad.
Coefficiente	C(1)	0.748707	0.046671	16.04238	0.000000
Temperatura media	C(2)	0.705916	0.022026	32.04875	0.000000
Humedad relativa	C(3)	-0.018406	0.013627	-1.350652	0.176800
Sigma	C(4)	0.294711	0.009576	30.77556	0.000000
Log likelihood		-108.8396	Akaike info criterion		0.408839
Avg. log likelihood		-0.197173	Schwarz criterion		0.440097
Number of Coefs.		4	Hannan-Quinn criter.		0.421052

$$ETo = 0.74871 \left[\frac{T^{0.705}}{(HR)^{0.0184}} \right] \quad E (44)$$

Donde:



ETP= evapotranspiración potencial (mm/día); T= temperatura media en (°C) y
HR= Humedad relativa en (%).

4.2.3. Modelamiento de ETP regresión lineal múltiple de tres variables (STC-C)

Tabla 20. Modelo de regresión lineal múltiple estación meteorológica de Laraqueri
(STC-C)

Variables independientes		Coefficiente	Error estándar	t-estadística	Prob.
Coefficiente	C(1)	2.764727	0.101745	27.17315	0.000000
Temperatura media	C(2)	0.172535	0.008344	20.67845	0.000000
Humedad relativa	C(3)	-0.023522	0.001335	-17.61758	0.000000
Velocidad deñ viento	C(4)	0.330881	0.021437	15.43532	0.000000
R-squared		0.655205	Mean dependent var		3.767699
Adjusted R-squared		0.653317	S.D. dependent var		0.656433
S.E. of regression		0.386507	Akaike info criterion		0.943884
Sum squared resid		81.86427	Schwarz criterion		0.975142
Log likelihood		-256.5121	Hannan-Quinn criter.		0.956097
F-statistic		347.1162	Durbin-Watson stat		0.601143
Prob(F-statistic)		0.000000			

El resultado del modelo de regresión múltiple en la tabla 20 para (STC-C), muestra que todo el coeficiente de las variables predictoras muestra signo positivo la cual indica la relación directa y excepto para la variable humedad relativa (HR) el coeficiente tiene signo negativo indica que existe la relación inversa es decir cuando la evapotranspiración potencial es menor a mayor porcentaje de humedad relativa (HR). Los coeficientes de T(0.172535), HR(-0.023522) y V(0.330881) con sus respectivos signos que acompañan; de cuerdo a los resultados de la probabilidad $P \leq 0.01$ que los valores de las variables predictoras muestran alta significancia estadística y un coeficiente de determinación es de $r^2 = 65.52\%$ este valor indica que 65.52% es determinada la variable evapotranspiración potencial (ETP), por las variables predictoras de temperatura media mensual (T), humedad relativa (HR) y la velocidad del viento (V); la media general de ETP es de 3.343859 mm/día cuya equivalencia

33.43859 m³/ha. de pérdida de agua mediante el proceso de evapotranspiración potencial en el subtipo climático C. La ecuación que se obtuvo es la ecuación:

$$ETO = 2.7647 + 0.1725(T) - 0.023(HR) + 0.331(V) \quad E(45)$$

Donde:

ETo= evapotranspiración potencial (mm/día);

T= temperatura media mensual en (°C);

HR= Humedad relativa en (%); y

V= velocidad del viento en (m/s).

Tabla 21. Modelo de regresión lineal múltiple dos variables estación Laraqueri (STC-C)

Variables independientes		Coficiente	Error estándar	t-estadística	Probabilidad.
Coficiente	C(1)	3.740295	0.095418	39.19901	0.000000
Temperatura media	C(2)	0.204790	0.009667	21.18477	0.000000
Humedad relativa	C(3)	-0.026282	0.001583	-16.59876	0.000000
R-squared		0.505301	Mean dependent var		3.767699
Adjusted R-squared		0.503499	S.D. dependent var		0.656433
S.E. of regression		0.462542	Akaike info criterion		1.301260
Sum squared resid		117.4557	Schwarz criterion		1.324703
Log likelihood		-356.1476	Hannan-Quinn criter.		1.310419
F-statistic		280.3829	Durbin-Watson stat		0.470720
Prob(F-statistic)		0.000000			

Los coeficientes de la variables predictoras como la: temperatura media mensual T(0.204790), y la humedad relativa HR (-0.026282), estas variables predictoras cuando tienen signos positivos la cual indica que existe una relación directa es decir cuanto mayor es la temperatura media mensual (T), es mayor el proceso de evapotranspiración ETP; sin embargo respecto a la humedad relativa (HR) en todo los modelos tiene signo negativo la cual implica que existe una relación inversa es decir cuanto mayor es la humedad relativa la evapotranspiración potencial (ETP), es menor. El coeficiente de 50.53% la cual sugiere que la variable dependiente es predicha por la variable independiente.



$$ETO = 3.7403 + 0.2047(T) - 0.0263(HR) \quad E (46)$$

Donde: ETO= evapotranspiración potencial (mm/día); T= temperatura media en (°C); HR= Humedad relativa en (%).

4.2.3.1. Modelamiento de ETP aplicando regresión no lineal múltiple para (STC-C)

Los coeficientes de las variables predictoras como la: temperatura media T(0.254270), humedad relativa HR (-0.232015), y la Velocidad del viento V (0.293424), estas variables predictoras tienen signos positivos las mismas que indican que existe una relación directa es decir cuanto mayor es la temperatura media mensual (T), y la variable velocidad del viento (V), es mayor el proceso de evapotranspiración (ETP); sin embargo respecto a la variable humedad relativa (HR) en todos los modelos tiene signo negativo la cual implica que existe una relación inversa es decir cuanto mayor es la humedad relativa la evapotranspiración potencial (ETP) es menor. el valor de 0.622170 por ejemplo sugiere que el 62.22% de la variable de la variable evapotranspiración potencial (ETP), es predicha por las variables independientes como son temperatura media mensual (T), Humedad relativa (HR) y la velocidad del viento (V).

Tabla 22. Modelo de regresión no lineal múltiple tres variables estación Laraqueri
(STC-C)

Variables independientes		Coficiente	Error estándar	t-estadística	Probabilidad.
Coficiente	C(1)	4.141961	0.252490	16.40443	0.000000
Temperatura media	C(2)	0.254270	0.014613	17.40065	0.000000
Humedad relativa	C(3)	-0.232015	0.014087	-16.47049	0.000000
Velocidad deñ viento	C(4)	0.293424	0.018555	15.81381	0.000000
R-squared		0.622170	Mean dependent var		3.767699
Adjusted R-squared		0.620102	S.D. dependent var		0.656433
S.E. of regression		0.404598	Akaike info criterion		1.035377
Sum squared resid		89.70754	Schwarz criterion		1.066634
Log likelihood		-281.7639	Hannan-Quinn criter.		1.047590
Durbin-Watson stat		0.679930			

$$ETo = 4.1419 \left[\frac{T^{0.25} V^{0.2934}}{(HR)^{0.232}} \right] \quad E (47)$$

Donde:

ETo= evapotranspiración potencial (mm/día);

T= temperatura media en (°C);

HR= Humedad relativa en (%).

Tabla 23. Modelo de regresión no lineal múltiple dos variables estación Laraqueri
(STC-C)

Variables independientes		Coficiente	Error estándar	t-estadística	Probabilidad.
Coficiente	C(1)	5.650401	0.392308	14.40296	0.000000
Temperatura media	C(2)	0.310345	0.017641	17.59236	0.000000
Humedad relativa	C(3)	-0.253347	0.016964	-14.93458	0.000000
R-squared		0.441850	Mean dependent var		3.767699
Adjusted R-squared		0.439817	S.D. dependent var		0.656433
S.E. of regression		0.491310	Akaike info criterion		1.421937
Sum squared resid		132.5207	Schwarz criterion		1.445380
Log likelihood		-389.4546	Hannan-Quinn criter.		1.431097
Durbin-Watson stat		0.522573			

$$ETo = 5.65 \left[\frac{T^{0.31}}{(HR)^{0.253}} \right] \quad E (48)$$

Donde:

ETo= evapotranspiración potencial (mm/día);

T= temperatura media en (°C) y

HR= Humedad relativa en (%).

4.2.3.2. Modelamiento de ETP aplicando EMV para (STC-C)

Tabla 24. Modelo de Eto mediante EMV de tres variables estación Laraqueri (STC-C)

Variables climáticas		Coficiente	Error estándar	z-estadística	Probabilidad.
Coficiente	C(1)	4.141501	0.182518	22.69093	0.000000
Temperatura media	C(2)	0.254246	0.017214	14.77012	0.000000
Humedad relativa	C(3)	-0.231977	0.006407	-36.20467	0.000000
Velocidad del viento	C(4)	0.293430	0.016024	18.31202	0.000000
Sigma	C(5)	0.403145	0.011126	36.23361	0.000000
Log likelihood		-281.7639	Akaike info criterion		1.039000
Avg. log likelihood		-0.510442	Schwarz criterion		1.078072
Number of Coefs.		5.000000	Hannan-Quinn criter.		1.054266

Los resultados se presenta en la tabla 24, del modelo de ETP aplicando estimadores de máxima verosimilitud estación meteorológica de Puno (STC-C), de acuerdo a la probabilidad $P \leq 0.01$ para las variables de temperatura media (T), humedad relativa (HR), velocidad del viento (V) y el sigma (σ) cuyos signos, los valores de las probabilidades tienden a cero la cual implica que existe alta significancia estadística y que acompañan los signos de los coeficientes son positivos los mismos que indican una relación directa, sin embargo la variable de humedad relativa (HR) tiene signo negativo la misma que indica relación inversa, la cual implica que a mayor humedad relativa menor es el proceso de evapotranspiración potencial.

Las funciones de distribución de algunas variables meteorológicas e hidrológicas tienen gran importancia en los estudios de Hidrología. Para estimar sus parámetros se pueden utilizar métodos como los de momentos y de máxima verosimilitud, aprovechando diversos programas de cómputo que en su mayoría

resuelven las ecuaciones correspondientes a dichos métodos con procedimientos de tipo determinístico. Mediante los estimadores de máxima verosimilitud se ha llegado obtener la ecuación siguiente:

$$ET_o = 4.1415 \left[\frac{T^{0.254} v^{0.2934}}{(HR)^{0.2319}} \right] \quad E (49)$$

Donde:

ETP= evapotranspiración potencial (mm/día);

T= temperatura media en (°C);

HR= Humedad relativa en (%).

Tabla 25. Modelo de ETP aplicando EMV de dos variables estación Laraqueri (STC-C)

Variables climáticas		Coficiente	Error estándar	z-estadística	Probabilidad.
Coficiente	C(1)	5.650039	0.313617	18.01570	0.000000
Temperatura media	C(2)	0.310332	0.019264	16.10925	0.000000
Humedad relativa	C(3)	-0.253325	0.009325	-27.16518	0.000000
Sigma	C(4)	0.489983	0.014612	33.53285	0.000000
Log likelihood		-389.4546	Akaike info criterion		1.425560
Avg. log likelihood		-0.705534	Schwarz criterion		1.456818
Number of Coefs.		4.000000	Hannan-Quinn criter.		1.437773

Los resultados se presenta en la tabla 20, del modelo de Eto aplicando estimadores de máxima verosimilitud estación meteorológica de Puno (STC-B), de acuerdo a la probabilidad $P \leq 0.01$ para las variables de temperatura media (T), humedad relativa (HR), velocidad del viento (V) y el sigma (σ) cuyos signos, los valores de las probabilidades tienden a cero la cual implica que existe alta significancia estadística y que acompañan los signos de los coeficientes son positivos los mismos que indican una relación directa, sin embargo la variable de humedad relativa (HR) tiene signo negativo la misma que indica relación inversa, la cual implica que a mayor humedad relativa menor es el proceso de evapotranspiración potencial determinístico. Mediante los estimadores de máxima verosimilitud se ha llegado obtener la ecuación siguiente:

$$E_{To} = 5.650 \left[\frac{T^{0.31}}{(HR)^{0.253}} \right] \quad E (50)$$

Donde:

E_{To} = evapotranspiración potencial (mm/día);

T= temperatura media mensual en (°C) y

HR= Humedad relativa en (%).

Los coeficientes de la variables predictoras como la: temperatura media mensual T(0.310332), y humedad relativa HR (-0.253325), estas variables predictoras tienen signos positivos y negativos; las mismas que indican una relación directa es decir cuanto mayores son la temperatura media mensual (T), proceso de evapotranspiración ETP es mayor; sin embargo respecto a la humedad relativa (HR) acompaña signo negativo la cual implica que existe una relación inversa es decir cuanto mayor es la humedad relativa (HR) por lo tanto la evapotranspiración potencial (ETP) será menor. El valor del coeficiente de determinación de 0.20 sugiere que el 20% de la variable evapotranspiración potencial (ETP) es predicha por las variables independientes como es la temperatura media mensual (T), humedad relativa HR, velocidad del viento (V) y la Insolacion (I).

4.3. CALIBRACION Y VALIDACION DE LOS MODELOS PARA STC

Para el modelamiento de ETP se ha utilizado los datos históricos desde 1967 a 2012 para la calibración y para la validación se ha utilizado datos desde 2013 a 2021, con los datos se obtenido las ecuaciones que están en los resultados las cuales se han enumerado para cada subtipo climático las ecuaciones esta con la nomenclatura de E(33) al E(50), con cada una de las ecuaciones se han generado valores de evapotranspiración potencial tal como se muestra en el anexo del presente trabajo de investigación.

4.3.1. Subtipo climático “A” estación meteorológica de Puno (STC-A)

Tabla 26. Análisis de variancia para modelos de evapotranspiración potencia en el (STC-A)

F. de V.	GL	SC	CM	Fc	Prob.
Modelos de (ETP)	6.000	54.520	9.087	22.950	0.000
Error	749.000	296.530	0.396		
Total	755.000	351.050			

En la tabla 26 se muestra los resultados del análisis de variancia de los seis modelos seleccionados de evapotranspiración potencial (ETP) respecto al testigo E(VA) que tiene valores observados; en la cual muestra que existe alta significancia estadística de acuerdo a la probabilidad de $P \leq 0.01$, en la cual demuestra también un coeficiente de determinación $r^2 = 15.53\%$ la cual indica que el modelo está determinado en un 15,53% por las variables independientes y con una distribución estándar de $S = 0.6292$ en (mm/día).

En la tabla 27 se muestra la estadística descriptiva de los valores medios de cada uno de los modelos obtenidos con sus respectivas desviaciones estándar y también muestra el rango que presenta cada una de los modelos obtenidos y comparadas con el valor real E(VA).

Tabla 27. Estadística descriptiva y el rango de valores de ETP (STC-A)

Modelo	observación	Media (mm/día)	Desviación estándar	95% CI
1= E(39)	108	3.3369	0.6160	(3.2181; 3.4558)
2= E(40)	108	2.7517	0.5321	(2.8706; 2.8706)
3= E(41)	108	3.3111	0.5867	(3.1922; 3.4299)
4= E(42)	108	2.7660	0.4700	(2.6596; 2.8848)
5= E(43)	108	3.3180	0.5875	(3.1992; 3.4369)
6= E(44)	108	2.7784	0.4755	(2.6596; 2.8973)
7= E(VA)	108	3.2580	0.9861	(3.1391; 3.3768)

En la tabla 28 se presenta la prueba de rango múltiple de Tukey a la probabilidad de 95% en la cual se aprecia que los modelos E(39), E(43), E(41) y E(VO) que estos modelos presentan valores estadísticamente similares tal como

se muestra en la tabla 28 y donde el valor E(VO) se presenta con un valor de 3.2580 mm/día se ubica en la parte inferior respecto a los valores E(43) y E(41) con valores de ETP 3.3180 y 3.3111 (mm/día) respectivamente.

Tabla 28. Prueba de significancia de Tukey (95%) para modelos del (STC-A)

Orden	Modelo	EPT (mm/día)	Tukey (95%)
1	1= E(39)	3.3369	a
2	5= E(43)	3.3180	a
3	3= E(41)	3.3111	a
4	7= E(VA)	3.2580	a
5	6= E(44)	2.7784	b
6	4= E(42)	2.7660	b
7	2= E(40)	2.7517	b

Que en el presente estudio consideramos que estos modelos E(43) y E(41) son los más próximos al valor observado por lo tanto son válidos para su aplicación en la región de subtipo climático “A” (STC-B) en la unidad hidrográfico de Ilave.

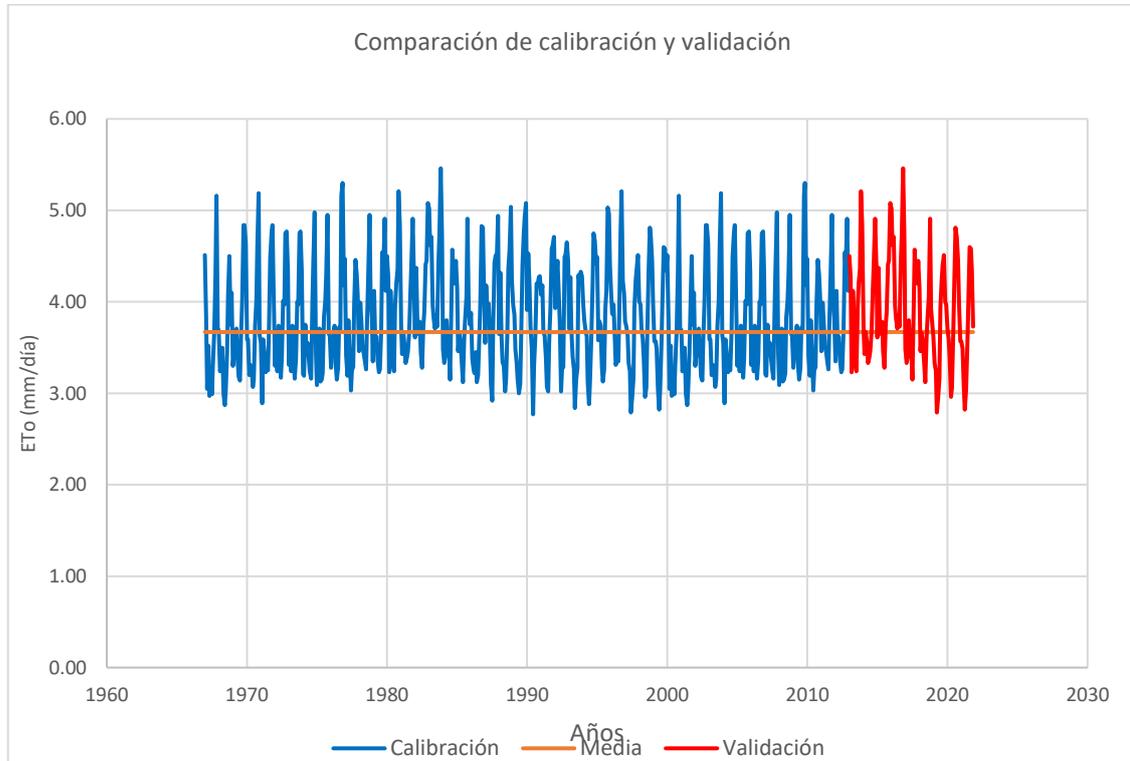


Figura 16. Gráfico de calibración y validación (STC-A)

4.3.2. Subtipo climático “B” Estación meteorológica de Ilave (STC-B)

Tabla 29. Análisis de variancia para modelos de evapotranspiración potencial (STC-B)

F. de V.	GL	SC	CM	Fc	Prob.
Modelos de (ETP)	6.000	0.387	0.06447	0.31	0.930
Error	749.000	154.089	0.20573		
Total	755.000	154.476			

En la tabla 29 se muestra los resultados del análisis de variancia de los seis modelos de los seis modelos de evapotranspiración potencial (ETP) respecto al testigo E(VB) que tiene valores observados; la cual muestra que no existe significancia estadística de acuerdo a al $F_c = 0.93$ y la probabilidad de $P \leq 0.01$, demuestra también un coeficiente de determinación $r^2 = 25.00\%$ la cual indica que el modelo está determinado en un 25.00% por las variables independientes como la temperatura (T), humedad relativa(HR) y velocidad de viento (V) y la desviación estándar de $S = 0.45351$ en (mm/día). En la tabla 30 se muestra la estadística descriptiva y los valores medios de cada uno de los modelos obtenidos con sus respectivas desviaciones estándar y también muestra el rango de los modelos obtenidos y comparadas con el valor real E(VB).

Tabla 30. Estadística descriptiva y el rango de valores de ETP (STC-B) estación Ilave

Modelo	observación	Media (mm/día)	Desviación estándar	95% CI
1 E(45)	108	3.2932	0.2946	(3.2075; 3.3788)
2 E(46)	108	3.3012	0.2795	(3.2155; 3.3869)
3 E(47)	108	3.3152	0.2842	(3.2295; 3.4009)
4 E(48)	108	3.3389	0.2695	(3.2532; 3.4246)
5 E(49)	108	3.2963	0.2818	(3.2106; 3.3820)
6 E(50)	108	3.2970	0.2642	(3.2114; 3.3827)
7 E(VB)	108	3.2580	0.9861	(3.1723; 3.3436)

En la tabla 31 se presenta la prueba de rango múltiple de Tukey a la probabilidad de 95% en la cual se aprecia que los modelos E(45), E(46), E(47) E(48), E(49), E(50) y E(VB) los valores obtenidos mediante los modelos presentan valores estadísticamente similares tal como indicada en la tabla

mencionada y donde el valor E(VB) se presenta con un valor de 3.2580 mm/día se ubica en el último lugar respecto a los valores E(48) a E(45) con valores de 3.3389 y 3.2932 mm/día, respectivamente; estos valores indican la pérdida de agua 33.580 y 32.932 m³/ hectárea de agua es decir en la zona de estudio. Que en el presente estudio consideramos que los modelos E(45) y E(49) son los más próximos al valor observado E(VB) con 32.580 m³/ha; por lo tanto son válidos para su aplicación en la zona de subtipo climático “B” (STC-B) en la unidad hidrográfico de Ilave.

Tabla 31. Prueba de significancia de Tukey (95%) para (STC-B) estación Ilave

Orden	Modelo	EPT (mm/día)	Tukey (95%)
1	4= E(48)	3.3389	a
2	3= E(47)	3.3152	a
3	2= E(46)	3.3012	a
4	6= E(50)	3.2970	a
5	5= E(49)	3.2963	a
6	1 =E(45)	3.2932	a
7	7= E(VB)	3.2580	a

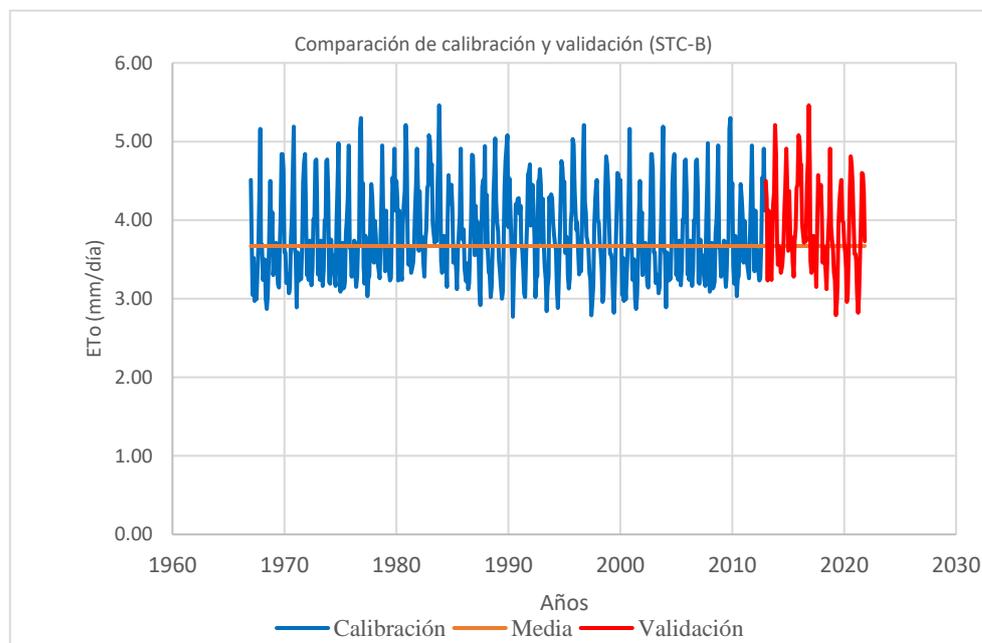


Figura 17. Gráfico de comparación de calibración y validación de (STC-B)

4.3.3. Subtipo climático “C” estación Laraqueri (STC-C)

En la tabla 32 se muestra los resultados del análisis de variancia de los seis modelos de evapotranspiración potencial (ETP) como son E(45), E(46), E(47) E(48), E(49), E(50) y E(VC); los valores obtenidos respecto al testigo E(VC) modelo con valores observados; en la cual muestra que existe alta significancia estadística de acuerdo a la probabilidad de $P \leq 0.01$, en la cual demuestra también un coeficiente de determinación $r^2 = 11.47\%$ la cual indica que el modelo está determinado en un 11.47% por las variables independientes como la temperatura (T), humedad relativa (HR) y velocidad del viento (V) y con una desviación estándar estándar de $S = 0.3940$ mm/día.

Tabla 32. Análisis de variancia para modelos de evapotranspiración potencia en el (STC-C)

F. de V.	GL	SC	CM	Fc	Prob.
Modelos de (ETP)	6.000	15.060	2.5101	1 6.170	0.000
Error	749.000	116.280	0.1552		
Total	755.000	131.340			

En la tabla 33, se muestra la estadística descriptiva de los valores medios de cada uno de los modelos obtenidos con sus respectivas desviaciones estándar y también muestra el rango que presenta cada una de los modelos obtenidos y comparadas con el valor real E(VC).

Los modelos E(51), E(52), E(53), E(54), E(55), E(56) y E(VC) presentan medias de 3.2055, 3.4440, 3.1575, 3.4735, 3.1801, 3.4735 y 3.4669 mm/día que son valores bastante similares empíricamente tal como se puede observar en la tabla 33 de estadística descriptiva.

Tabla 33. Estadística descriptiva y el rango de valores de ETP (STC-C)

Modelo	observación	Media (mm/día)	Desviación estándar	95% CI
1= E(51)	108	3.2055	0.2965	(3.1311; 3.2799)
2= E(52)	108	3.4440	0.3121	(3.3695; 3.5184)
3= E(53)	108	3.1575	0.2901	(3.0831; 3.2320)
4= E(54)	108	3.4735	0.3134	(3.3991; 3.5479)
5= E(55)	108	3.1801	0.2959	(3.1057; 3.2546)
6= E(56)	108	3.4735	0.3134	(3.3991; 3.5479)
7= E(VC)	108	3.4669	0.7302	(3.3925; 3.5414)

En la tabla 34 se muestra la prueba de rango múltiple de Tukey a la probabilidad de 95% en la cual se aprecia que los modelos E(56), E(54), E(VC) y E(52) con valores 3.4735, 3.4735, 3.4669 y 3.4440 mm/día, respectivamente, que estos valores son similares estadísticamente tal como se muestra en la tabla indicada, y los modelos E(51), E(55) y E(53) con valores 3.2055, 3.1801 y 3.1575 mm/día respectivamente, también son similares estadísticamente; el valor observado E(VC) se presenta un valor de 3.4669 mm/día se ubica en la parte superior respecto a los valores los modelos E(52), E(55) y E(53).

Tabla 34. Prueba de significancia de Tukey (95%) para modelos del (STC-C)

Orden	Modelo	EPT (mm/día)	Tukey (95%)
1	6= E(56)	3.4735	a
2	4= E(54)	3.4735	a
3	7= E(VC)	3.4669	a
4	2= E(52)	3.4440	a
5	1= E(51)	3.2055	b
6	5= E(55)	3.1801	b
7	3= E(53)	3.1575	b

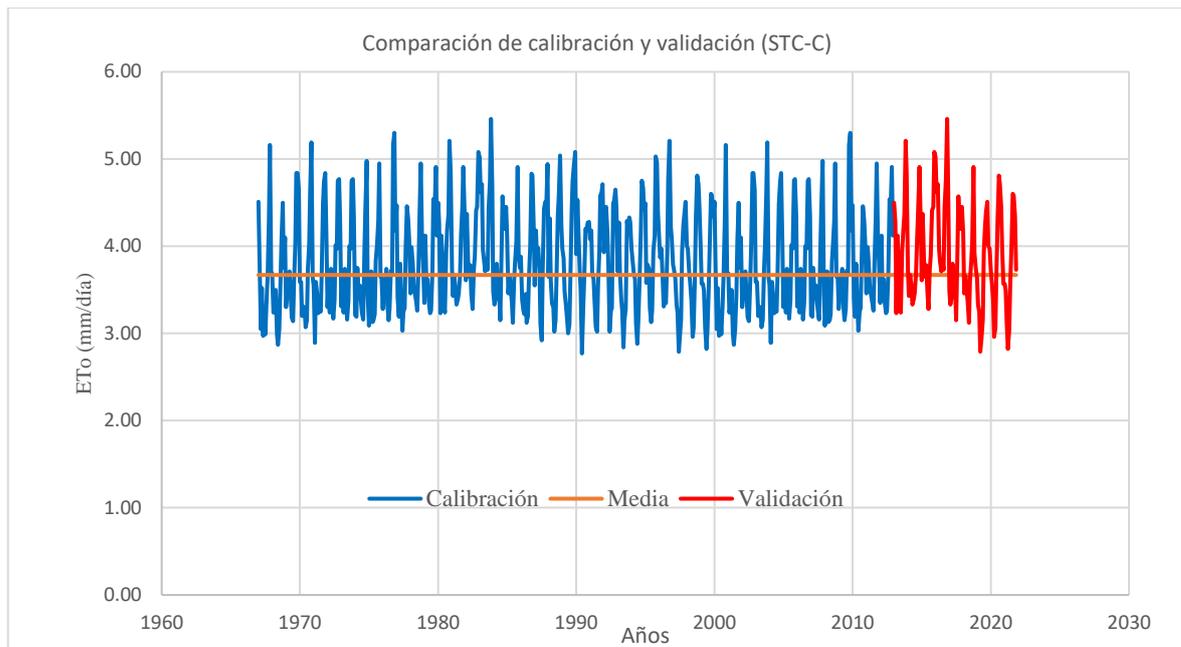


Figura 18. Grafico de comparativo entre calibración y validación de la zona (STC-C)

Que en el presente estudio consideramos que los modelos E(54) y E(52) son los más próximos al valor observado E(VC) por lo tanto son válidos para su aplicación en la región de subtipo climático “C” (STC-C) en la estación meteorológica de Laraqueri.

4.4. COMPARATIVO ENTRE CROPWAT, HARGREAVES Y MODELO DE PUNO

Para el análisis comparativo se ha efectuado el análisis de variancia con tres modelos de cropwat, Hargreaves-Samani y Modelo de Puno, donde existe alta significancia estadística de acuerdo a la probabilidad de $P \leq 0.01$, es decir los tres modelos han generado valores diferentes de ETo expresadas en mm/día

Teniendo estos resultados se ha aplicado la prueba de rango múltiple de Tukey .al 5% donde se obtuvo los valores de acuerdo a la tabla.

Tabla 35. Análisis de variancia para modelos de evapotranspiración potencia en el
(STC-A)

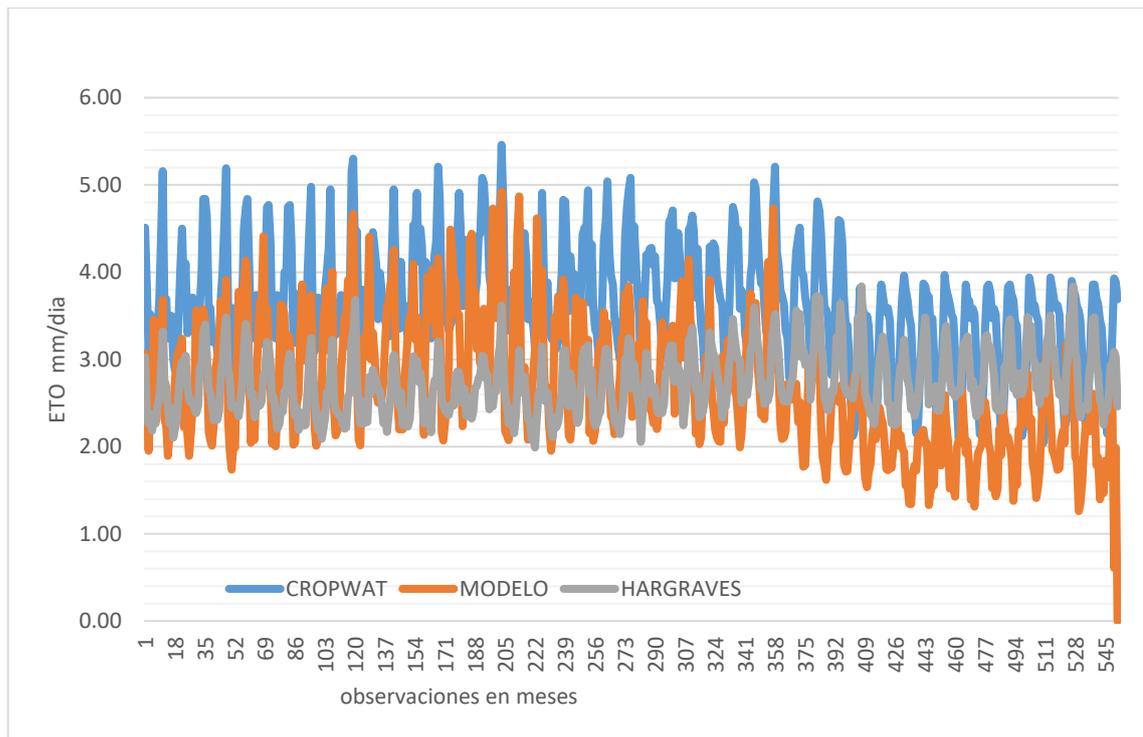
F. de V.	GL	SC	CM	Fc	Prob.
Modelos de (ETP)	2	317.10	158.557	419.40	0.000
Error	1653	624.90	0.378		
Total	1655	942.00			

El modelo de CROPWAT el valor promedio de 3.6397 mm/día de evapotranspiración potencial y ocupa el segundo lugar el modelo de Hargreaves-Samani con un valor de 2.7233 mm/día y ocupa el ultimo lugar el modelo obtenido para la estación meteorológica de Puno con un valor de 2.6999mm/día de evapotranspiración potencial.

Tabla 36. Prueba de significancia de Tukey (95%) para (STC-B) estación Ilave

Orden	Modelo	EPT (mm/día)	Tukey (95%)
1	CROPWAT	3.6397	a
2	HARGREAVES-SAMENI	2.7233	b
3	MODELO DEPUNO	2.6999	b

Los modelos Hargreaves-Samani y modelo obtenido para Puno E(35) estadísticamente de muestran similitud en cuanto respecta a valores de evapotranspiración potencial.



4.5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

La estimación de la evapotranspiración potencial (ETP) en la región de Puno, es importante para el uso del agua con aplicaciones agrícolas, ecológicas y otras actividades de planeación. La carencia de datos en estaciones meteorológicas (EM) de nuestro país conduce a la búsqueda de modelos sencillos y simples que permitan estimar la ETP con muy pocas variables climáticas. En el presente estudio se ha tomado en cuenta tres subtipos climáticos (STC-A), (STC-B) y (STC-C) del altiplano de la región de Puno, para lo cual se han utilizado datos históricos de las estaciones meteorológicas de Puno, Ilave, y Laraqueri, cuyas medias son: (STC-A)3.67, (STC-B)3.17 y (STC-C)3.78 mm/día respectivamente las cuales con equivalencia de 36.7, 31.7 y 37.8 m³/ha de evaporación.

La evapotranspiración (*ET*) es la transmisión de agua de la tierra a la atmósfera por procesos de evaporación de la superficie del suelo y transpiración de las plantas (Wang & Dickinson, 2012). La *ET* es un fenómeno complejo que controla el



intercambio de masa y energía en el sistema atmosférico global y se considera como una herramienta útil para el monitoreo del cambio de energía y transferencia de humedad del suelo a la atmósfera, pues es gobernado por diversas variables climáticas, como radiación, temperatura, velocidad del viento, humedad atmosférica y su efecto en la humedad del suelo, y el albedo (Chen, Liu, & Thomas, 2006; Kousari & Ahani, 2012). Dos conceptos relacionados con la *ET* son la evapotranspiración real o de referencia (ET_0), y la evapotranspiración potencial (ETP).

El modelo de regresión lineal múltiple E (33) tuvo un r^2 ajustado es 0.7308 y un r^2 predicho de 0.7323; es decir, tiene una capacidad predictiva de 73.23%. Este resultado sugiere que ETP es adecuado para la estimación de la evapotranspiración potencial en cualquier época del año, ya que las variables T , HR y V explican un 73.23% del comportamiento de la ETP , donde el aumento de un grado Celsius en temperatura incrementa 0.2516 mm/día de la ETP , con el incremento de 1% de humedad relativa disminuye -0.0400 de evapotranspiración potencia es decir a mayor porcentaje de HR disminuye el proceso de evapotranspiración de igual manera a mayor velocidad del viento a dos metros de altura se incrementa el proceso de evapotranspiración potencia y para el presente trabajo de acuerdo a los resultados a un incremento de 1m/s aumenta 0.7773 mm/día de ETP .

El modelo de regresión no lineal para (STC-A) se obtuvo $r^2 = 73.98\%$ y r^2 ajustado 73.83% que corresponde al modelo E (35) para la estación meteorológica de Puno que corresponde al subtipo climático A, la cual muestra una capacidad predictiva que cualquiera de otros modelos es el que mejor ajusta con respecto a otros modelos obtenidos, muestra una media de $ETP = 3.343859$ mm/día. Para la zona de subtipo climático (STC-B) que se realizó en base de la estación meteorológica de Ilave los modelos que ajustan mejor son E (39) con tres variables climática con variables de



temperatura media mensual, (T), humedad relativa (HR) y velocidad del viento (V); y el modelo E (40) con dos variables independientes como son temperatura media mensual (T) y humedad relativa (HR) con coeficiente de determinación de r^2 son 0.757185 y 0.745495 respectivamente; en consecuencia buscamos en el presente trabajo que para la predicción de ETP es cuando intervienen la menor cantidad de variables predictoras. Para la zona de subtipo climático (STC-C) que en base de la estación meteorológica de Laraqueri, de igual modo los modelos que ajustan mejor son E (45) con tres variables climática con variables de temperatura media mensual, (T), humedad relativa (HR) y velocidad del viento (V); y el modelo E (46) con dos variables independientes como son temperatura media mensual (T) y humedad relativa (HR) con coeficiente de determinación de r^2 son 0.655205 y 0.505301 respectivamente; en consecuencia buscamos en el presente trabajo que para la predicción de ETP es cuando intervienen la menor cantidad de variables predictoras y para esta estación meteorológica de Laraqueri se ajusta mejor el modelo no lineal E (47) donde interviene tres variables predictoras como la temperatura media mensual (T), humedad relativa (HR) y velocidad del viento (V); y el modelo E (40) con dos variables independientes como son temperatura media mensual (T) y humedad relativa (HR) con coeficiente de determinación de $r^2 = 0.622170$ y $r^2 = 0.439817$ ajustado; en consecuencia buscamos en el presente trabajo que para la predicción de ETP es cuando intervienen la menor cantidad de variables predictoras; los coeficientes indica que en un incremento de 1 °C de temperatura media mensual (T), producen el aumento de 0.254270 mm/día de ETP y de igual modo el incremento de 1 % de humedad relativa (HR) disminuye -0.232016 mm/ día de ETP y de igual modo ocurre con la variable de la velocidad de viento (V). Los coeficientes de determinación (r^2), valor de Fc ($P \leq 0.05$) de las variables independientes y el factor de inflación de la varianza (FIV) que se obtuvieron del análisis de varianza de las



regresiones se emplearon para comparar los modelos ETPg y ETPm. Por otra parte, el desempeño de estos modelos se obtuvo mediante índices estadísticos, como la raíz cuadrada de la media del error (RCME) y el error medio del sesgo (EMS), con las siguientes ecuaciones (Douglas, Jacobs, Summe, & Ray, 2009).

(Flores, Silva, & Flores, 2015) Los modelos empíricos de evapotranspiración potencial de series de Fourier propuestos para las tres regiones homogéneas, permiten estimar muy bien los valores de ETP obtenidos por el método del tanque clase A para las regiones homogéneas 1 y 3. En la región homogénea 2 existe poca eficiencia del modelo para estimar la ETP de tanque clase A debido a su cercanía al Lago. Según esto, el comportamiento de la ETP en esta zona no es suficientemente explicado con los factores geográficos y de rango de temperatura. Los modelos empíricos de ETP con series de Fourier probaron ser más eficientes en su desempeño para estimada ETP en las regiones homogéneas 1 y 3, que otros tipos de modelos matemáticos como los de Hargreaves and Samani (1985), García et al (2000) y Setruto (1993). En la región homogénea 2 se recomienda el uso del método de Hargreaves and Samani (1985). Los estimadores de máxima verosimilitud bajo un conjunto amplio de condiciones son consistentes y (para muestras grandes) asintóticamente eficientes.



V. CONCLUSIONES

Las tendencias de las series de datos históricos de los elementos climáticos como es la temperatura media mensual (T), humedad relativa (HR), velocidad del viento (V) y la Insolación media mensual (I), se ha utilizado el software tren para lo cual se ha planteado las hipótesis respectivos utilizando las pruebas paramétricas (regresión lineal) y no paramétricas (Mann-Kendall) considerando los niveles de significancia de 0.05 y 0.01 y se ha llegado a la conclusión de que no existe significancia estadística para ambos métodos y para las tres estaciones de Puno, Ilave y Laraqueri. Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alterna es decir que no hay una tendencia creciente y viceversa.

Para el proceso de Calibración de los diferentes modelos se ha considerado como variable dependiente la ETP y las variables predictoras como la temperatura media mensual (T), humedad relativa (HR), velocidad del viento (V) y la Insolación (I) los datos fueron obtenidos de las estaciones de Puno, Ilave y Laraqueri; los datos utilizados fueron de los años 1967 a 2012 a los datos se han efectuado las pruebas de bondad de ajuste y su respectivo análisis de consistencia. En el cuadro de la estadística descriptiva para la estación Puno (STC-A) se obtuvieron los modelos: E(39), E(40), E(41), E(42), E(43), y E(44) las cuales se ha comparado con el modelo E(VA) con valores promedio de ETP: 3.3369, 2.7517, 3.3111, 2.7660, 3.3180, 2.7784 y 3.2580 mm/día y para la validación estadística se ha efectuado el análisis de variancia se ha seleccionado el modelo con valores similares a modelo E(VA) a través de la prueba de rango múltiple de Tukey $P \leq 0,05$ se ha seleccionado el modelo E(43) y E(41). De igual modo para la estación de Ilave (STC-B) se obtuvieron los modelos: E(45), E(46), E(47), E(48), E(49), y E(50) las cuales se ha comparado con el modelo E(VB) con valores



promedio de ETP: 3.2932, 3.3012, 3.3152, 3.3389, 3.2963, 3.2970, y 3.2580 mm/día y para la validación estadística se ha efectuado el análisis de variancia se ha seleccionado el modelo donde generan valores similares al modelo E(VB) a través de la prueba de rango múltiple de Tukey $P \leq 0,05$ se ha seleccionado el modelo E(39) y E(43).

Para la estación Laraqueri (STC-C) se obtuvieron los modelos: E(51), E(52), E(53), E(54), E(55), y E(56) las cuales se ha comparado con el modelo E(VC) con valores promedio de ETP: 3.2055, 3.4440, 3.1575, 3.4735, 3.1801, 3.4735 y 3.4669 mm/día y para la validación estadística se ha efectuado el análisis de variancia se ha seleccionado el modelo donde generan valores similares al modelo E(VC) a través de la prueba de rango múltiple de Tukey $P \leq 0,05$ se ha seleccionado el modelo E(54) y E(52).



VI. RECOMENDACIONES

Recomendamos que, para la aplicación de los modelos obtenidos previamente debe realizar la calibración del modelo para su aplicación.

La utilización de los estimadores de máxima verosimilitud bajo un conjunto amplio de condiciones es consistente y se debe aplicar para muestras grandes asintóticamente eficientes y previamente los datos deben ser tratados como es análisis de consistencia y bondad de ajuste.

El modelo es una formula empírica la cual esta sujeto a la mejora permanente de parte de los especialistas con experiencia en el área hidrología y meteorología aplicadas.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. N°56 . Ed. FAO. Italia, Roma , 3.23 p.
- ANA. (2019). Estudio Hidrologico de la Unidad Hidrografica del rio ramis. Lima Peru: Ministerio de Agricultura y Riego (Autoridad Nacional del Agua).
- Aquise, J. E. (1987). Meteorologia Generla y Agricola. Puno Peru: Universidad nacional del Altiplano Facultad de Ciencias Agrarias.
- Balbontin-nesvara, C. A., Calera.Belmontes, J., Gonzales-Pequeras, I., Campos-Rodriguez, M., & Torres-Prieto, E. (2011). Comparación de los sistemas de covarianza y relación de Bowen en la evapotranspiración de un viñedo bajo clima semi-árido. *Agrociencia* 45, 87-103.
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill. 582 p. International Edition.
- Cuadrat, J., & Pita, M. (2004a). *Climatología*, p. 135. Madrid España: Cátedra.
- Doorembos, J., & Kassam, A. (1979). Efecto del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación Roma Italia.
- Douglas, E. M., Jacobs, J. M., Summe, D. M., & Ray, R. L. (2009). A comparison of models for estimating potential . *Journal of Hydrology*, 373(3-4), 366-376.
- Essam, M. (2007). *Water Flow and Chemical Transport in a Subsurface Drained Watershed*. University of Illinois, United States of América.
- FAO. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma Italia: Organización de las



- Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación FAO 56 Estudio de riego y drenaje.
- Flores, Q. E., Silva, D. C., & Flores, C. E. (2015). Modelacion de la Evapotranspiracion Potencial en el Altiplano de Puno. *Ciencia y Desarrollo*, 20. 83-90 / ISSN 23048891.
- Fuentes, Y. J. (1996). *Riego Tecnificado*. Madrid España: 2da. Ediciones Mundi Prensa. 470 p.
- Gabriel, J. (2017). El agua y las consecuencias que esta genera en la agricultura y el medio ambiente. *Journal of the Selva Andina Biosphere*. 5(1), 1-3.
- Galvez, A. P. (2017). *Caracterizacion de la sequias Historicas y Proyectadas Bajo Esenarios de Cambio Climatico en la Cuenca del Rio Mantaro*. Lima Peru: Universidad Nacional Agraria la Molina, Maestria en Recursos Hidricos.
- Gomez, S. H. (2016). *Impacto del Cambio climático en la demanda hídrica de las cuencas Chancay-Lambayeque y Lurín*. Lima Peru: Universidad Nacional Agraria la Molina tesis de Ingeniero Agricola.
- Gonzales, F., Herrera, J., Lopez, T., & Cid, G. (2011). Respuesta del sorgo al riego en dos épocas de siembra. Función agua rendimiento. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 20(1), 40-46.
- Holdridge, L. R. (1967). *Life zone ecology*. Rev. Edi.
- IKAUR. (2004). *Caracterización y cuantificación de las demanda de agua en la CAPV y estudio de prospectivas*. Pais vasco.
- INRENA. (2008). *Actualización del Balance Hídrico de la Cuenca del rio Ramis*. Ayaviri Melgar Puno: Ministerio de Agricultura Instituto Nacional de Recursos Naturales Intendencia de Recursos Hídricos Administración Técnica del Distrito de Riego Ramis .



- Llamas, J. (1993). Hidrología general. Principios y aplicaciones. Quebec, Canadá: Universidad del País Vasco.
- Lobo, L. (2004). Guía Metodológica para la Delimitación del Mapa de Zonas Áridas, Semiáridas y Subhúmedas Secas de América Latina y el Caribe. Centro del Agua para Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y El Caribe – CAZALAC – UNESCO PHI – Gobierno de Flandes. http://www.cazalac.org/mapa_alc_guia.php.
- Mejia, M. A. (2012). Hidrologia aplicada. Lima: Primera edición. Q & P Impresores S.R.L. Lima - Perú.
- Michel, T. (1997). Zonificación Agroclimática del Altiplano Paceño. La Paz, Bolivia.: Facultad de Agronomía, UMSA y Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología.
- Mijares, F. J. (1989). Fundamentos de hidrología de superficie. Limusa.
- MINAGRI y ANA. (2012). MINAGRI, & ANA. 2012. Plan nacional de recursos hídricos . Lima. Lima Peru: Ministerio de Agricultura y Riegos.
- Pourrut, P. (1995). El agua en el Ecuador. Clima, precipitaciones, escorrentías. Recuperado de http://horizon.documentation.ird.fr/exldoc/pleins_textes/pleins_textes_7/divers2/010014823.pdf, p. 11.
- Rodriguez, S. s., Artega, R. R., Navarro, B. A., Cervantes, O. R., & Sangerman, J. (2012). Evapotranspiración de referencia estimada con Fao-Penman-Monteith, Priestley-Taylor, Hargreaves y RNA. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas Vol.3 Núm.8 1 de noviembre - 31 de diciembre, 2012 , p. 1535-1549.
- Rosa, R. D., Paredes, G. C., Rodriguez, I., Alvares, R., Fernando, L. S., Pereira, L. S., & Allen, R. G. (2012). Implementing the dual crop coefficient approach in



- interactive software. 1 Background and computational strategy. . Agric. Water Manage. 103:, 8-24.
- Rosana del Carmen, H. (2001). Modelacion de la Evapotranspiracion con metodo de Balance de Agua. Cordova Argentina: Universidad Nacional de Litoral.
- Rose, C. (2004). An Introduction to the Environmental Physics of Soil, Water and Watersheds. University of Cambridge, United Kingdom.
- Sanchez. (2008a). Precipitaciones. Salamanca, España,: Recuperado de <http://hidrologia.usal.es/temas/Precipitaciones.pdf>.
- Sanchez, M. (2001). Métodos de estimación de evapotranspiración utilizados en Chile. Revista de Geografía Norte Grande.
- Santos, R. C., Lorite, T. I., Allen, R., Tasumi, M., & Gavilan, Z. P. (2007). Mejora de la gestión de los recursos hídricos por medio de la integración de técnicas de teledetección y modelos de simulación. Andalucía.
- Shimon, C. (2010). Water Resources. Island Press, United States of America.
- Unesco. (1981). Methods for Water Balance Computation. Instituto de Hidrología de España. España.
- Vasquez, V. A., Vasquez, R. I., Vasquez, C., & Cañamero, K. M. (2017). Fundamento de la Ingenieria de Riegos. Lima Peru: Universidad nacional Agraria La Molina.
- Villon, M. (2002). Hidrologia. Cartago Osta Rica: Segunda edición: Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Zhang, W., & Liu, Y. (2015). Insights into assessing environmental quality status using potential surrogates of biofilm-dwelling ciliate fauna in coastal waters. Environmental Science Pollution Research; 22: Doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3436-0>, 1389–1398.



ANEXOS

Tabla A 1 Modelo de regresión lineal múltiple estación meteorológica de Puno

Variables independientes		Coficiente	Error estándar	t-estadística	Prob.
Coficiente	C(1)	2.35537500	0.4017660	5.8625550	0.000000
Temperatura media	C(2)	0.22945000	0.0160830	14.2664200	0.000000
Humedad relativa	C(3)	-0.04672600	0.0030260	-15.4432500	0.000000
Velocidad del viento	C(4)	0.72146200	0.0312050	23.1202000	0.000000
Insolación	C(5)	-0.00912000	0.0025810	-3.5328330	0.000400
R-squared		0.738273000	Mean dependent var		3.343859
Adjusted R-squared		0.736359000	S.D. dependent var		0.951408
S.E. of regresión		0.488510000	Akaike info criterion		1.414102
Sum squared resid		130.53700000	Schwarz criterion		1.453170
Log likelihood		-385.29210000	Hannan-Quinn criter.		1.429370
OF-statistic		385.74080000	Durbin-Watson stat		0.582670

$$ETO = 2.355 + 0.229(T) - 0.0467(HR) + 0.7214(V) - 0.0012(I)$$

Donde:

ETo= evapotranspiración potencial (mm/día);

T= temperatura media en (°C)

HR= Humedad relativa en (%);

V= velocidad del viento en (m/s); y

I= Insolacion en (%).

Tabla A 2 Modelo de regresión lineal simple estación meteorológica de Puno

Variables independientes		Coficiente	Error estándar	t-estadística	Prob.
Coficiente	C(1)	2.421430	0.209220	11.57361	0.000000
Temperatura media	C(2)	0.103307	0.023003	4.490937	0.000000
R-squared		0.035373	Mean dependent var		3.343859
Adjusted R-squared		0.033619	S.D. dependent var		0.951408
S.E. of regression		0.935278	Akaike info criterion		2.707672
Sum squared resid		481.1102	Schwarz criterion		2.723300
Log likelihood		-745.3174	Hannan-Quinn criter.		2.713778
F-statistic		20.16851	Durbin-Watson stat		0.163423
Prob(F-statistic)		0.000009			

$$ETO = 2.4214 + 0.1033(T)$$

Donde:

ETo= evapotranspiración potencial (mm/día) y

T= temperatura media en (°C)

Tabla A 3 Modelo de regresión no lineal múltiple estación meteorológica de Puno

Variables independientes		Coficiente	Error estándar	t-estadística	Prob.
Coficiente	C(1)	5.566027	1.468116	3.791271	0.000200
Temperatura media	C(2)	0.604233	0.037111	16.28181	0.000000
Humedad relativa	C(3)	-0.587219	0.038130	-15.40034	0.000000
Velocidad del viento	C(4)	0.601448	0.023605	25.47936	0.000000
Insolacion	C(5)	-0.029802	0.032821	-0.908007	0.364300
R-squared		0.740241	Mean dependent var		3.343859
Adjusted R-squared		0.738342	S.D. dependent var		0.951408
S.E. of regression		0.486669	Akaike info criterion		1.406553
Sum squared resid		129.5553	Schwarz criterion		1.445625
Log likelihood		-383.2085	Hannan-Quinn criter.		1.421819
Durbin-Watson stat		0.536289			

$$ETP=5.57 \left[\frac{T^{0.60} V^{0.60}}{(HR)^{0.58} I^{0.03}} \right]$$

Donde:

ETo= evapotranspiración potencial (mm/día); T= temperatura media en (°C)

HR= Humedad relativa en (%); V= velocidad del viento en (m/s); y I= Insolacion en (%)

Tabla A 4 Modelo de regresión no lineal simple estación meteorológica de Puno

Variables independientes		Coficiente	Error estándar	t-estadística	Prob.
Coficiente	C(1)	1.870077	0.244943	7.634751	0.000000
Temperatura media	C(2)	0.267268	0.059536	4.489159	0.000000
R-squared		0.037180	Mean dependent var		3.343859
Adjusted R-squared		0.035429	S.D. dependent var		0.951408
S.E. of regression		0.934402	Akaike info criterion		2.705797
Sum squared resid		480.2090	Schwarz criterion		2.721426
Log likelihood		-744.7999	Hannan-Quinn criter.		2.711903
Durbin-Watson stat		0.163440			

$$ETP=1.87(T)^{0.27}$$

Donde: ETo= evapotranspiración potencial (mm/día) y T= temperatura media en (°C)

Tabla A 5 Modelo de regresión lineal múltiple estación meteorológica de Ilave

Variables independientes		Coficiente	Error estándar	t-estadística	Prob.
Coficiente	C(1)	-0.081027	0.176716	-0.458514	0.646800
Temperatura media	C(2)	0.287441	0.009428	30.48768	0.000000
Humedad relativa	C(3)	0.001989	0.001108	1.795589	0.073100
Velocidad del viento	C(4)	0.072987	0.016304	4.476569	0.000000
Insolacion	C(5)	0.006330	0.001340	4.723391	0.000000
R-squared		0.766701	Mean dependent var		3.033279
Adjusted R-squared		0.764995	S.D. dependent var		0.584676
S.E. of regression		0.283435	Akaike info criterion		0.325351
Sum squared resid		43.94354	Schwarz criterion		0.364423
Log likelihood		-84.79679	Hannan-Quinn criter.		0.340617
F-statistic		449.4070	Durbin-Watson stat		0.713094
Prob(F-statistic)		0.000000			



$$ETO = -0.081 + 0.287(T) + 0.0019(HR) + 0.0729(V) - 0.0063(I)$$

Donde:

ETo= evapotranspiración potencial (mm/día);

T= temperatura media en (°C)

HR= Humedad relativa en (%);

V= velocidad del viento en (m/s); y

I= Insolacion en (%)

Tabla A 6 Modelo de regresión lineal simple estación meteorológica de Ilave

Variables independientes		Coefficiente	Error estándar	t-estadística	Prob.
Coefficiente	C(1)	0.848769	0.055945	15.17160	0.000000
Temperatura media	C(2)	0.269034	0.006713	40.07414	0.000000
R-squared		0.744890	Mean dependent var		3.033279
Adjusted R-squared		0.744427	S.D. dependent var		0.584676
S.E. of regression		0.295579	Akaike info criterion		0.403852
Sum squared resid		48.05166	Schwarz criterion		0.419481
Log likelihood		-109.4632	Hannan-Quinn criter.		0.409959
F-statistic		1605.937	Durbin-Watson stat		0.838349
Prob(F-statistic)		0.000000			

$$ETO = 0.8487 + 0.269(T)$$

Donde: ETo= evapotranspiración potencial (mm/día); y

T= temperatura media en (°C)

Tabla A 7 Modelo de regresión no lineal múltiple estación meteorológica de Ilave

Variables independientes		Coefficiente	Error estándar	t-estadística	Prob.
Coefficiente	C(1)	0.313144	0.050383	6.215299	0.000000
Temperatura media	C(2)	0.746665	0.023484	31.79443	0.000000
Humedad relativa	C(3)	0.024876	0.016247	1.531154	0.126300
Velocidad del viento	C(4)	0.065917	0.016074	4.100782	0.000000
Insolacion	C(5)	0.128296	0.024029	5.339238	0.000000
R-squared		0.770017	Mean dependent var		3.033279
Adjusted R-squared		0.768335	S.D. dependent var		0.584676
S.E. of regression		0.281414	Akaike info criterion		0.311036
Sum squared resid		43.31899	Schwarz criterion		0.350108
Log likelihood		-80.84597	Hannan-Quinn criter.		0.326302
Durbin-Watson stat		0.716044			

$$ETP=0.3131T^{0.75}(HR)^{0.025}V^{0.065}I^{0.1283}$$

Donde:

ETo= evapotranspiración potencial (mm/día);

T= temperatura media en (°C)

HR= Humedad relativa en (%):

V= velocidad del viento en (m/s); y

I= Insolacion en (%).

Tabla A 8 Modelo de regresión no lineal simple estación meteorológica de Ilave

Variables independientes		Coefficiente	Error estándar	t-estadística	Prob.
Coefficiente	C(1)	0.705963	0.028885	24.44022	0.000000
Temperatura media	C(2)	0.698972	0.019006	36.77731	0.000000
R-squared		0.744793	Mean dependent var		3.033279
Adjusted R-squared		0.744329	S.D. dependent var		0.584676
S.E. of regression		0.295635	Akaike info criterion		0.404235
Sum squared resid		48.07007	Schwarz criterion		0.419864
Log likelihood		-109.5689	Hannan-Quinn criter.		0.410342
Durbin-Watson stat		0.845626			

$$ETP=0.7059(T)^{0.698}$$

Donde:ETo= evapotranspiración potencial (mm/día) y

T= temperatura media en (°C)

Tabla A 9 Modelo de regresión lineal múltiple estación meteorológica de Laraqueri

Variables independientes		Coefficiente	Error estándar	t-estadística	Prob.
Coefficiente	C(1)	2.477242	0.222454	11.13598	0.000000
Temperatura media	C(2)	0.181219	0.010257	17.66800	0.000000
Humedad relativa	C(3)	-0.022494	0.001510	-14.90006	0.000000
Velocidad del viento	C(4)	0.328865	0.021460	15.32463	0.000000
Insolacion	C(5)	0.002526	0.001739	1.452860	0.146800
R-squared		0.656530	Mean dependent var		3.767699
Adjusted R-squared		0.654018	S.D. dependent var		0.656433
S.E. of regression		0.386115	Akaike info criterion		0.943656
Sum squared resid		81.54958	Schwarz criterion		0.982728
Log likelihood		-255.4491	Hannan-Quinn criter.		0.958922
F-statistic		261.3926	Durbin-Watson stat		0.577993
Prob(F-statistic)		0.000000			

$$ETO = 2.477 + 0.1812(T) - 0.0225(HR) + 0.3288(V) - 0.0025(I)$$

Donde: ETo= evapotranspiración potencial (mm/día);

T= temperatura media en (°C)

HR= Humedad relativa en (%);

V= velocidad del viento en (m/s); y

I= Insolacion en (%)

Tabla A 10 Modelo de regresión lineal simple estación meteorológica de Laraqueri

Variables independientes		Coefficiente	Error estándar	t-estadística	Prob.
Coefficiente	C(1)	2.648545	0.084638	31.29258	0.000000
Temperatura media	C(2)	0.155310	0.011259	13.79405	0.000000
R-squared		0.257034	Mean dependent var		3.767699
Adjusted R-squared		0.255683	S.D. dependent var		0.656433
S.E. of regression		0.566330	Akaike info criterion		1.704338
Sum squared resid		176.4015	Schwarz criterion		1.719967
Log likelihood		-468.3972	Hannan-Quinn criter.		1.710444
F-statistic		190.2757	Durbin-Watson stat		0.560617
Prob(F-statistic)		0.000000			

$$ETO = 2.6485 + 0.1553(T)$$

Donde:ETo= evapotranspiración potencial (mm/día) y T= temperatura media en (°C)

Tabla A 11 Modelo de regresión no lineal múltiple de la estación meteorológica Laraqueri

Variables independientes		Coficiente	Error estándar	t-estadística	Prob.
Coficiente	C(1)	2.679833	0.412231	6.500797	0.000000
Temperatura media	C(2)	0.280152	0.016687	16.78830	0.000000
Humedad relativa	C(3)	-0.218335	0.014976	-14.57912	0.000000
Velocidad del viento	C(4)	0.290262	0.018458	15.72514	0.000000
Insolacion	C(5)	0.079412	0.025599	3.102205	0.002000
R-squared		0.628985	Mean dependent var		3.767699
Adjusted R-squared		0.626272	S.D. dependent var		0.656433
S.E. of regression		0.401300	Akaike info criterion		1.020800
Sum squared resid		88.08963	Schwarz criterion		1.059872
Log likelihood		-276.7408	Hannan-Quinn criter.		1.036066
Durbin-Watson stat		0.620409			

$$ETP=2.67 \left[\frac{T^{0.28} V^{0.60} I^{0.079}}{(HR)^{0.22}} \right]$$

Donde: ETo= evapotranspiración potencial (mm/día); T= temperatura media en (°C)

HR= Humedad relativa en (%): V= velocidad del viento en (m/s); y I= Insolacion en (%)

Tabla A 12 Modelo de regresión no lineal simple de la estación meteorológica Laraqueri

Variables independientes		Coficiente	Error estándar	t-estadística	Prob.
Coficiente	C(1)	2.311975	0.092255	25.06079	0.000000
Temperatura media	C(2)	0.252462	0.019914	12.67782	0.000000
R-squared		0.241431	Mean dependent var		3.767699
Adjusted R-squared		0.240052	S.D. dependent var		0.656433
S.E. of regression		0.572246	Akaike info criterion		1.725120
Sum squared resid		180.1059	Schwarz criterion		1.740749
Log likelihood		-474.1332	Hannan-Quinn criter.		1.731227
Durbin-Watson stat		0.556051			

$$ETP=2.3119(T)^{0.25}$$

Donde:ETo= evapotranspiración potencial (mm/día) y T= temperatura media en (°C)

Puno

MES	T (°C)	TMF(°F)	HR (%)	MF	CH	CE	Eto(mm/mes)	Nº dias	Eto (mm/día)
ENE	10.25	50.45	61	2.734	1.03667	1.0765	153.93	31	4.97
FEB	10.10	50.18	62	2.339	1.02329	1.0765	129.29	28	4.62
MAR	9.90	49.82	62	2.317	1.02329	1.0765	127.16	31	4.10
ABR	9.25	48.65	54	1.914	1.12587	1.0765	112.86	30	3.76



MAY	7.65	45.77	45	1.666	1.23109	1.0765	101.06	31	3.26
JUN	6.45	43.61	42	1.464	1.26422	1.0765	86.89	30	2.90
JUL	6.20	43.16	42	1.576	1.26422	1.0765	92.57	31	2.99
AGO	11.85	53.33	44	1.830	1.24223	1.0765	130.51	31	4.21
SET	12.20	53.96	45	2.117	1.23109	1.0765	151.39	30	5.05
OCT	12.40	54.32	46	2.500	1.21985	1.0765	178.33	31	5.75
NOV	12.40	54.32	48	2.610	1.19704	1.0765	182.69	30	6.09
DIC	11.55	52.79	53	2.769	1.13804	1.0765	179.08	31	5.78

Juli

MES	T (°C)	TMF(°F)	HR (%)	MF	CH	CE	Eto(mm/mes)	N° dias	Eto (mm/dia)
ENE	9.30	48.74	61	2.734	1.0367	1.0765	148.7094	31	4.7971
FEB	9.30	48.74	62	2.339	1.0233	1.0765	125.5827	28	4.4851
MAR	9.25	48.65	62	2.317	1.0233	1.0765	124.1717	31	4.0055
ABR	8.65	47.57	54	1.914	1.1259	1.0765	110.3510	30	3.6784
MAY	7.20	44.96	45	1.666	1.2311	1.0765	99.2670	31	3.2022
JUN	6.00	42.80	42	1.464	1.2642	1.0765	85.2749	30	2.8425
JUL	5.70	42.26	42	1.576	1.2642	1.0765	90.6404	31	2.9239
AGO	6.55	43.79	44	1.830	1.2422	1.0765	107.1623	31	3.4568
SET	7.80	46.04	45	2.117	1.2311	1.0765	129.1694	30	4.3056
OCT	8.80	47.84	46	2.500	1.2198	1.0765	157.0544	31	5.0663
NOV	9.45	49.01	48	2.610	1.1970	1.0765	164.8348	30	5.4945
DIC	9.70	49.46	53	2.769	1.1380	1.0765	167.7831	31	5.4124

Ilave

MES	T (°C)	TMF(°F)	HR (%)	MF	CH	CE	Eto(mm/mes)	N° dias	Eto (mm/dia)
ENE	9.70	49.46	67	2.734	0.9536	1.0765	138.8135	31	4.4779
FEB	9.60	49.28	67	2.339	0.9536	1.0765	118.3260	28	4.2259



MAR	9.50	49.10	67	2.317	0.9536	1.0765	116.7849	31	3.7673
ABR	8.90	48.02	59	1.914	1.0629	1.0765	105.1667	30	3.5056
MAY	7.05	44.69	48	1.666	1.1970	1.0765	95.9421	31	3.0949
JUN	5.55	41.99	47	1.464	1.2085	1.0765	79.9737	30	2.6658
JUL	5.15	41.27	47	1.576	1.2085	1.0765	84.6157	31	2.7295
AGO	6.25	43.25	48	1.830	1.1970	1.0765	101.9908	31	3.2900
SET	7.75	45.95	49	2.117	1.1855	1.0765	124.1405	30	4.1380
OCT	9.05	48.29	48	2.500	1.1970	1.0765	155.5683	31	5.0183
NOV	9.75	49.55	49	2.610	1.1855	1.0765	165.0408	30	5.5014
DIC	10.00	50.00	57	2.769	1.0885	1.0765	162.2368	31	5.2334

Laraqueri

MES	T (°C)	TMF(°F)	HR (%)	MF	CH	CE	Eto(mm/mes)	N° dias	Eto (mm/dia)
ENE	8.25	46.85	64	2.734	0.9960	1.0765	137.34	31	4.43
FEB	8.20	46.76	63	2.339	1.0097	1.0765	118.89	28	4.25
MAR	8.05	46.49	64	2.317	0.9960	1.0765	115.49	31	3.73
ABR	7.65	45.77	56	1.914	1.1011	1.0765	103.84	30	3.46
MAY	5.95	42.71	49	1.666	1.1855	1.0765	90.81	31	2.93
JUN	4.15	39.47	47	1.464	1.2085	1.0765	75.17	30	2.51
JUL	3.85	38.93	46	1.576	1.2198	1.0765	80.57	31	2.60
AGO	5.55	41.99	48	1.830	1.1970	1.0765	99.02	31	3.19
SET	6.75	44.15	49	2.117	1.1855	1.0765	119.28	30	3.98
OCT	8.10	46.58	46	2.500	1.2198	1.0765	152.92	31	4.93
NOV	9.35	48.83	49	2.610	1.1855	1.0765	162.64	30	5.42
DIC	9.05	48.29	55	2.769	1.1136	1.0765	160.29	31	5.17

Puno

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	total



1963	157	101	136	85	2	0	1	4	25	28	50	80	669
1964	102	95	113	54	12	0	0	7	22	8	50	48	511
1965	120	175	62	30	1	0	1	7	32	20	48	128	624
1966	32	80	145	13	40	0	1	1	1	43	61	28	445
1967	73	112	215	13	13	0	17	28	61	44	4	121	701
1968	108	125	111	73	10	12	4	3	16	56	63	50	631
1969	158	95	78	34	0	0	3	1	5	26	53	51	504
1970	140	54	192	33	8	0	0	1	10	18	15	90	561
1971	108	253	44	25	0	3	0	9	1	19	93	87	642
1972	227	132	164	37	7	0	0	0	37	32	47	126	809
1973	245	132	159	94	17	0	2	6	32	16	30	71	804
1974	253	206	56	58	0	2	0	49	37	13	27	47	748
1975	150	180	164	38	44	1	0	7	49	53	25	203	914
1976	227	155	169	26	10	0	1	17	44	9	12	94	764
1977	75	206	210	6	9	0	2	0	48	54	50	106	766
1978	228	95	136	28	0	0	3	0	17	24	143	156	830
1979	131	31	147	44	1	0	1	2	9	46	31	85	528
1980	61	57	258	19	1	0	5	13	66	72	26	34	612
1981	134	207	111	69	5	0	0	38	21	26	49	124	784
1982	234	86	100	71	6	1	6	0	53	114	101	25	797
1983	21	70	55	58	14	2	1	5	46	27	24	110	433
1984	317	320	235	44	11	12	4	26	0	134	97	90	1290
1985	125	341	114	108	25	27	0	8	40	29	127	125	1069
1986	152	243	232	103	3	0	5	8	42	4	9	132	933
1987	224	67	78	44	2	4	12	0	4	58	111	25	629
1988	203	85	215	86	23	0	0	0	20	57	59	99	847
1989	193	141	136	102	0	0	2	15	18	14	21	32	674
1990	178	22	60	43	12	55	0	12	10	106	96	62	656
1991	125	68	186	46	7	34	0	3	15	20	44	41	589
1992	75	88	18	39	0	0	2	42	0	34	29	55	382
1993	175	101	107	53	7	1	0	38	18	69	79	111	759
1994	181	183	104	125	30	0	0	0	18	37	53	73	804
1995	123	87	139	2	4	0	0	3	22	15	46	85	526
1996	219	158	68	76	0	0	3	13	1	10	70	137	755
1997	232	206	113	89	1	0	0	22	108	30	63	45	909
1998	196	113	129	34	0	5	0	4	5	27	44	56	613



1999	193	244	202	86	8	0	0	2	16	150	30	70	1001
2000	160	217	105	40	0	2	4	18	15	96	14	69	740
2001	250	201	238	70	12	2	0	13	27	62	62	81	1018
2002	128	178	160	120	15	21	23	31	12	66	44	139	937
2003	168	114	117	50	37	5	0	10	43	25	9	132	710
2004	209	125	116	29	6	0	10	43	34	6	47	59	684
2005	103	158	119	61	0	0	0	0	12	40	81	99	673
2006	291	62	150	51	3	1	0	1	21	37	52	100	769
2007	82	174	235	51	14	0	3	2	61	77	44	69	812
2008	215	86	95	8	7	1	0	1	2	79	27	132	653
2009	166	130	154	83	0	0	2	0	16	56	89	63	759
2010	97	195	55	10	20	0	0	5	5	33	15	147	582
2011	101	224	116	48	5	0	6	0	46	26	49	140	761
2012	146	286	219	60	0	0	0	6	10	8	69	156	960
2013	151	170	108	14	22	12	1	4	12	33	61	117	705
2014	128	126	61	41	0	0	0	24	72	45	30	90	617
2015	96	121	173	128	0	0	2	4	54	41	23	59	701
2016	75	199	18	57	0	2	3	0	0	76	43	45	518
2017	319	119	146	46	22	0	3	0	62	65	24	68	874
2018	172	138	128	33	19	3	0	2	16	38	42	84	675
TOTAL	8952	8137	7474	2988	515	208	133	558	1489	2451	2805	4951	40661
PROMEDIO	160	145	133	53	9	4	2	10	27	44	50	88	726

Juli

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	total
1970	204	150	200	45	8	0	3	0	31	34	24	176	875
1971	167	340	78	75	4	2	0	12	0	30	89	141	938
1972	292	221	163	24	0	3	4	2	27	13	50	149	948
1973	256	205	146	107	15	0	8	17	45	45	31	66	941
1974	272	350	62	199	3	4	0	101	22	33	29	33	1108
1975	189	268	157	17	56	10	0	10	36	96	36	262	1137
1976	338	213	136	21	44	1	2	44	63	10	6	51	929
1977	92	273	225	5	0	0	15	0	58	66	163	107	1004
1978	259	99	117	20	0	0	4	9	23	1	82	150	764
1979	195	111	232	88	2	0	14	2	4	47	112	134	941



1980	190	90	244	14	2	0	13	33	102	49	26	88	851
1981	236	304	219	111	5	0	1	10	48	42	81	162	1219
1982	309	111	144	63	0	0	2	8	63	82	58	80	920
1983	93	90	100	47	8	3	4	9	38	10	33	198	633
1984	503	274	210	65	35	13	0	3	2	60	103	91	1359
1985	124	298	147	128	35	31	0	10	101	9	158	157	1198
1986	123	267	179	105	6	0	4	37	15	30	34	140	940
1987	296	70	83	37	6	9	19	1	19	64	155	44	803
1988	294	76	239	135	9	0	1	0	23	59	25	98	959
1989	151	177	195	111	16	1	9	17	18	4	40	45	784
1990	205	50	48	51	14	48	0	19	20	68	65	174	762
1991	147	92	163	71	10	32	4	1	12	50	31	59	672
1992	175	128	43	33	0	1	4	41	0	24	73	61	583
1993	220	88	186	30	9	3	0	35	21	73	122	68	855
1994	183	152	110	58	12	0	2	0	8	14	69	165	773
1995	129	97	143	20	6	0	1	7	18	27	72	117	637
1996	186	136	138	32	19	0	9	38	4	27	66	113	768
1997	264	212	171	66	11	0	0	64	80	36	79	54	1037
1998	132	77	144	69	0	13	0	0	12	78	63	57	645
1999	150	285	302	68	30	2	3	2	58	##	19	94	1143
2000	254	257	138	18	11	14	1	17	1	62	2	112	887
2001	324	242	256	57	8	2	13	31	19	61	20	116	1149
2002	135	225	239	138	9	15	44	11	4	39	37	106	1002
2003	228	133	297	59	23	0	6	13	43	25	22	93	942
2004	322	116	68	55	12	2	34	50	25	11	25	127	847
2005	134	181	85	36	1	0	0	1	25	61	54	164	742
2006	346	197	169	50	4	37	0	2	14	43	113	90	1065
2007	82	136	236	95	13	1	8	5	30	44	30	155	835
2008	298	109	89	44	1	3	1	0	1	52	16	171	785
2009	163	206	180	77	0	0	7	0	54	34	126	128	975
2010	217	235	109	12	55	0	0	1	13	63	13	117	835
2011	249	305	194	69	6	0	12	4	56	22	72	262	1251
2012	246	334	244	81	0	1	1	2	5	17	34	240	1205
2013	165	205	128	9	37	40	9	10	2	73	59	165	902
2014	259	123	67	40	6	0	2	26	83	45	47	88	786
2015	263	171	214	169	0	0	17	16	35	29	21	73	1008
2016	95	271	7	33	2	1	8	3	35	53	50	124	682



2017	326	194	152	33	35	0	8	0	54	26	57	126	1011
2018	258	240	175	32	5	0	12	19	10	50	57	103	961
TOTAL	####	9184	7771	3022	593	292	309	743	1480	###	2849	5894	44996
PROMEDIO	219	187	159	62	12	6	6	15	30	43	58	120	918

Ilave

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	total
1963	154	116	144	55	2	3	4	3	24	18	12	62	597
1964	59	49	57	36	16	0	0	8	39	13	75	36	388
1965	11	22	16	6	1	0	0	0	26	20	10	98	210
1966	56	87	23	21	52	0	0	0	2	31	9	99	380
1967	110	132	108	13	13	0	13	9	40	37	15	113	603
1968	100	172	140	36	31	20	4	1	16	26	139	53	738
1969	232	113	90	41	0	0	9	1	5	15	21	40	567
1970	128	154	177	58	17	2	4	0	51	25	25	122	763
1971	111	221	45	47	2	10	0	20	0	18	64	112	650
1972	234	120	86	22	0	0	6	5	28	16	29	122	668
1973	268	144	168	83	12	0	10	20	38	29	23	47	842
1974	212	285	57	52	0	4	0	107	10	35	15	66	843
1975	162	191	103	25	37	27	0	10	41	62	9	199	866
1976	238	150	101	25	12	3	1	47	68	4	6	78	733
1977	87	156	231	5	1	0	16	3	58	39	105	71	772
1978	216	123	82	23	0	0	5	11	29	8	124	116	737
1979	184	76	99	23	3	0	1	1	8	37	30	117	579
1980	41	58	204	32	2	0	12	4	55	61	21	107	597
1981	150	176	91	44	8	0	0	26	18	12	76	118	719
1982	200	87	70	39	19	4	8	0	37	80	93	43	680
1983	41	96	60	33	12	5	3	3	26	16	20	113	428
1984	279	287	180	29	11	15	3	13	1	80	88	46	1032
1985	138	284	126	95	29	23	0	4	72	48	198	173	1190
1986	160	265	200	108	9	0	3	4	20	24	45	134	972
1987	228	80	70	30	1	7	19	5	20	46	89	18	613
1988	154	58	168	103	14	0	2	0	20	36	9	71	635
1989	207	121	137	96	0	4	8	10	31	14	18	48	694
1990	155	38	60	49	25	68	0	15	7	66	98	131	712
1991	74	75	115	51	20	43	6	4	14	43	20	63	528
1992	152	89	30	8	0	1	1	56	2	39	58	45	481
1993	192	37	125	62	4	1	0	45	20	24	65	94	669
1994	128	128	101	58	15	0	0	0	5	11	39	117	602



1995	112	74	144	15	6	0	0	4	10	11	48	112	536
1996	230	158	34	32	2	0	7	30	12	9	78	92	684
1997	288	169	147	61	1	0	0	62	96	27	92	50	993
1998	98	112	52	63	0	13	0	0	5	41	45	43	472
1999	101	158	222	84	23	1	2	4	21	123	18	61	818
2000	258	170	140	14	5	4	9	6	3	52	1	101	763
2001	304	221	177	44	2	0	15	24	12	54	38	107	998
2002	103	244	223	166	21	19	45	14	12	70	81	104	1102
2003	161	83	153	41	24	1	0	10	52	14	18	88	645
2004	286	134	53	16	14	2	22	38	16	2	22	63	668
2005	126	143	78	25	8	0	0	0	26	59	56	88	609
2006	332	82	113	58	1	5	0	9	28	26	100	81	835
2007	93	62	206	72	2	2	8	5	41	27	30	86	634
2008	244	97	69	17	2	1	7	3	1	54	1	144	640
2009	108	122	87	56	1	0	8	0	40	35	158	57	672
2010	186	144	64	24	55	0	0	0	10	39	8	0	530
2011	136	165	151	7	4	0	11	0	23	23	16	118	654
2012	126	243	185	44	0	1	0	4	13	7	21	278	922
2013	142	158	39	4	43	18	7	7	2	46	19	173	658
2014	188	101	36	19	0	0	3	19	121	31	20	101	639
2015	129	135	165	92	12	0	6	9	34	32	13	70	697
2016	71	200	110	55	1	4	3	0	2	43	15	101	605
2017	231	119	113	33	58	1	22	0	44	24	31	85	761
2018	124	136	141	45	7	3	1	4	10	25	28	87	611
TOTAL	9038	7620	6366	2495	660	315	314	687	1465	1907	2605	5162	38634
PROMEDIO	161	136	114	45	12	6	6	12	26	34	47	92	690

Laraqueri

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	total
1970	176	119	139	38	26	0	0	0	0	10	19	176	703
1971	142	253	52	25	2	1	0	3	0	4	56	130	668
1972	230	198	112	16	4	0	0	0	30	50	51	166	857
1973	198	126	130	47	19	0	5	12	56	11	27	79	710
1974	277	250	91	61	0	1	0	57	20	12	17	75	861
1975	153	258	112	23	32	3	0	8	22	62	43	249	965
1976	360	144	218	41	18	0	28	30	64	15	0	75	993



1977	76	191	148	7	5	0	0	0	21	56	88	121	713
1978	208	154	102	43	0	0	19	2	15	8	158	109	818
1979	190	100	141	22	0	1	9	2	5	30	53	57	610
1980	78	74	236	11	0	0	4	16	40	87	30	125	701
1981	242	279	125	54	2	0	0	30	32	18	22	147	951
1982	172	89	92	27	0	0	0	4	42	65	82	24	597
1983	89	87	19	8	1	2	0	3	17	15	16	105	362
1984	305	248	249	39	19	34	0	18	2	66	157	118	1255
1985	135	185	112	141	22	16	0	0	44	8	149	192	1004
1986	156	288	249	101	8	0	0	9	12	2	44	150	1019
1987	282	77	74	26	0	0	37	6	9	24	57	28	620
1988	200	45	171	139	10	2	0	0	6	45	13	99	730
1989	221	132	132	80	4	5	2	5	5	0	26	45	657
1990	136	37	69	23	6	65	0	16	9	93	147	130	731
1991	130	131	148	28	3	44	0	1	22	29	28	66	630
1992	121	100	51	48	0	4	16	32	0	62	49	87	570
1993	222	66	133	62	14	1	0	35	18	123	127	177	978
1994	207	197	147	112	15	1	1	0	6	9	74	140	909
1995	140	203	152	12	0	0	0	0	11	3	59	171	751
1996	277	127	94	53	20	0	0	52	12	5	96	97	833
1997	188	239	115	29	1	0	0	22	95	23	122	50	884
1998	93	94	89	31	0	10	0	0	0	28	44	25	414
1999	133	171	241	74	19	0	0	12	7	92	1	71	821
2000	250	237	126	12	5	1	0	10	7	67	7	140	862
2001	368	241	160	78	13	0	4	5	12	25	44	68	1018
2002	63	215	169	75	24	5	26	15	11	44	68	63	778
2003	176	122	122	31	13	0	0	6	19	6	24	126	645
2004	230	146	72	22	0	2	12	44	6	0	14	61	609
2005	115	280	79	43	0	0	0	0	19	39	38	128	741
2006	241	96	82	33	13	3	0	13	34	19	53	69	656
2007	109	97	161	56	5	0	0	0	46	58	71	102	705
2008	200	105	74	0	0	0	0	5	2	36	15	131	568
2009	89	171	110	67	0	0	5	0	11	15	86	102	656
2010	155	196	43	35	25	0	0	3	3	34	4	145	643
2011	150	244	121	49	3	0	5	0	10	36	47	193	858
2012	213	284	160	98	1	0	1	9	16	18	69	230	1099
2013	246	161	82	24	6	27	19	18	1	18	72	191	865
2014	181	93	52	32	1	0	3	23	63	61	36	77	622
2015	160	93	144	128	4	0	7	8	15	45	56	52	712
2016	89	194	65	88	4	8	2	0	13	50	11	52	576
2017	283	169	122	37	11	0	11	0	32	55	14	84	818
2018	141	213	76	51	5	0	2	23	14	34	23	93	675
TOTAL	8996	8019	5963	2380	383	236	218	557	956	1715	2607	5391	####
PROMEDIO	184	164	122	49	8	5	4	11	20	35	53	110	764



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

Por el presente documento, Yo FABIOLA ALEXANDRA HUAMAN CARDASCO,
identificado con DNI 76062978 en mi condición de egresado de:

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

INGENIERIA AGRICOLA

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

" DETERMINACIÓN DE LOS MODELOS DE EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL
EMPIRICA EN FUNCION DE LOS PARAMETROS CLIMATICOS EN
LOS PISOS ECOLOGICOS AIBYC EN LA CUENCA DEL RIO DE LLAVE - PUNO "

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

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

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

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

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

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

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

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 09 de octubre del 2023


FIRMA (obligatoria)



Huella



DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo FABIDA ALEXANDRA HUAMAN CARRASCO,
identificado con DNI 76062938 en mi condición de egresado de:

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

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

“ DETERMINACION DE LOS MODELOS DE EVAPOTRANSPIRACION
POTENCIAL EMPIRICA EN FUNCIÓN DE LOS PARÁMETROS CLIMÁTICOS EN
LOS PISOS ECOLÓGICOS A, B Y C EN LA CENCA DEL RIO LLAVE - PUNO ”

Es un tema original.

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

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

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

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

Puno 09 de octubre del 2023


FIRMA (obligatoria)



Huella