



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LA
EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA MEDIANTE
MODELOS DE MÁXIMA VEROSIMILITUD EN LA CUENCA DEL
RIO RAMIS**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. VICTOR HUGO RODRIGUEZ ALVARADO

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

PUNO – PERÚ

2021



DEDICATORIA

Mi especial gratitud a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de la carrera de mi vida por ser mi fortaleza en momentos de debilidad.

A mis amados padres Ruperto Artemio Rodríguez Mamani y Aurora Alvarado Acero por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad, quienes a lo largo de mi vida me dieron siempre el respaldo moral y motivación constantemente para alcanzar mis anhelos.

A mis hermanos Nery Nancy, William Wilder, a mi adorado hijo Liam Deymar y a la persona que amo Celia, quienes estuvieron a mi lado en todo momento brindándome su apoyo incondicional.

Victor Hugo Rodríguez Alvarado



AGRADECIMIENTOS

A mi alma mater, la Universidad Nacional del Altiplano, Facultad de Ingeniería Agrícola, Escuela Profesional de Ingeniería Ingeniería Agrícola.

A los docentes de la Facultad de Ingeniería Agrícola, por sus sabias enseñanzas impartidas en mi formación profesional.

Al Dr. Eduardo Flores Condori por su asesoramiento en el presente trabajo de investigación.

Termino agradeciendo eternamente, los sacrificios que hicieron mis progenitores Ruperto y Aurora para la formación profesional de sus hijos.

Víctor Hugo Rodríguez Alvarado



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

RESUMEN 13

ABSTRACT..... 14

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. JUSTIFICACIÓN 15

1.2. USO DE LOS RESULTADOS Y CONTRIBUCIONES DEL PROYECTO 15

1.3. IMPACTOS ESPERADOS 16

1.4. HIPÓTESIS DEL TRABAJO 18

1.5. OBJETIVO GENERAL 18

1.6. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 18

CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES 19

2.2. EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL (ETP)..... 22

2.3. EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL O ACTUAL (ETA)..... 22

2.4. COEFICIENTE DE CULTIVO (KC)..... 24

2.5. CEDULA DE CULTIVO DE UN PROYECTO..... 25

2.6. BALANCE DEMANDA – DISPONIBILIDAD..... 25

2.7. NECESIDAD DE AGUA DE LOS CULTIVOS 26



2.8. MODELO DEL SISTEMA HIDROLÓGICO	28
2.9. MODELO DETERMINISTICO	29
2.10.MODELO ESTOCÁSTICO.....	29

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO	30
3.2. MATERIALES.....	31
3.3. RECURSOS MATERIALES	32
3.4. RECURSOS HUMANOS	33
3.5. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.....	33
3.6. CALIBRACIÓN.....	36
3.7. VALIDACIÓN.....	36

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RELACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE CULTIVO DE REFERENCIA Y LOS FACTORES Y ELEMENTOS CLIMÁTICOS EN LAS DIFERENTES SUBCUENCAS DEL RIO RAMIS.	37
4.1.1. Análisis de los elementos meteorológicos en la estación Ananea.....	37
4.1.2. Determinación de la Eto en la estación Ananea	41
4.1.3. Calibración del modelo en la estación Ananea.....	42
4.1.4. Validación en la estación Ananea.....	52
4.1.5. Análisis de los elementos meteorológicos en la estación Chuquibambilla ..	52
4.1.6. Determinación de la Eto en la estación Chuquibambilla.....	56
4.1.7. Calibración en la estación Chuquibambilla.....	57
4.1.8. Validación en la estación Chuquibambilla.....	60
4.1.9. Análisis de los elementos meteorológicos en la estación Taraco.....	60
4.1.10.Determinación de la Eto en la estación Taraco	64



4.1.11. Calibración del modelo en la estación Taraco.....	65
4.1.12. Validación del modelo en la estación Taraco.....	67
4.2. EVALUACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO A FIN DE DETERMINAR LA OFERTA Y DEMANDA DE AGUA PARA LOS CULTIVOS PRINCIPALES EN LAS SUBCUENCAS DEL RIO RAMIS.....	68
4.2.1. Evaluación del balance hídrico para los cultivos principales en las subcuencas del río Ramis	68
V. CONCLUSIONES	82
VI. RECOMENDACIONES	84
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85
ANEXOS.....	90

Área: Recursos hídricos

Línea: Modelización hidrológica

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 19 de agosto 2021.



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:	Estaciones meteorológicas dentro de la cuenca Ramis e información disponible.....	31
Tabla 2:	Estaciones utilizadas por su disponibilidad de datos	32
Tabla 3:	Período de calibración en cada estación meteorológica	36
Tabla 4:	Período de validación en cada estación meteorológica.....	36
Tabla 5:	Parámetros obtenidos por mínimos cuadrados ordinarios	42
Tabla 6:	Resultado de prueba de normalidad para variables en estación Ananea	46
Tabla 7:	Transformaciones mejores obtenidas para las variables no normales	49
Tabla 8:	Resultados de regresión por mínimos cuadrados ordinarios para la estación Ananea con datos transformados	50
Tabla 9:	Parámetros por máxima verosimilitud para la estación Ananea	51
Tabla 10:	Resultados de regresión por mínimos cuadrados ordinarios para la estación Chuquibambilla.....	58
Tabla 11:	Estimación por máxima verosimilitud en la estación Chuquibambilla	59
Tabla 12:	Calibración del modelo en la estación Taraco por mínimos cuadrados ordinarios	65
Tabla 13:	Estimación de parámetros por máxima verosimilitud estación Taraco	66
Tabla 14:	ETo en la estación Ananea para los promedios	68
Tabla 15:	Precipitación efectiva diaria (mm) estación Ananea.....	69
Tabla 16:	Requerimiento de agua por cada 10 días de la alfalfa en Ananea	70
Tabla 17:	Requerimiento de agua por cada 10 días de la cebada en Ananea.....	72
Tabla 18:	Requerimiento de agua por cada 10 días de la papa en Ananea	73
Tabla 19:	Requerimiento de agua por cada 10 días del trigo en Ananea.....	74
Tabla 20:	Eto para valores promedio en la estación Chuquibambilla.....	75



Tabla 21.	Precipitación efectiva diaria (mm) estación Chuquibambilla	76
Tabla 22.	Requerimiento de agua por cada 10 días de la alfalfa en Chuquibambilla ..	77
Tabla 23.	Requerimiento de agua por cada 10 días de la cebada en Chuquibambilla .	79
Tabla 24.	Requerimiento de agua por cada 10 días de la papa en Chuquibambilla.....	80
Tabla 25.	Requerimiento de agua por cada 10 días del trigo en Chuquibambilla	81



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Temperatura media de las mínimas en la estación Ananea	37
Figura 2:	Temperatura media de las máximas en la estación Ananea	38
Figura 3:	Humedad relativa media en la estación Ananea	39
Figura 4:	Velocidad media del viento en la estación Ananea	40
Figura 5:	Horas de sol media diaria en la estación Ananea	40
Figura 6:	Evapotranspiración de referencia en la estación Ananea	41
Figura 7:	Prueba de normalidad de la temperatura media de las mínimas de estación Ananea.....	43
Figura 8:	Prueba de normalidad de la temperatura media de las máximas de estación Ananea.....	44
Figura 9:	Prueba de normalidad de la humedad relativa media de estación Ananea.....	44
Figura 10:	Prueba de normalidad de la velocidad media del viento de estación Ananea.....	45
Figura 11:	Prueba de normalidad de las horas de insolación de estación Ananea.....	45
Figura 12:	Prueba de normalidad de la evapotranspiración de referencia de estación Ananea.....	46
Figura 13:	Transformación Box-Cox de la velocidad media del viento	47
Figura 14:	Prueba de normalidad de la velocidad media del viento transformada.	48
Figura 15:	Transformación box-cox de las horas de insolación.	48
Figura 16:	Prueba de normalidad de las horas de insolación transformadas	49
Figura 17:	Validación del modelo en Ananea.....	52
Figura 18:	Temperatura media de las mínimas de la estación Chuquibambilla	53
Figura 19:	Temperatura media de las máximas de la estación Chuquibambilla.....	53
Figura 20:	Humedad relativa media de la estación Chuquibambilla	54



Figura 21:	Velocidad media del viento de la estación Chuquibambilla	55
Figura 22:	Horas de sol media de la estación Chuquibambilla.....	56
Figura 23:	Evapotranspiración de referencia de la estación Chuquibambilla.....	57
Figura 24:	Validación del modelo en Chuquibambilla	60
Figura 25:	Temperatura media de las máximas estación Taraco.....	61
Figura 26:	Temperatura media de las mínimas estación Taraco.....	61
Figura 27:	Humedad relativa media estación Taraco.....	62
Figura 28:	Velocidad media del viento estación Taraco.....	63
Figura 29:	Evaporación media diaria estación Taraco	64
Figura 30:	Evapotranspiración de referencia media diaria estación Taraco	64
Figura 31:	Validación del modelo en la estación Taraco.....	67



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

ET_o	: Evapotranspiración de referencia
ET_p	: Evapotranspiración potencial
INRENA	: Instituto Nacional de Recursos Naturales
ET_c	: Evapotranspiración Real
FAO	: Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación
ET	: Evapotranspiración
CHO	: Coeficiente único del Holdridge
KT	: Coeficiente para obtener la radiación solar
KE	: Coeficiente para reducir los valores de evapotranspiración
ASCE	: American Society of Civil Engineers
EWRI	: Environmental & water resources institute
TDPS	: Titicaca Desaguadero Poopo Salar
ALT	: Autoridad del Lago Titicaca
HS	: Horas de sol
T_{max}	: Temperatura media de las máximas
T_{min}	: Temperatura media de las mínimas
HR	: Humedad relativa media
V_v	: Velocidad media del viento
r	: Coeficiente de correlación
ETP	: Evapotranspiración potencial
UCP	: Uso consuntivo potencial
UC	: Uso consuntivo
ETA	: Evapotranspiración real o actual



Kc	: Coeficiente de cultivo
Eto	: Evapotranspiración de referencia
DA	: Necesidades de riego o demanda de agua de los cultivos
PE	: Precipitación efectiva
CA	: Diferencia de la lámina de la capacidad de almacenamiento del suelo inicial y final del período considerado.
N	: Aporte eventual del nivel freático.
r²	: Coeficiente de determinación



RESUMEN

Esta investigación determinó modelos empíricos que permiten estimar la ETo a partir de variables climáticas de las estaciones meteorológicas. El objetivo general fue determinar la evapotranspiración de referencia del cultivo en función de los factores y elementos climáticos en la cuenca del río Ramis. La metodología fue: recolección de información de las estaciones (temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, horas de sol, evaporación y precipitación) dentro de la cuenca; análisis gráfico de las variables; determinación de la ETo por el método de Penman Monteith y tanque clase A se estimaron parámetros por el método de mínimos cuadrados ordinarios y máxima verosimilitud para el periodo de calibración, validación de valores observados y la determinación de balance hídrico para los principales cultivos de la cuenca en los meses de mayor demanda utilizando el programa Cropwat. Los resultados muestran que en Ananea fueron necesarias pruebas de normalidad y transformación de variables para una regresión lineal. La temperatura media de las mínimas, máximas y la velocidad del viento son estadísticamente significativas al 0.05 de significancia, con $r^2 = 37\%$. En la validación la información de Ananea, el modelo muestra un desempeño deficiente. En cuanto al balance hídrico en Ananea para alfalfa, en abril hasta octubre hay demanda de agua, la precipitación en los demás meses es suficiente, para la cebada hay un requerimiento de agua en noviembre y diciembre, y análogamente para papa, los demás meses la lluvia abastece hasta la cosecha.

Palabras clave: Calibración, cuenca Ramis, evapotranspiración de referencia, máxima verosimilitud, validación.



ABSTRACT

This research determined empirical models that allow estimating ETo from climatic variables of meteorological stations. The general objective was to determine the reference evapotranspiration of the crop based on the climatic factors and elements in the Ramis river basin. The methodology was: collection of information from the stations (temperature, relative humidity, wind speed, hours of sunshine, evaporation and precipitation) within the basin; graphic analysis of the variables; determination of ETo by the Penman Monteith method and class A tank, parameters were estimated by the ordinary least squares method and maximum likelihood for the calibration period, validation of observed values and the determination of the water balance for the main crops of the basin in the months of greatest demand using the Cropwat program. The results show that in Ananea tests of normality and transformation of variables were necessary for a linear regression. The mean temperature of the minimum, maximum and wind speed are statistically significant at 0.05 of significance, with $r^2 = 37\%$. In the validation of the Ananea information, the model shows poor performance. Regarding the water balance in Ananea for alfalfa, in April to October there is a demand for water, the precipitation in the other months is sufficient, for barley there is a water requirement in November and December, and similarly for potatoes, the other months the rain supplies until harvest.

Keywords: Calibration, Ramis basin, reference evapotranspiration, maximum likelihood, validation.



CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo de investigación contribuye directamente a la gestión hídrica de la cuenca del río Ramis mediante un conocimiento del potencial de sus diferentes fuentes hídricas y usos actuales, mejorando así en la administración, operación, organización, mantenimiento, toma de decisiones, aplicación de normas, y la relación entre los usuarios y las autoridades de agua local y regional de Puno (INRENA, 2008).

En la región de Puno y específicamente en la cuenca del río Ramis algunas estaciones meteorológicas no cuentan con datos completos que requieren los métodos empíricos para estimar la evapotranspiración de referencia (ET_o), es así que, la presente investigación utilizó modelos empíricos que permiten estimar la ET_o a partir de variables climáticas que dispongan las estaciones meteorológicas como: datos de temperatura mínima, temperatura máxima, humedad relativa, velocidad del viento y horas de sol (Belizario, 2014, 2015). Para obtener las necesidades de agua de los cultivos se necesita una estimación precisa de la evapotranspiración real de los mismos (ET_c), definida como la suma de la evaporación de la superficie del suelo y la transpiración de los cultivos. Para el cálculo de ambos términos la correcta estimación de la evapotranspiración de referencia (ET_o), definida como la demanda evaporativa de la atmósfera (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

1.2. USO DE LOS RESULTADOS Y CONTRIBUCIONES DEL PROYECTO

Los resultados de la investigación serán de utilidad para:



Prevenir el uso racional de los recursos hídricos en las diferentes actividades programadas en las diferentes subcuencas de la cuenca del río Ramis.

Planificar la construcción de reservorios, para contrarrestar los efectos negativos de falta de agua en las principales actividades agropecuarias.

Caracterizar las sequias en la zona en estudio y planificar el uso del agua en todas las actividades económicas en la cuenca del Ramis.

1.3. IMPACTOS ESPERADOS

1.3.1. Impactos en ciencia y tecnología

El estudio hidrológico proporciona la información descriptiva de las características fisiográficas y morfológicas de la cuenca; asimismo, evalúa y cuantifica la disponibilidad y demanda hídrica, por consiguiente, permite entender el funcionamiento hidrológico de la cuenca bajo las restricciones de contorno existentes. Luego de haber revisado los diversos estudios realizados sobre la hidrología de las cuencas en estudio, es de considerar que el presente reporte contiene sustanciales aportes, como la caracterización de la climatología, la modelación matemática de caudales medios mensuales a partir de la precipitación real de la cuenca (Belizario et al., 2013b, 2013a), la generación de series sintéticas de caudal, como una gran alternativa para disponer de información más confiable desde el punto de vista hidrológico y probabilística, entre otros.

1.3.2. Impactos económicos

A menudo es difícil determinar el rendimiento real de los cultivos en áreas grandes como puede ser un sistema de riego. Cuando los agricultores son interrogados acerca de



los rendimientos pueden dar cifras dependiendo de la situación. Cuando solicitan un préstamo, posiblemente el rendimiento sea exagerado mientras que, si deben pagar una deuda o fijar una tarifa, probablemente subestimen el rendimiento obtenido. Los rendimientos de las hortalizas pueden cambiar de un día a otro y, salvo cuando se conservan buenos registros, nadie conocerá exactamente cuánto se obtuvo durante todo el período de la cosecha. Los rendimientos expresados en términos monetarios son aún más dudosos ya que los precios en el mercado local pueden tener grandes fluctuaciones (FAO, 2006).

1.3.3. Impactos sociales

Los próximos 30 años plantearán nuevos retos. Con el crecimiento demográfico - alrededor de 8,300 millones de personas para el año 2030- la agricultura tendrá que adaptarse a la modificación de las pautas de la demanda de alimentos, combatir la inseguridad alimentaria y la pobreza en las zonas rurales y competir por los escasos recursos hídricos con otros usuarios. Para satisfacer estas diversas demandas, la FAO considera que las políticas agrícolas tendrán que liberar el potencial de las prácticas de gestión del agua para incrementar la productividad, promover un acceso equitativo al agua y conservar los recursos básicos. Propone una estrategia para "reinventar" la gestión del agua en el sector agrícola, a partir de la modernización de la infraestructura de riego y las instituciones pertinentes, la plena participación de los usuarios del agua en la distribución de los costos y los beneficios, y el impulso a la escasa inversión en sectores decisivos de la cadena de la producción agrícola (INRENA, 2008).

1.3.4. Impactos ambientales

En la actualidad la calidad de agua en la cuenca del río Ramis está siendo afectada por la contaminación producto de la actividad minera informal que existe en la parte alta



de la cuenca. Es importante realizar programas de monitoreo de calidad de aguas en forma permanente con la finalidad de evaluar el grado de contaminación de las aguas, las cuales podrían afectar en forma directa la salubridad ambiental de la población existente.

1.4. HIPÓTESIS DEL TRABAJO

La evapotranspiración del cultivo de referencia está determinada por los factores y elementos climáticos en la cuenca del río Ramis.

1.5. OBJETIVO GENERAL

Determinar la evapotranspiración del cultivo de referencia en función de los factores y elementos climáticos en la cuenca del río Ramis.

1.6. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Determinar de qué manera se relacionan la evapotranspiración de cultivo de referencia y los factores climáticos en las diferentes subcuencas del río Ramis.

Evaluar el balance hídrico a fin de determinar la oferta y demanda de agua para los cultivos principales en las subcuencas del río Ramis.



CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES

Para Allen et al (2006), la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua, se conoce como evapotranspiración del cultivo de referencia, y se denomina E_{To} . La superficie de referencia corresponde a un cultivo hipotético de pasto con características específicas. No se recomienda el uso de otras denominaciones como ET potencial, debido a las ambigüedades que se encuentran en su definición. El concepto de evapotranspiración de referencia se introdujo para estudiar la demanda de evapotranspiración de la atmósfera, independientemente del tipo y desarrollo del cultivo, y de las prácticas de manejo. Debido a que hay una abundante disponibilidad de agua en la superficie de evapotranspiración de referencia, los factores del suelo no tienen ningún efecto sobre ET.

Según Allen et al (2006), el relacionar la ET a una superficie específica permite contar con una referencia a la cual se puede relacionar la ET de otras superficies. Además, se elimina la necesidad de definir un nivel de ET para cada cultivo y periodo de crecimiento. Se pueden comparar valores medidos o estimados de E_{To} en diferentes localidades o en diferentes épocas del año, debido a que se hace referencia a ET bajo la misma superficie de referencia. Los únicos factores que afectan E_{To} son los parámetros climáticos. Por lo tanto, E_{To} es también un parámetro climático que puede ser calculado a partir de datos meteorológicos. E_{To} 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. Desde este punto de vista, el método FAO Penman-Monteith se recomienda como el único método de determinación de E_{To} con parámetros climáticos.



Este método ha sido seleccionado debido a que aproxima de una manera cercana la ETo de cualquier localidad evaluada, tiene bases físicas sólidas e incorpora explícitamente parámetros fisiológicos y aerodinámicos. Además, se han desarrollado procedimientos para la estimación de los parámetros climáticos faltantes.

Según Martínez, Boueri & Escalona (2005); Silva, Montenegro, Rodríguez, & Bonfim, (2003); Villacis (2001); Camargo & Sentelhas (1997), el modelo de Holdridge depende linealmente de la temperatura media del aire multiplicada por un coeficiente único (CHO), mientras que el modelo de Hargreaves y Samani, además de la dependencia lineal de la temperatura media del aire, incorpora la radiación solar en función de la latitud del lugar y de la amplitud térmica del día y considera dos coeficientes: uno para obtener la radiación solar (KT) y otro para reducir los valores a evapotranspiración (KE), los cuales también pueden hacerse dependientes de la temperatura del aire. En efecto, los valores de CHO y KT generalmente son asumidos como constantes y únicos para una determinada región; sin embargo, es posible establecer una relación dinámica o de dependencia temporal con variables climáticas como temperatura. Samani (2000) y humedad del aire. Vega & Jara (2006), que permita incrementar la calidad de la estimación. Modelos que involucran la temperatura del aire han sido desarrollados y/o utilizados para estimaciones de evapotranspiración en regiones tropicales y subtropicales de Ecuador, Venezuela y Brasil, en algunos casos con desempeños comparables al modelo de Penman-Monteith.

Sin embargo, es necesario considerar que para aplicar P-M rara vez se dispone de valores medidos de radiación solar y menos de radiación neta, y que el procedimiento de estimación del déficit de presión de vapor debiera ser verificado localmente (Asce-Ewri, 2005). Por esta razón, y como procedimiento alternativo, el utilizar información de



evaporación de bandeja puede proveer estimaciones aceptables de evapotranspiración de referencia dentro de los límites recomendados para este método (Jensen, Burman, & Allen, 1990) y, adicionalmente, permitir la comparación con otros métodos.

Los modelos que involucran la temperatura del aire han sido desarrollados y/o utilizados para estimaciones de evapotranspiración en regiones tropicales y subtropicales de Ecuador, Venezuela y Brasil, en algunos casos con desempeños comparables al modelo de Penman-Monteith (Martinez, Boueri, & Escalona, 2005; Silva, Montenegro, Rodriguez, & Bonfim, 2003; Villacis, 2001; Camargo & Sentelhas, 1997).

Sin embargo, es necesario considerar que para aplicar P-M rara vez se dispone de valores medidos de radiación solar y menos de radiación neta, y que el procedimiento de estimación del déficit de presión de vapor debiera ser verificado localmente (Asce-Ewri, 2005). Por esta razón y como procedimiento alternativo, el utilizar información de evaporación de bandeja puede proveer estimaciones aceptables de evapotranspiración de referencia dentro de los límites recomendados para este método (Jensen, Burman, & Allen, 1990) y, adicionalmente, permitir la comparación con otros métodos.

Laqui (2013), en el “estimación de la evapotranspiración de referencia E_{To} utilizando modelos de Redes Neuronales Artificiales en Llachahui” (II simposio internacional del lago Titicaca - TDPS), ALT - Puno - Perú, concluyo en que los modelos de redes neuronales artificiales mostraron un gran desempeño en la estimación de la E_{To} , siendo el modelo 15 $E_{To} = f(HS, T_{max}, T_{min}, HR, V_v)$ el que presenta mejor desempeño dentro de los modelos que utilizan cinco variables con una $r = 93.54\%$.



2.2. EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL (ETP)

Vásquez (2000), indica que la evapotranspiración potencial (ETP), es la cantidad de agua evaporada y transpirada por un cultivo de tamaño corto (generalmente pastos), que cubre toda la superficie en estado activo de crecimiento y con un suministro adecuado y continuo de agua (Olarte, 1987), Según Thorntwaite, la ETP viene significar la necesidad real de agua de los cultivos, planteamiento que fue apoyado posteriormente por Papadakis; en cambio Blaney y Criddle, lo denomina uso consuntivo potencial (UCP), a diferencia del uso consuntivo (UC) que sería la cantidad de agua gastada en una área de cultivo por unidad de tiempo, tanto para la evaporación del suelo, transpiración de las plantas como la formación de los tejidos vegetales en las condiciones que fija el medio.

Para su determinación se presenta diferentes métodos directos y fórmulas empíricas.

2.3. EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL O ACTUAL (ETA)

Vásquez (2000), la ETA es la tasa de evaporación y transpiración de un cultivo libre de enfermedades, que crece en un campo extenso (uno o más hectáreas) en condiciones óptimas de suelo, fertilidad y suministro de agua. La Evapotranspiración es llamada también uso consuntivo.

Recibe el nombre de evapotranspiración (o uso consuntivo de agua) a la cantidad de agua transpirada por el cultivo y evaporada desde la superficie del suelo en donde se asienta el cultivo. Cabe distinguir dos formas de evapotranspiración:

Para Laqui (2013), la evapotranspiración potencial o máxima, es la cantidad de agua consumida, durante un determinado período de tiempo, en un suelo cubierto de una



vegetación homogénea, densa, en plena actividad vegetativa y con un buen suministro de agua.

Evapotranspiración real. Es la cantidad de agua realmente consumida por un determinado cultivo durante el período de tiempo considerado.

El rendimiento del cultivo es máximo cuando la transpiración es máxima, y esto ocurre cuando el cultivo se desarrolla en las mejores condiciones posibles. Ocurre entonces que la evapotranspiración real coincide con la evapotranspiración máxima.

Vásquez (2000), indica que, tanto en la evaporación como en la transpiración, el agua pasa del estado líquido al estado gaseoso, y éste cambio de estado se ve favorecido cuando el aire está caliente, seco o muy movido (viento). Por otra parte, la cantidad de agua perdida por evapotranspiración depende de las disponibilidades de agua en el suelo y de la capacidad de las plantas para absorber y para transpirar esa agua contenida en el suelo. En suma, los factores que condicionan la evapotranspiración se pueden agrupar de la siguiente forma:

- Factores concurrentes en el suelo, tales como capacidad de retención del agua, capacidad de calentamiento, exposición a los rayos solares, etc.

- Naturaleza de la vegetación, especialmente en lo referente a los órganos encargados de la absorción y de la transpiración del agua.

- La fase vegetativa en que se encuentra el cultivo. La evapotranspiración varía a lo largo del ciclo vegetativo. Con la planta recién nacida la mayor parte del agua consumida tiene lugar por evaporación en el suelo, pero a medida que el cultivo se desarrolla aumenta la transpiración, que se hace máxima al alcanzar la planta el máximo desarrollo foliar.



- Condiciones meteorológicas que favorecen o atenúan la evaporación, tales como intensidad de radiación solar, vientos, humedad atmosférica, etc.

Una gran parte del agua absorbida por la planta se consume en la evapotranspiración, ya que sólo una mínima parte (del 0.1 al 1%) se incorpora a los tejidos de la planta (agua de constitución). Por tanto, desde un punto de vista práctico se consideran las necesidades hídricas del cultivo iguales a las necesidades de evapotranspiración.

2.4. COEFICIENTE DE CULTIVO (Kc)

Vásquez (2000), coeficiente de cultivo 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 Kc son principalmente: Las características del cultivo, fecha de siembra, ritmo de desarrollo del cultivo, duración del periodo vegetativo, condiciones climáticas y la frecuencia de lluvia o riego, especialmente durante la primera fase de crecimiento.

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.

Doorenbos (1978), indica que el coeficiente del cultivo Kc, es la relación entre la evapotranspiración del cultivo, ET (Cultivo) y la evapotranspiración del cultivo de referencia, Eto cuando ambas se dan en grandes campos en condiciones de crecimiento óptimas.



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. CEDULA DE CULTIVO DE UN PROYECTO

Alcántara (1986), define que, una cedula de cultivo de un proyecto de riego es un patrón de los cultivos probables que se van a implantar y desarrollar en el proyecto: Dependen de diversos factores tales como: Económicos, costumbres de los agricultores, necesidades de autoconsumo, disponibilidad de agua, clase de suelos, mano de obra, clima, entre los importantes.

Alcántara (1986), la implantación de una cedula de cultivos puede analizarse como un problema de optimización. La técnica de optimización más utilizada para estos casos es la “Programación Lineal” en la cual la función objetivo sería maximizar los beneficios sujetos a las restricciones dadas por los factores antes indicadas.

2.6. BALANCE DEMANDA – DISPONIBILIDAD

Santayana (1990), indica: que el balance es la comparación en el tiempo y el espacio de las disponibilidades y las demandas de agua, que tiene por objeto definir la existencia de déficit o excesos de agua en las unidades hidrográficas de análisis. Permite asignar los volúmenes de agua disponibles a cada una de las demandas, según las prioridades establecidas por ley, de acuerdo a los requerimientos del proceso de desarrollo sostenido.



La definición de los estados de equilibrio hidráulico permitirá la formulación de las estrategias y las acciones correspondientes para asegurar la suficiente y oportuna satisfacción de las necesidades de agua para los diferentes usos.

Según Santayana (1990), los resultados del balance permitirán conocer con antelación, los conflictos que podrían llegar a presentarse con relación a la disponibilidad de agua, para los diferentes usos y definir a tiempo las alternativas posibles para eliminarlos o mitigarlos. El balance demanda disponibilidad se realizará para cada unidad hidrográfica de análisis con la visión futura que implica la búsqueda de una situación deseable dado que sería necesario conocer la magnitud local de la demanda con el horizonte del plan, se haría la confrontación en dos niveles de análisis a nivel del horizonte del plan y a nivel de los umbrales del plan.

2.7. NECESIDAD DE AGUA DE LOS CULTIVOS

Olarte (1987), indica cuando se tiene que identificar, formular, analizar y evaluar la viabilidad de un proyecto de riego, es necesario predecir exactamente los volúmenes de agua que se requieren para obtener una producción óptima de los diversos cultivos planteados.

Para Vásquez (2000), la evapotranspiración es uno de los factores que interviene en el balance hidrológico, ya sea en este se analice en una cuenca, región o proyecto; siendo este último la que realmente interesa para efectos del cálculo de la demanda de agua de los cultivos.

La evapotranspiración es un proceso que resulta del efecto combinado de la evaporación del agua de un suelo húmedo y la transpiración del cultivo en activo estado de crecimiento.



Según Vásquez (2000), la evapotranspiración actual (ETA), es la cantidad de agua que requiere la planta para satisfacer sus necesidades fisiológicas. Sin embargo, dentro de su ambiente, la planta no se encuentra aislado, sino que forma parte de un microsistema, sujeto a “entradas” y “salidas”; por lo que efectúa un balance hídrico, en la que las entradas se da todos los aportes hídricos al suelo y “salida” por el proceso de agotamiento de la humedad del suelo, ocasionado por la evapotranspiración actual.

El balance se sintetiza en:

$$DA = ETA - (PE + CA + N)$$

Dónde:

DA = Necesidades de riego o demanda de agua de los cultivos para el período considerado, (mm).

ETA = Evapotranspiración real o actual, (mm).

PE = Precipitación efectiva, (mm).

CA = Diferencia de la lámina de la capacidad de almacenamiento del suelo inicial y final del período considerado, (mm).

N = Aporte eventual del nivel freático, (mm).

El proceso de agotamiento de la humedad del suelo está dado por la evapotranspiración actual (ETA) y el proceso de contribución hídrica, por la suma de PE, CA y N.

El valor de N, se considera igual a cero, tanto para condiciones donde no existe influencia del nivel freático, así como en aquellas situaciones donde se puede controlar la



ascensión capilar del nivel freático, mediante un adecuado sistema de drenaje, capaz de evitar daños físicos al sistema radicular de la planta.

El valor de CA, también se considera cero para efectos de planificación de proyectos de irrigación, dado que, en estos, el objetivo es conocer la demanda de agua total del proyecto; luego la demanda de agua de los cultivos quedará por lo tanto expresada por:

Por lo anterior dicho la necesidad de agua de los cultivos es también llamada demanda de agua de los cultivos (D_a) o consumo teórico, o demanda unitaria neta.

2.8. MODELO DEL SISTEMA HIDROLÓGICO

Chow y Mays (1994), indican que el objetivo del análisis del sistema hidrológico es estudiar la operación del sistema y predecir su salida. Un modelo de sistema hidrológico es una aproximación al sistema real; sus entradas y salidas son variables hidrológicas mensurables y su estructura es un conjunto de ecuaciones que conectan las entradas y las salidas. Central a la estructura del modelo está el concepto de transformación del sistema.

Las entradas y las salidas pueden expresarse como funciones del tiempo, $I(t)$ y $Q(t)$ respectivamente, en donde t pertenece al rango de tiempo T en consideración. El sistema realiza una transformación de la entrada en la salida representada por

La cual se conoce como ecuación de transformación del sistema. El símbolo \square es una función de transferencia entre la entrada y la salida. Si esta relación puede representarse mediante una ecuación algebraica, entonces \square es un operador algebraico.



2.9. MODELO DETERMINISTICO

Chow y Mays (1994), no consideran la aleatoriedad. Una entrada dada produce siempre una misma salida. Modelos determinísticos hacen pronósticos. Por ejemplo, el modelo determinístico para la determinación de evaporación diaria en un lugar dado.

2.10. MODELO ESTOCÁSTICO

Chow y Mays (1994), señalan que el modelo de variables aleatorias o probabilísticas que no tiene valor fijo en un punto particular del espacio y del tiempo, pero las variables están descritas a través de distribuciones de probabilidad. Estos modelos hacen predicciones. Por ejemplo, la lluvia que caerá mañana en un lugar particular no puede pronosticarse con exactitud.



CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO

La cuenca del río Ramis está formada por las cuencas de los ríos Ayaviri y Azángaro. La superficie total de la cuenca del río Ramis es de 14,705.89 km², su altitud máxima y mínima es de 5,750 y 3,802 msnm., respectivamente, y su altitud media es de 4,312.09 msnm. 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 (Taraco) a 855 mm (Crucero).

Geográficamente se ubica entre las coordenadas 271,888 (71°07'4,7") Este, a 454,337 (69°25'26,4") Oeste y de los 8'290,627 (15°27'33,7") Sur, a los 8'445,589 (14°03'26,6") Norte, entre los 3,802 msnm es la desembocadura al lago y hasta los 5,750 msnm en el nevado Ananea Chico. Hidrográficamente pertenece a la cuenca del lago Titicaca y limita por el norte con la cuenca del río Inambari, por el sur con la cuenca del río Coata, por el este con las cuencas de Huancane y Suches y por el oeste con la cuenca del río Vilcanota (INRENA, 2008).

Los valores más altos se registran en el entorno del lago Titicaca y en la 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 Ramis 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. MATERIALES

Información meteorológica

Información meteorológica: temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, horas de sol, evaporación, precipitación mensual de las estaciones ubicadas dentro del ámbito en estudio.

Las estaciones dentro de la cuenca Ramis se presentan en el siguiente cuadro.

Tabla 1: Estaciones meteorológicas dentro de la cuenca Ramis

Estación	Este	Norte	Información disponible
Ananea	442448.64	8377140.24	Tmax, tmin, hr, vel, hs
Antauta	359755.59	8418670.94	Pr
Nuñoa	323939.22	8398159.78	Pr
Taraco	394520.64	8307700.48	Tmax, tmin, hr, vel, ev
Ayaviri	328650.96	8354211.82	Tmax, tmin, hr, vel
Orurillo	336700.28	8370587.59	Pr
Azángaro	371887.99	8350763.30	Tmax, tmin, hr, vel
Progreso	354051.01	8375000.62	Tmax, tmin, hr, vel
Pucara	352426.91	8337497.84	Tmax, tmin, hr
Crucero	389609.41	8411926.67	Tmax, tmin, hr, vel
Llally	295863.87	8346454.67	Tmax, tmin, hr, vel
Chuquibambilla	313991.91	8363477.47	Tmax, tmin, hr, vel, hs
Santa Rosa	306516.18	8382168.82	Tmax, tmin, hr, vel

Fuente: Elaboración propia.

T_{max} = temperatura media de las máximas, t_{min} = temperatura media de las mínimas, hr =humedad relativa media, vel = velocidad media del viento, hs = horas de insolación, Pr =precipitación, ev = evaporación.

En el siguiente cuadro se presenta las estaciones con las cuales se hizo la investigación.

Tabla 2. Estaciones utilizadas por su disponibilidad de datos.

Estación	Método calculo Eto
Ananea	PM
Taraco	Tanque clase A
Ayaviri	Tanque clase A
Azángaro	Tanque clase A
Progreso	Tanque clase A
Pucara	HS
Crucero	Tanque clase A
Llally	Tanque clase A
Chuquibambilla	PM
Santa Rosa	Tanque clase A

Fuente: Elaboración propia.

3.3. RECURSOS MATERIALES

- ✓ Materiales de escritorio e impresión.
- ✓ Materiales y equipos de cómputo.
- ✓ Software: ARC GIS, HIDROESTA, Microsoft office 2010, otros.



3.4. RECURSOS HUMANOS

- ✓ Recurso Humano:
- ✓ Ejecutor: Bach. Víctor Hugo Rodríguez Alvarado
- ✓ Docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional del Altiplano – Puno.
- ✓ Profesionales de otras Instituciones, como apoyo.

3.5. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

Para el desarrollo de la presente investigación se ha planteado las metodologías por objetivos específicos:

Objetivo 1. Relacionar la evapotranspiración de referencia de cultivo y los factores climáticos en los diferentes subcuencas del río Ramis.

1. Primeramente se recabó los datos hidroclimáticos correspondientes a diferentes subcuencas.

2. Considerando como variable dependiente ETP y las variables independientes los factores y elementos climáticos, se formuló la siguiente relación polinomial, la cual se efectuará mediante el análisis de Regresión Múltiple polinómica empleando el siguiente modelo:

El modelo general es el siguiente:

$$ETP = F(Temp., HR, V. del viento, Latitud, longitud, altitud, entre otros)$$

$$ETP = \alpha T^{\beta} HR^{\delta} r^{\varphi} h^{\gamma}$$

La linealización de la función exponencial para la solución de la regresión múltiple:

$$\text{LnETP} = \text{Ln}\alpha + \beta\text{LnHB} + \delta\text{LnHR} + \phi\text{Lnr} + \gamma\text{ln}$$

$$Y = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots$$

Para la solución de esta ecuación se utilizará el modelo de estimadores de máxima verosimilitud es:

$$LLikelh = -\frac{N}{2}\text{Ln} \sum (\theta) - \frac{N}{2}\text{Traza} \left[S_{ww} \sum^{-1} (\theta) \right] + \sum_{i=1}^N \left[\frac{1}{\sigma} \psi [v_{ji} - \beta_j X_{ji}] \sigma^{-1} [1 - \beta_j X_{ji} *] \sigma^{-1} \right]$$

3. Una vez modelado se evaluó los parámetros del modelo durante el proceso de calibración con un 75% de datos históricos del total de observados y con el 25% de datos se efectuó la validación correspondiente.

Objetivo 2. Obtención del nuevo modelo empírico para determinar la evapotranspiración de referencia de cultivo.

1. La modelación se seleccionó mediante la validación en base de los parámetros estadísticos como son: la probabilidad, coeficiente de determinación, coeficientes de correlación, entre otras pruebas estadísticas.

2. La validación se compara con el modelo de la FAO Penman-Monteith:

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

ET_o = evapotranspiración de referencia (mm/día⁻¹); Ra: radiación neta en la superficie del cultivo (MJm⁻² día⁻¹); G: flujo del calor de suelo (MJm⁻² día⁻¹); T: temperatura media (°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 ($\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$); y γ : constante psicométrico ($\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$).

3. Para el balance hídrico la metodología se basará en los siguientes procedimientos establecidos por (FAO, 2006)

$$Da = ETA - (Pe + CA + N)$$

Da: Necesidad de riego o demanda de agua de los cultivos para el periodo considerado (mm); ETA: Evapotranspiración real o actual (mm); Pe: Precipitación efectiva (mm); CA: Diferencia de la lámina de la capacidad de almacenamiento del suelo inicial y final del periodo considerado (mm); y N: Aporte eventual del nivel freático (mm). Considerando $CA = N = 0$

$$Da = ETA - Pe$$

$$Dp = Da/Er$$

Dp: La demanda de agua del proyecto; Da: Necesidad de riego del cultivo; y Er: Eficiencia de riego del proyecto; Pe: Precipitación efectiva, (Vásquez & Cañamero, 2017)

Para la determinación de la evapotranspiración de referencia se utilizará la ecuación de FAO Penman-Monteith (FAO, 2006).

3.6. CALIBRACIÓN

En el siguiente cuadro se muestra el período de calibración en función de la disponibilidad de datos en cada estación meteorológica.

Tabla 3: Período de calibración en cada estación meteorológica

Estación	Período de Calibración
Ananea	2003 a 2007
Chuquibambilla	1977 a 1999
Taraco	1996 a 2005

Fuente: Elaboración propia.

3.7. VALIDACIÓN

En el cuadro siguiente se presenta el período de validación de las estaciones en la cuenca Ramis, según la disponibilidad de datos.

Tabla 4: Período de validación en cada estación meteorológica.

Estación	Período de Validación
Ananea	2008 a 2009
Chuquibambilla	2000 a 2009
Taraco	2006 a 2009

Fuente: Elaboración propia.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RELACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE CULTIVO DE REFERENCIA Y LOS FACTORES CLIMÁTICOS EN LAS DIFERENTES SUBCUENCAS DEL RIO RAMIS.

4.1.1. Análisis de los elementos meteorológicos en la estación Ananea

Temperatura Mínima

En la figura 1 se muestra el parámetro climático registrado en la Estación meteorológica de Ananea, ubicada a una altitud de 4681 msnm, registra la menor temperatura media mínima en promedio, de $-6.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ en mes de julio del año 2008 y una temperatura media mínima promedio mayor valor de $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el año 2005. Como se aprecia la distribución anual de la temperatura media mínima anual es análoga en la presente estación, con temperaturas mínimas en los meses de mayo hasta agosto, (Ananea).

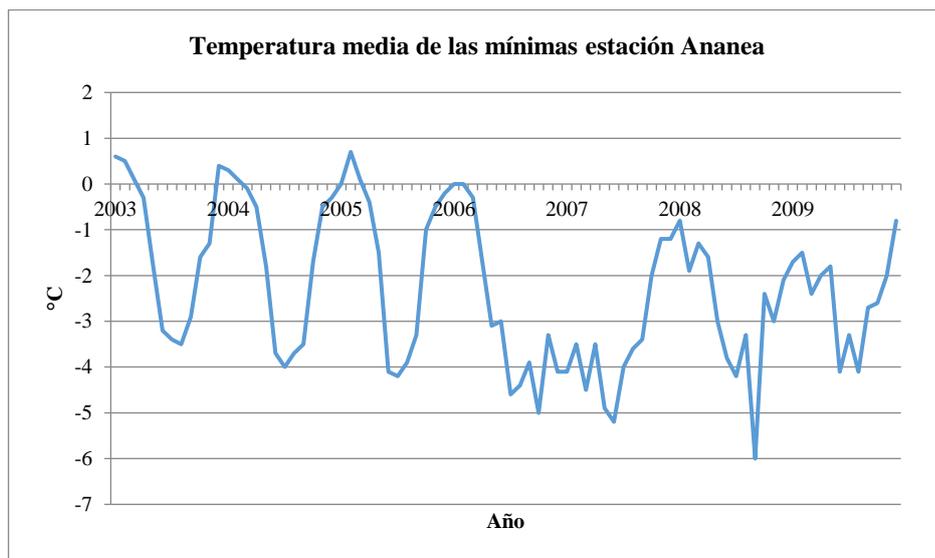


Figura 1: Temperatura media de las mínimas en la estación Ananea

Temperatura máxima

En la figura 2, se muestra que la temperatura media mínima viene disminuyendo los años 2007 a 2009 paulatinamente en los últimos años. Teniendo valores máximos promedios de 10.9 °C que se presenciaron en el año 2007 y valores mínimos promedio de 8.40 °C a inicios del año 2008 con temperaturas máximas entre los meses de noviembre a marzo (Ananea).

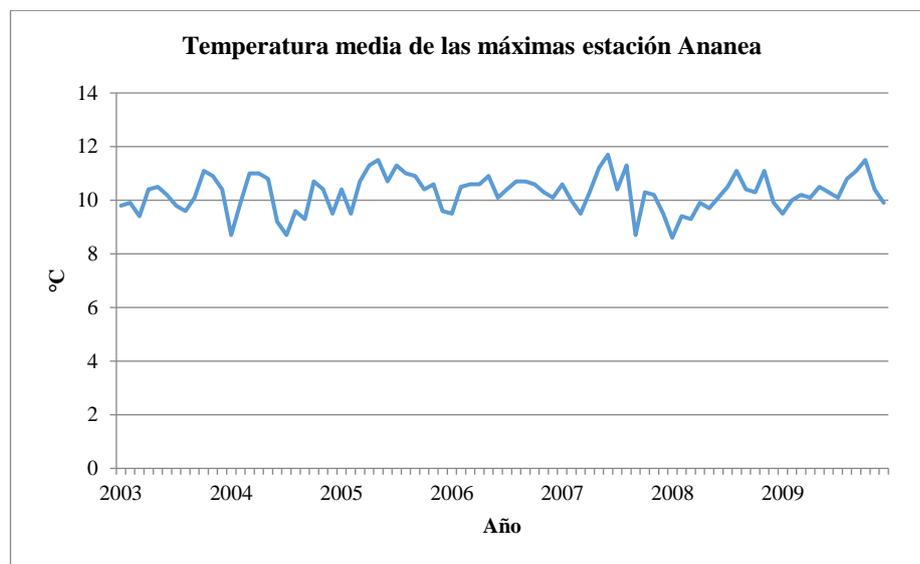


Figura 2: Temperatura media de las máximas en la estación Ananea

Humedad relativa

En Ananea, los veranos son cortos y fríos; los inviernos son cortos, muy fríos y mojados y está nublado durante todo el año. El nivel de humedad percibido en Ananea, medido por el porcentaje de tiempo en el cual el nivel de comodidad de humedad es bochornoso, opresivo o insostenible, no varía considerablemente durante el año, y permanece prácticamente constante entre 68% a 90 % según se refleja en figura 3.

La humedad relativa media es controlada en la estación meteorológica de Ananea, y otras estaciones fuera de la cuenca que se encuentran. Así mismo, su distribución anual

se muestra en la figura 3, donde existe una variabilidad a lo largo del año, encontrándose un valor máximo de 90%, en el año 2004, 2005 y 2009 con el periodo anual lluvioso (estación a mayor altitud dentro de la cuenca), y valores mínimos, 68% en los años 2004 y 2007 respectivamente.

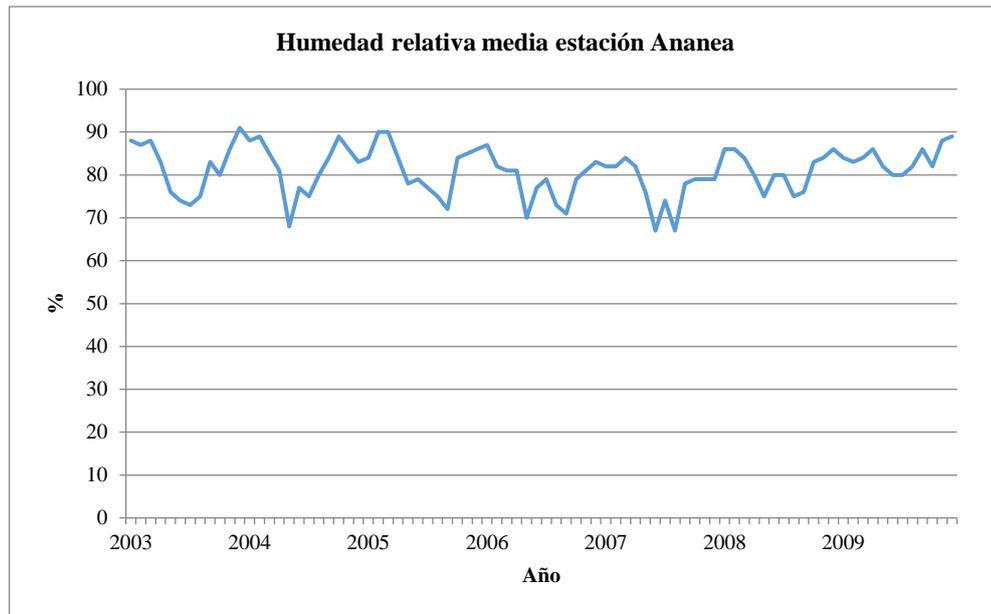


Figura 3: Humedad relativa media en la estación Ananea

Velocidad del viento

En la figura, 4 se describir esta variable en la se ha considerado la estación de Ananea que está ubicado en una altitud de 4681 msnm, las distribuciones de la velocidad media del viento son similares todos los años, con un valor máximo, del orden de 3.55 m/s el más alto valor se refleja a mediados del año 2007 y 3.00 m/s a mediados del año 2003, respectivamente y un valor mínimo, del orden de 1.9 m/s registrado a mediados del año 2004 y 1.5 m/s los que reflejan en el año 2003 (Ananea).

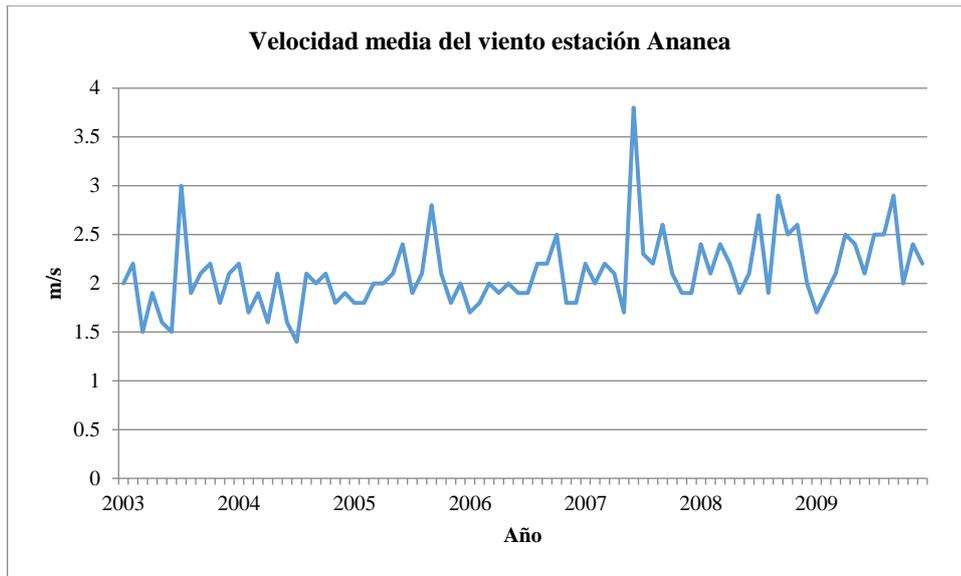


Figura 4: Velocidad media del viento en la estación Ananea

Horas de sol

El registro de las horas de sol dentro de la estación meteorológica de Ananea, se observaron una tendencia de la variación en cada año lo cual es variable. La variación anual en la estación de Ananea muestra el valor máximo de 9 h/día, de forma análoga y un valor mínimo del orden de 2.3 h/día, durante el año 2008. El número medio de horas diarias promedio anual de la estación de Ananea es de 6.3 h/día.

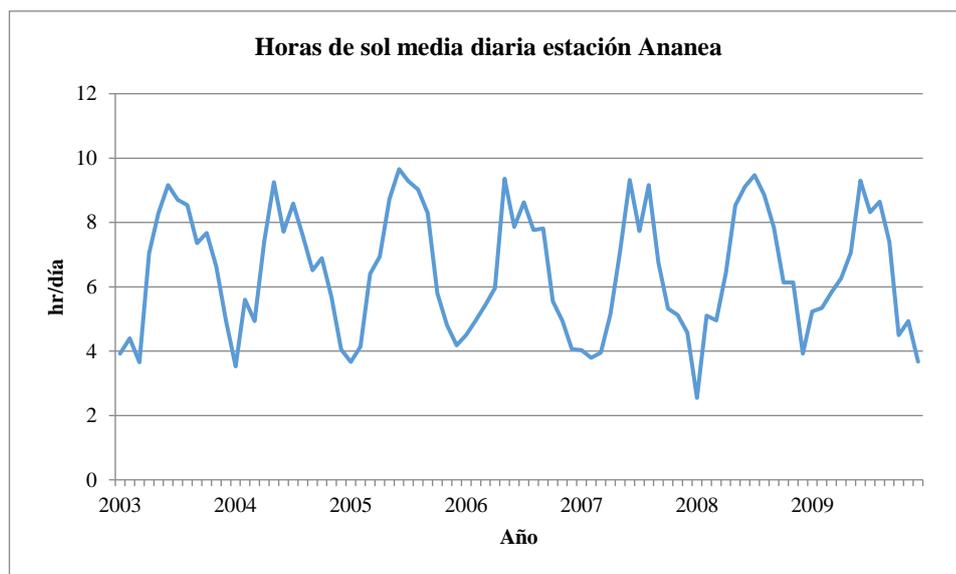


Figura 5: Horas de sol media diaria en la estación Ananea

4.1.2. Determinación de la Eto en la estación Ananea

La evapotranspiración es la combinación de dos procesos: evaporación y transpiración. El término evapotranspiración se utiliza para englobar tanto el proceso físico de pérdida de agua por evaporación como el proceso de evaporación del agua absorbida por las plantas (transpiración).

La evaporación es el proceso físico, mediante el cual el agua se convierte en su forma gaseosa. La evaporación del agua hacia la atmósfera ocurre desde la superficie de ríos, lagos, suelo y vegetación.

La transpiración, es el proceso mediante el cual el agua fluye desde el suelo hacia la atmósfera a través del tejido de las plantas. La transpiración es básicamente un proceso de evaporación. El agua se evapora dentro de las hojas y el vapor resultante hacia el exterior a través de las estomas.

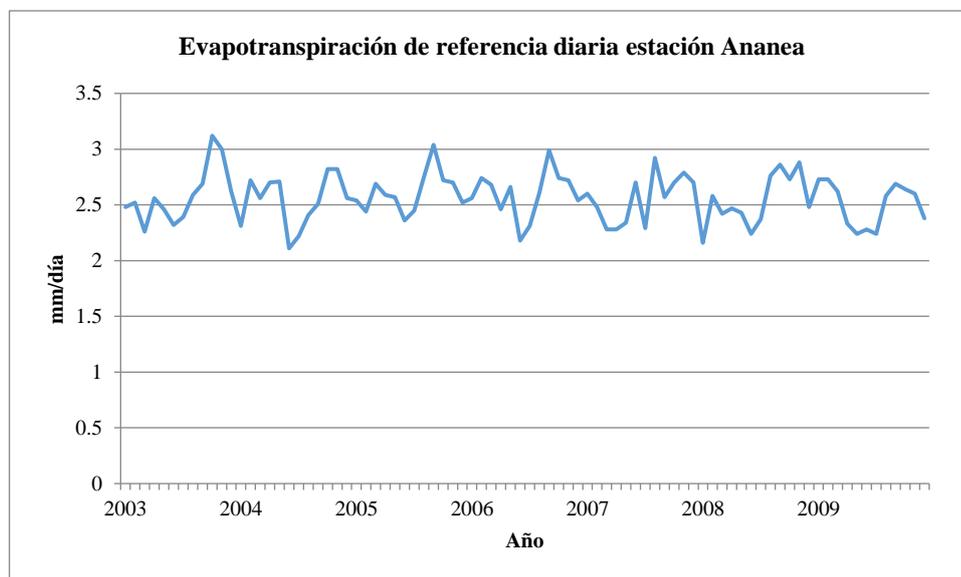


Figura 6: Evapotranspiración de referencia en la estación Ananea



4.1.3. Calibración del modelo en la estación Ananea

Se determinó los parámetros de un modelo de regresión con el método de mínimos cuadrados, como se muestra en el siguiente cuadro.

Tabla 5: Parámetros obtenidos por mínimos cuadrados ordinarios

Dependent Variable	: ETO			
Method	: Least Squares			
Date	: 06/27/20	Time	: 14:10	
Sample	: 1 60			
Included observations	: 60			
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	1.548142	0.791918	1.954928	0.0558
TMIN	0.042761	0.018508	2.310402	0.0247
TMAX	0.149284	0.038825	3.845083	0.0003
HR	-0.006884	0.007018	-0.980939	0.3310
VV	0.120657	0.071150	1.695810	0.0957
HS	-0.016409	0.019727	-0.831818	0.4092
R-squared	0.344729	Mean dependent var	2.577833	
Adjusted R-squared	0.284056	S.D. dependent var	0.216193	
S.E. of regression	0.182928	Akaike info criterion	-0.464806	
Sum squared resid	1.806988	Schwarz criterion	-0.255372	
Log likelihood	19.94419	F-statistic	5.681728	
Durbin-Watson stat	0.987681	Prob(F-statistic)	0.000279	

Fuente: Elaboración propia.

En la estación Ananea los coeficientes de regresión de la temperatura mínima y máxima, son estadísticamente significativos al nivel de significancia de 0.05, pero los correspondientes a la humedad relativa, velocidad del viento y horas de insolación no son significativos.

El coeficiente de determinación (R^2) de 0.34, indica que el 34% de la varianza de la evapotranspiración de referencia es explicado por el modelo de regresión lineal. El valor de R^2 es relativamente bajo puesto que valores mayores a 0.7 son adecuados. Por lo cual se realizó pruebas de normalidad de las variables que se han regresionado. Los resultados de regresión lineal por mínimos cuadrados con datos transformados, muestran que la temperatura media de las mínimas, máximas y la velocidad del viento son estadísticamente significativas al 0.05 de significancia. La transformación ha aumentado poco el coeficiente de determinación elevándolo a 37%.

En las siguientes figuras se presenta las pruebas de normalidad graficas junto con la prueba de Anderson-Darling.

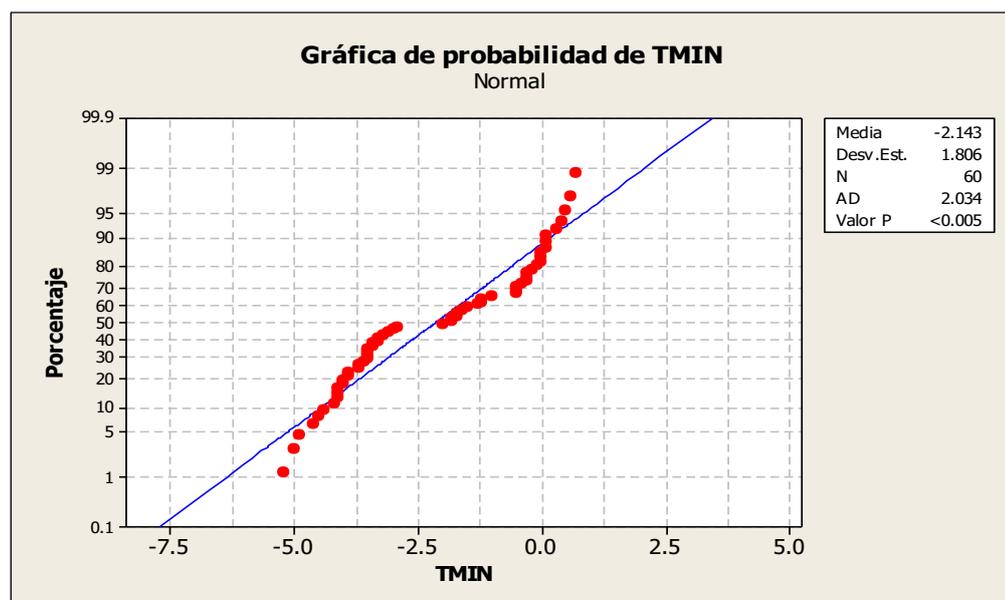


Figura 7: Prueba de normalidad de la temperatura media de las mínimas de estación Ananea.

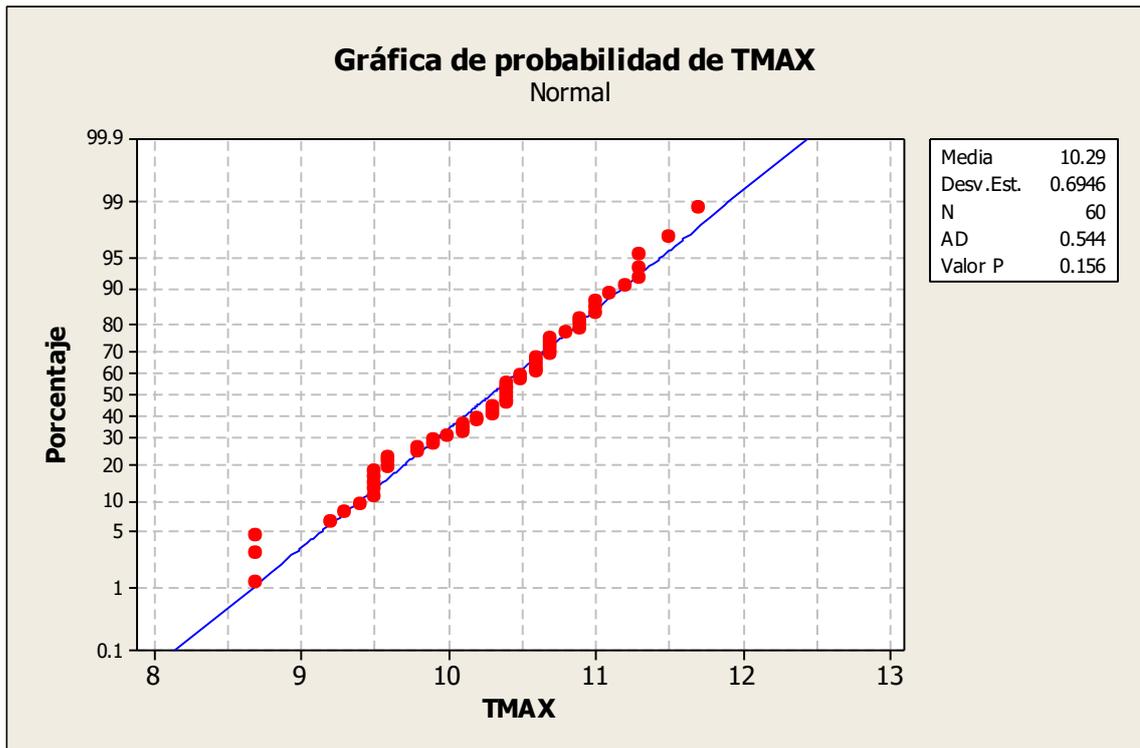


Figura 8: Prueba de normalidad de la temperatura media de las máximas de estación Ananea.

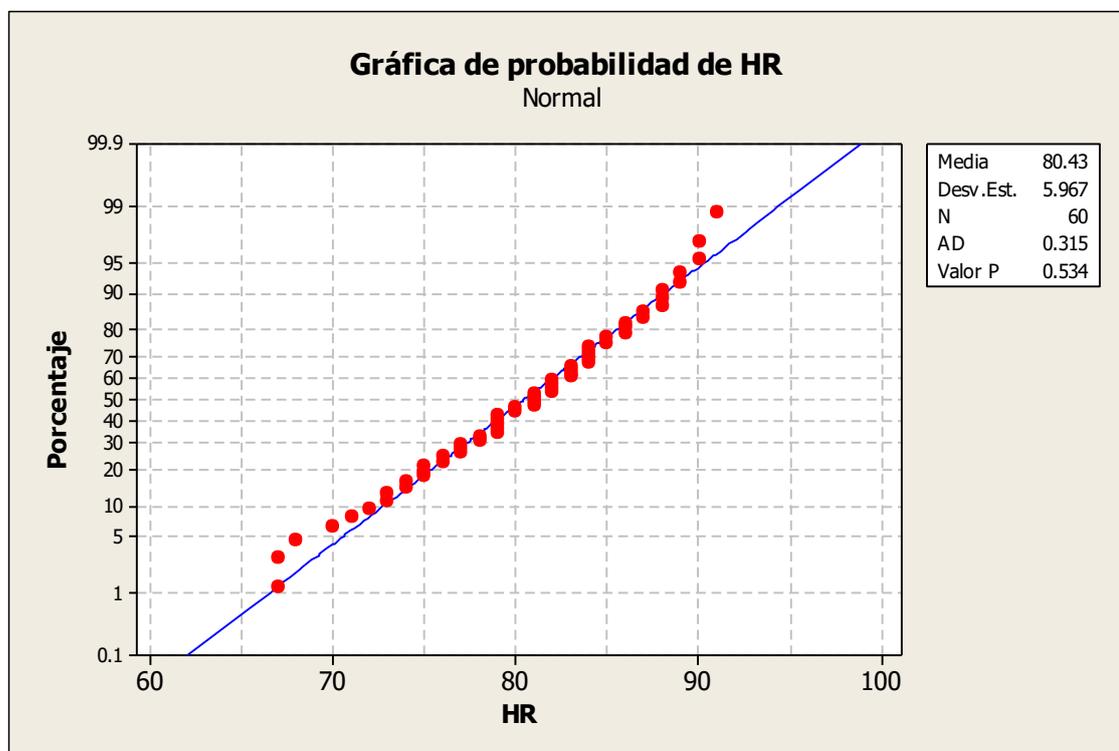


Figura 9: Prueba de normalidad de la humedad relativa media de estación Ananea.

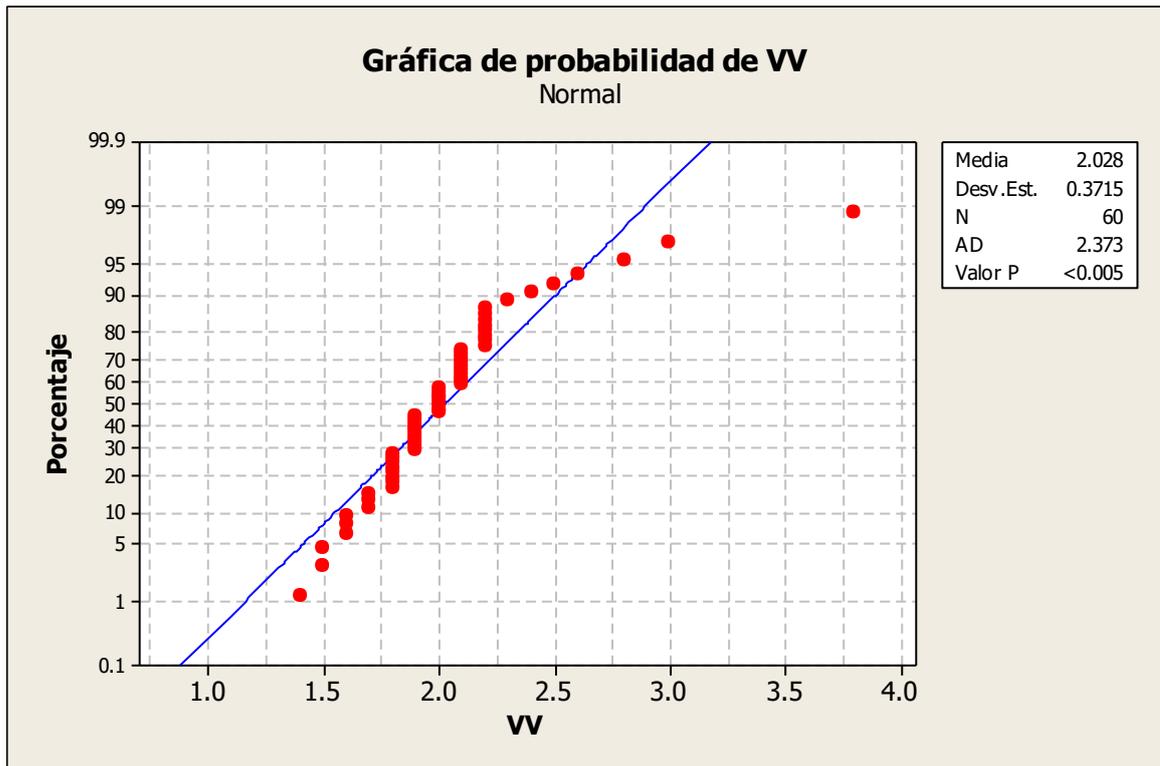


Figura 10: Prueba de normalidad de la velocidad media del viento de estación Ananea.

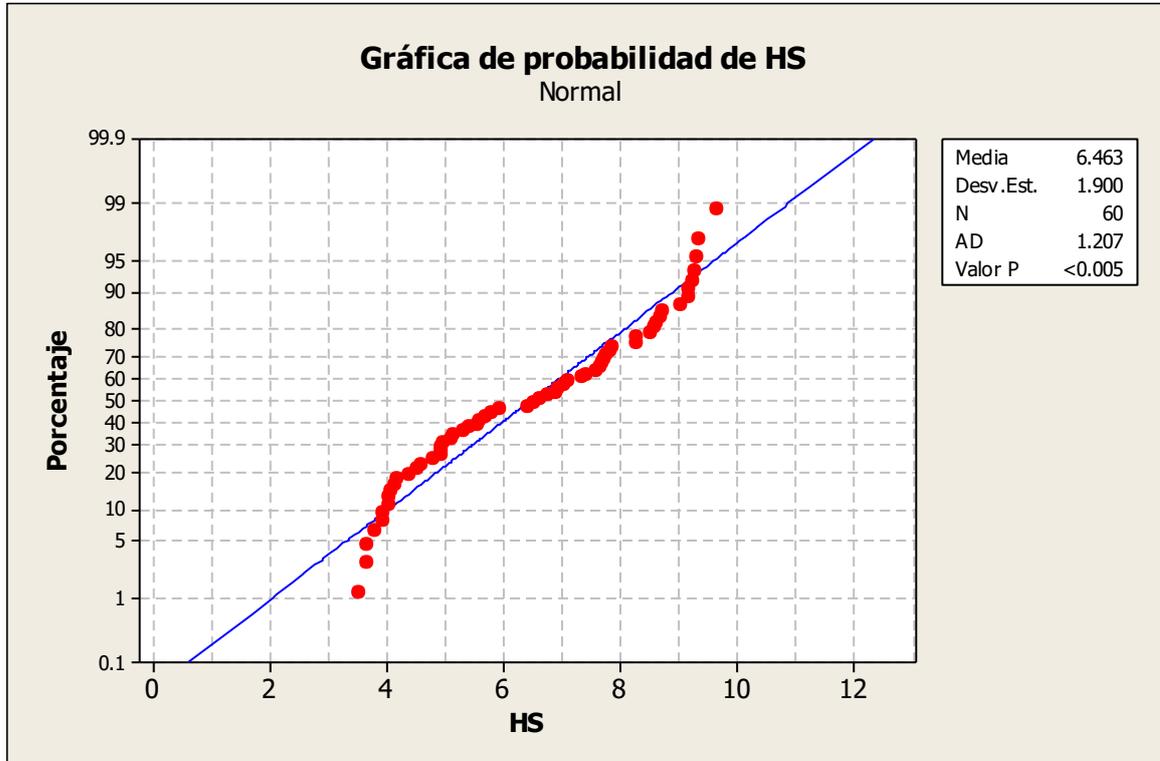


Figura 11: Prueba de normalidad de las horas de insolación de estación Ananea.

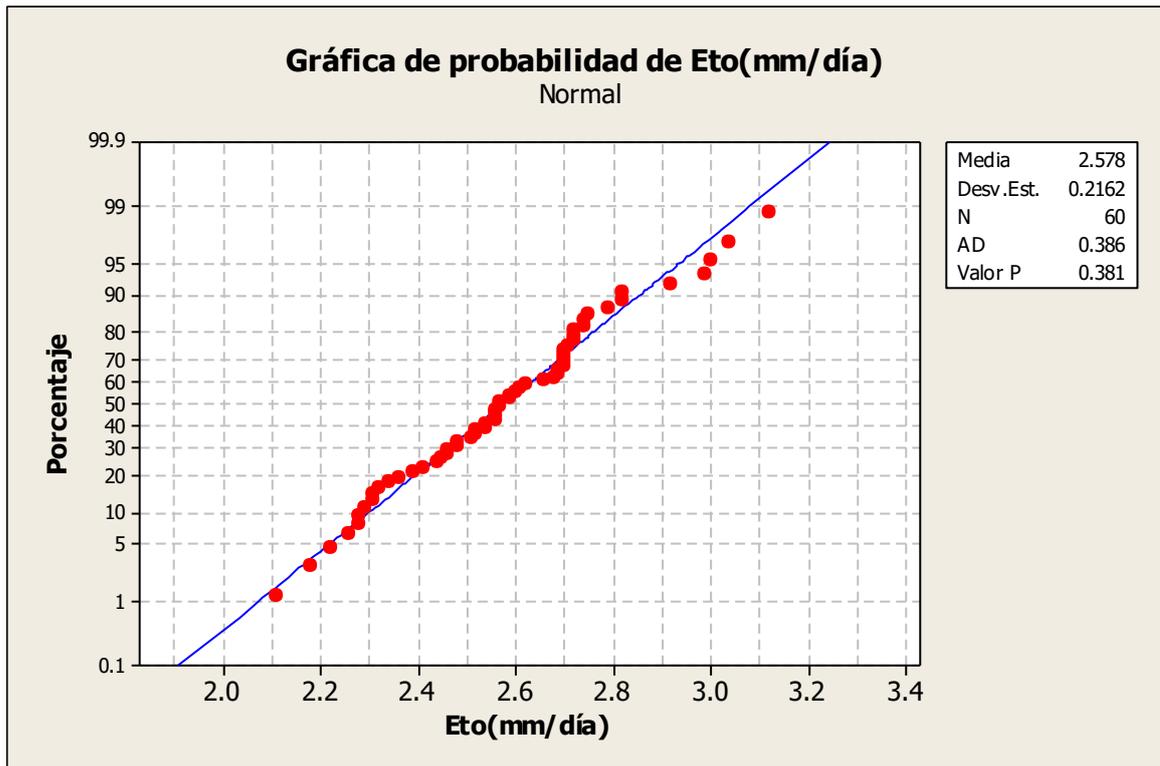


Figura 12: Prueba de normalidad de la evapotranspiración de referencia de estación Ananea.

En el siguiente cuadro se presenta los resultados de la prueba de normalidad y se indica la necesidad de transformación de variable.

Tabla 6: Resultado de prueba de normalidad para variables en estación Ananea

Variable	Valor de P	Conclusión de la prueba (Probabilidad)
Temperatura media de las mínimas	<0.005	Se rechaza la normalidad
Temperatura media de las máximas	0.156	Se acepta la normalidad
Humedad relativa media	0.534	Se acepta la normalidad
Velocidad media del viento	<0.005	Se rechaza la normalidad
Horas de insolación	<0.005	Se rechaza la normalidad
Evapotranspiración de referencia	0.381	Se acepta la normalidad

Fuente: Elaboración propia.

Se transformó las variables que no son normales las cuales son: temperatura media de las mínimas, velocidad del viento y horas de insolación.

La temperatura media de las mínimas no admite una transformación adecuada de tipo Box-Cox.

En la siguiente figura se presenta la transformación Box-Cox de la velocidad media del viento.

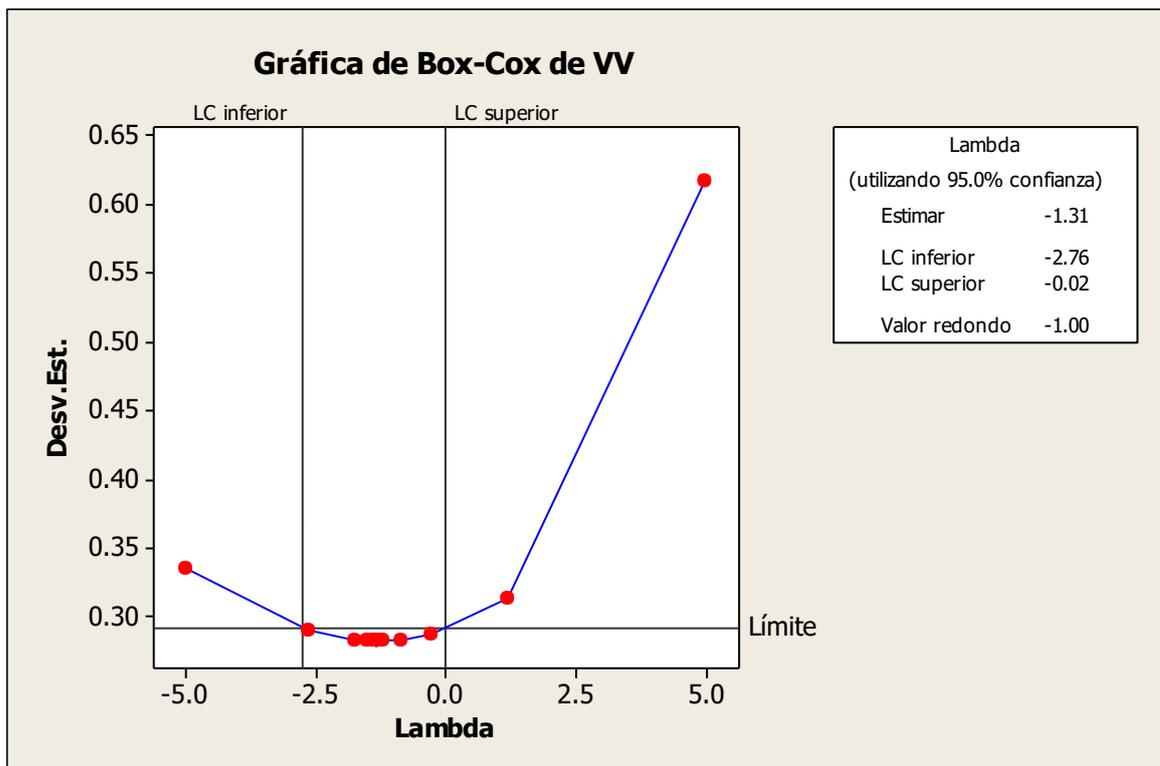


Figura 13: Transformación Box-Cox de la velocidad media del viento

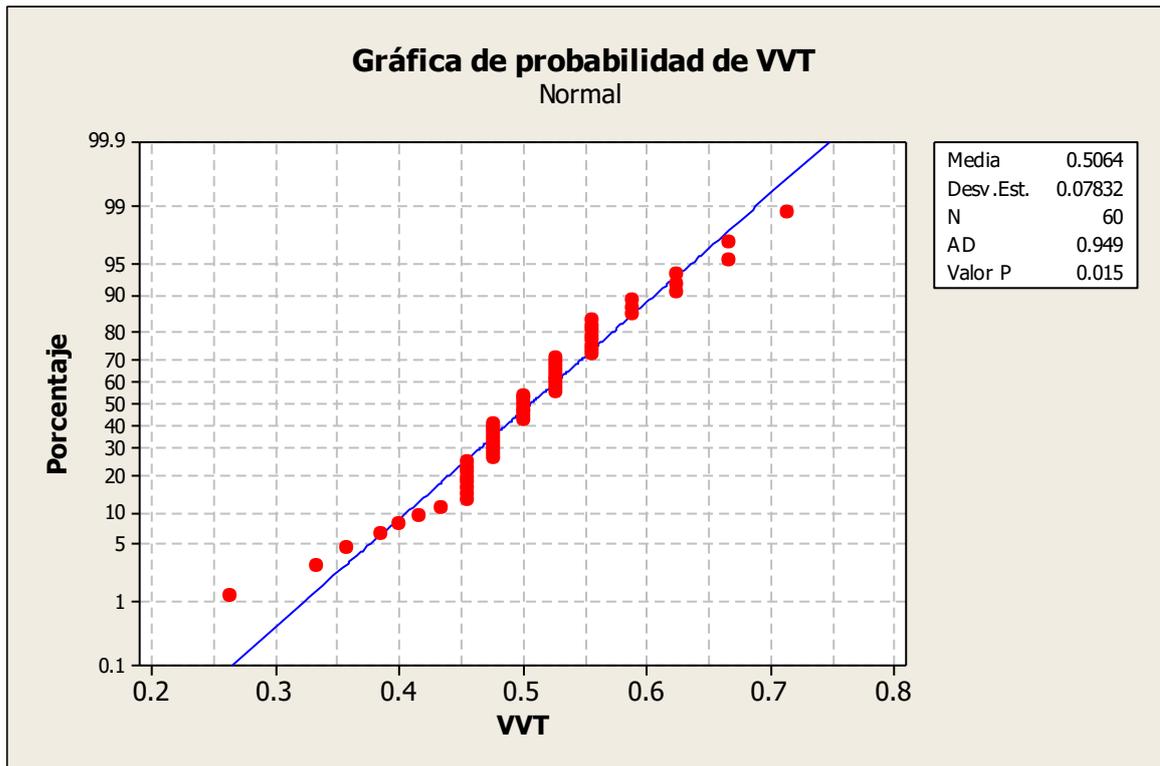


Figura 14: Prueba de normalidad de la velocidad media del viento transformada.

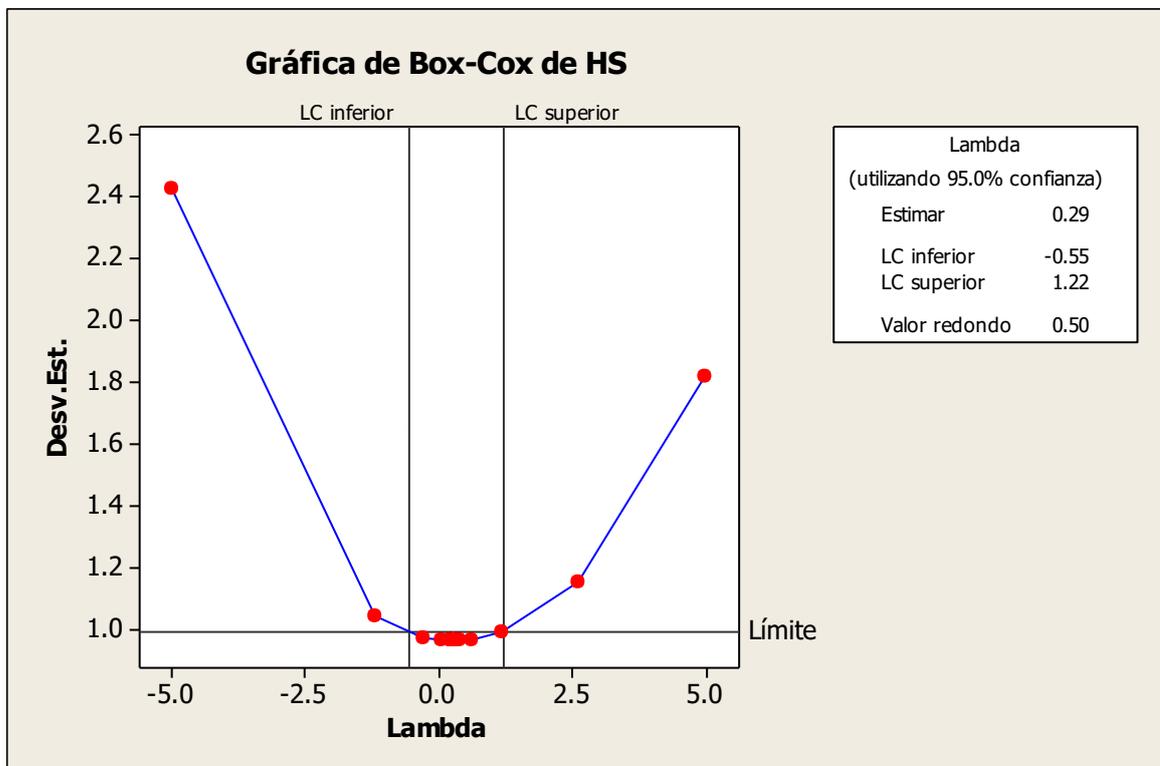


Figura 15: Transformación box-cox de las horas de insolación.

Así mismo se realizó nuevamente la prueba de normalidad a las horas de insolación.

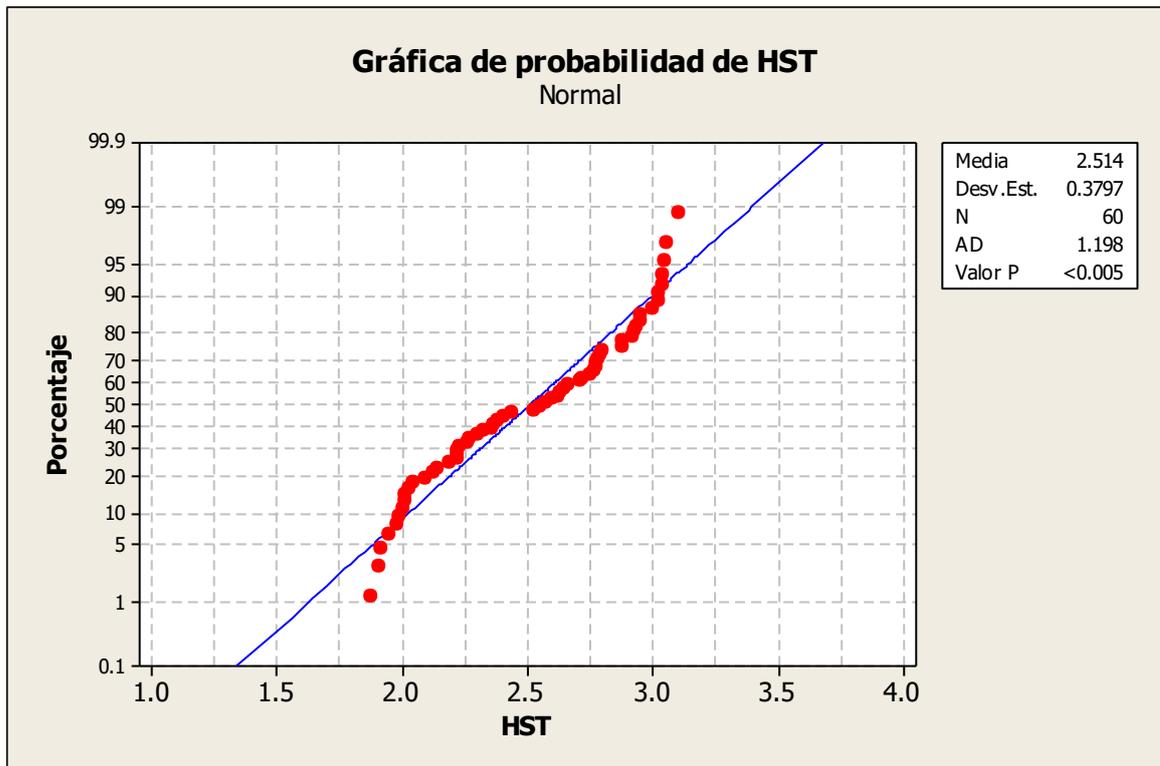


Figura 16: Prueba de normalidad de las horas de insolación transformadas

Las mejores transformaciones para las variables se presentan en el cuadro siguiente.

Tabla 7: Transformaciones mejores obtenidas para las variables no normales

Variable	Transformación
Velocidad media del viento (m/s)	$y = x^{-1}$
Horas de insolación diaria (hrs)	$y = x^{0.5}$

Fuente: Elaboración propia.

Se realizó la estimación de parámetros por mínimos cuadrados con las variables normales y transformadas. El modelo lineal es

$$ETO = C(1) + c(2) TMIN + c(3) TMAX + c(4) HR + c(5) VVT + c(6) HST$$



En el siguiente cuadro se presenta el resultado de regresión con estimación por mínimos cuadrados ordinarios.

Tabla 8: Resultados de regresión por mínimos cuadrados ordinarios para la estación Ananea con datos transformados.

Dependent Variable	: ETO			
Method	: Least Squares			
Date	: 08/13/21	Time	: 10:59	
Sample	: 1 60			
Included observations	: 60			
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C(1)	1.574874	0.427911	3.680378	0.0005
TMIN	0.037066	0.013531	2.739268	0.0082
TMAX	0.141902	0.034745	4.084080	0.0001
VVT	-0.746492	0.319785	-2.334357	0.0232
R-squared	0.351202	Mean dependent var	2.577833	
Adjusted R-squared	0.316445	S.D. dependent var	0.216193	
S.E. of regression	0.178742	Akaike info criterion	-0.541401	
Sum squared resid	1.789136	Schwarz criterion	-0.401778	
Log likelihood	20.24203	Durbin-Watson stat	1.086801	

Fuente: Elaboración propia.

Estimación de parámetros por máxima verosimilitud

Tabla 9: Parámetros por máxima verosimilitud para la estación Ananea

LogL	: UNTITLED		
Method	: Maximum Likelihood (Marquardt)		
Date	: 08/13/21	Time	: 11:06
Sample	: 1 60		
Included observations	: 60		
Evaluation order	: By observation		
Convergence achieved after 18 iterations			

	Coefficient	Std. Error	z-Statistic	Prob.
C(1)	1.575077	0.432605	3.640912	0.0003
C(2)	0.037074	0.015829	2.342101	0.0192
C(3)	0.141889	0.035640	3.981107	0.0001
C(4)	-0.746550	0.331996	-2.248671	0.0245
C(5)	0.172663	0.021479	8.038613	0.0000
Log likelihood	20.24203	Akaike info criterion	-0.508068	
Avg. log likelihood	0.337367	Schwarz criterion	-0.333539	
Number of Coefs.	5	Hannan-Quinn criter.	-0.439800	

Fuente: Elaboración propia.

El modelo de Eto para Ananea por máxima verosimilitud es

$$ETO = 1.5751 + 0.0371 * TMIN + 0.1419 * TMAX - 0.7466 * V_{VT}$$

La varianza de los errores es

$$\sigma_e^2 = 0.1727$$

Dónde: $V_{VT} = 1/VV$

4.1.4. Validación en la estación Ananea

Se probó el buen desempeño del modelo comparando la evapotranspiración de referencia que produce con los datos obtenidos con el Cropwat.

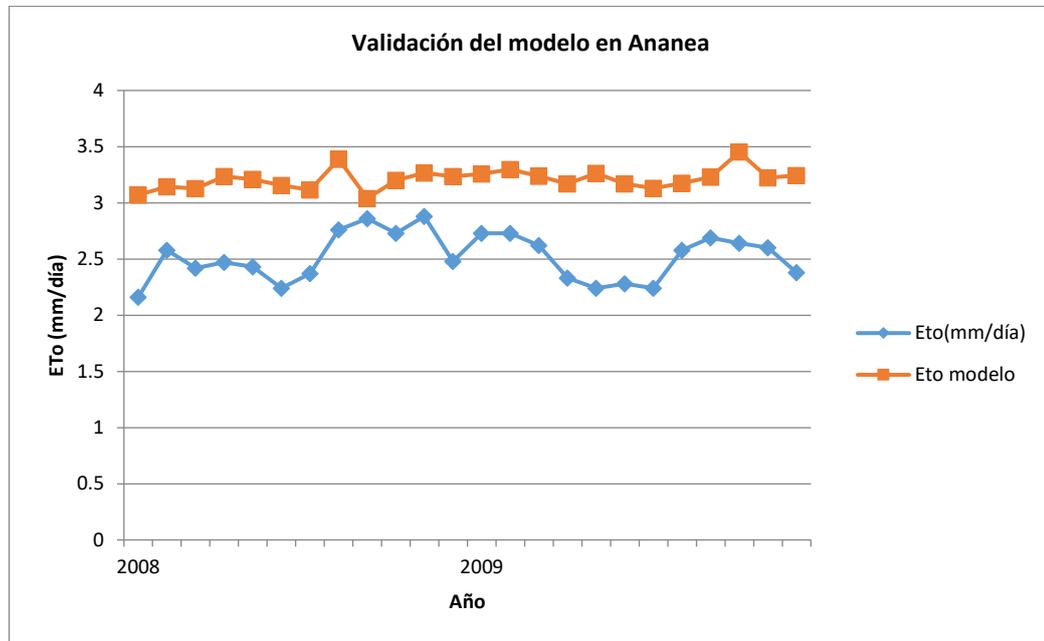


Figura 17: Validación del modelo en Ananea

4.1.5. Análisis de los elementos meteorológicos en la estación Chuquibambilla

Temperatura mínima

En la figura 18 se muestra el parámetro climático registrado en la estación meteorológica de Chuquibambilla, ubicada a una altitud de 4681 msnm, registra la menor temperatura media mínima en promedio, de $-12.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ en mes de julio del año 2009 y una temperatura media mínima promedio mayor valor de $5.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el año 1994. como se aprecia la distribución anual de la temperatura media mínima anual es análoga en la presente estación, con temperaturas mínimas en los meses de mayo hasta agosto, (Chuquibambilla).

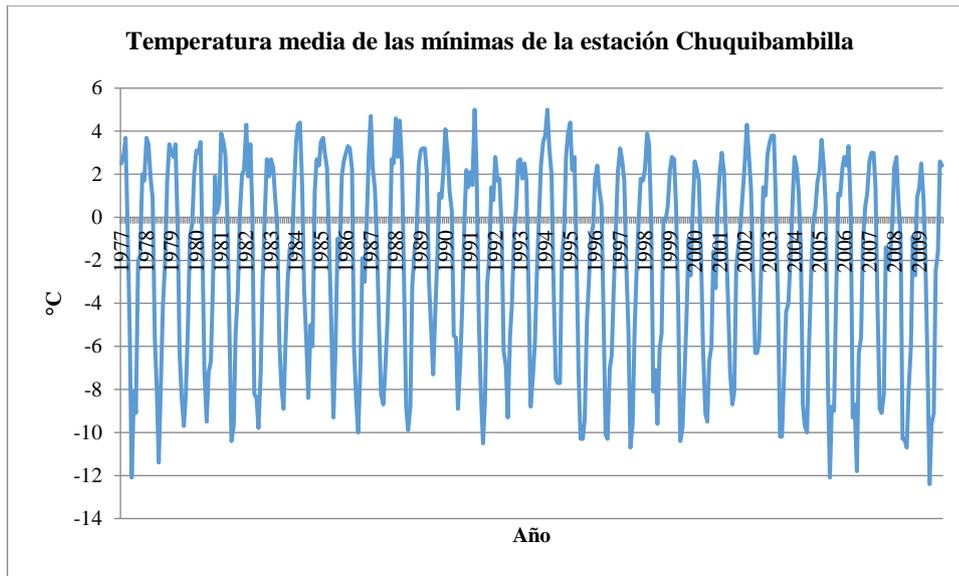


Figura 18: Temperatura media de las mínimas de la estación Chuquibambilla

Temperatura máxima

En la figura 19, se muestra que la temperatura media mínima viene disminuyendo los años 2003 a 2004 paulatinamente en los últimos años. Teniendo valores máximos promedios de 19.02 °C que se presenciaron en el año 1983, 1989, 1995 y 2009 así mismo los valores mínimos promedio de 12.40 °C a inicios del año 1991, 2002 y 2008 con temperaturas máximas entre los meses de noviembre a marzo (Chuquibambilla).

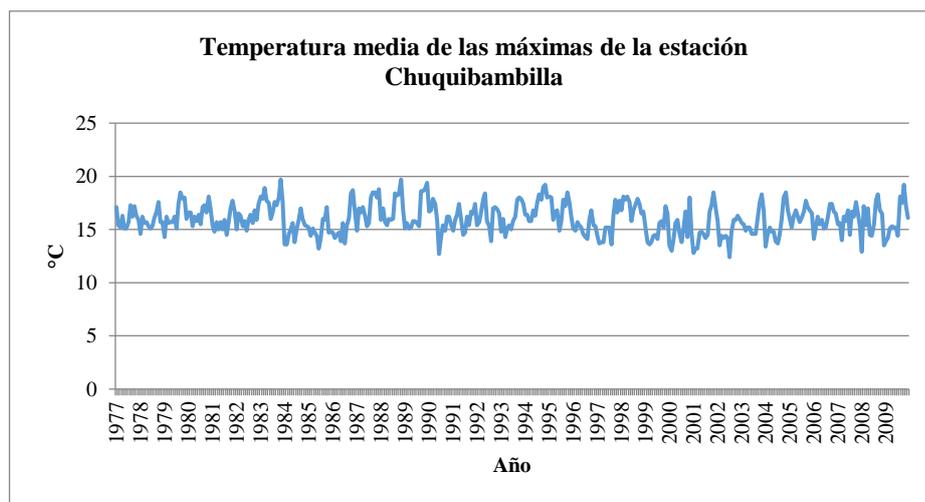


Figura 19: Temperatura media de las máximas de la estación Chuquibambilla

Humedad relativa

La humedad relativa media es controlada en la estación meteorológica de Chuquibambilla, y otras estaciones dentro de la cuenca Ramis que se encuentran. Así mismo, su distribución anual se muestra en la Figura, 20 donde existe una variabilidad a lo largo de diferentes años, encontrándose un valor máximo de 90%, en el año 2002, con el periodo anual lluvioso (estación a mediana altitud dentro de la cuenca), y valores mínimos, 30% en los años 1978 y 1979 respectivamente.

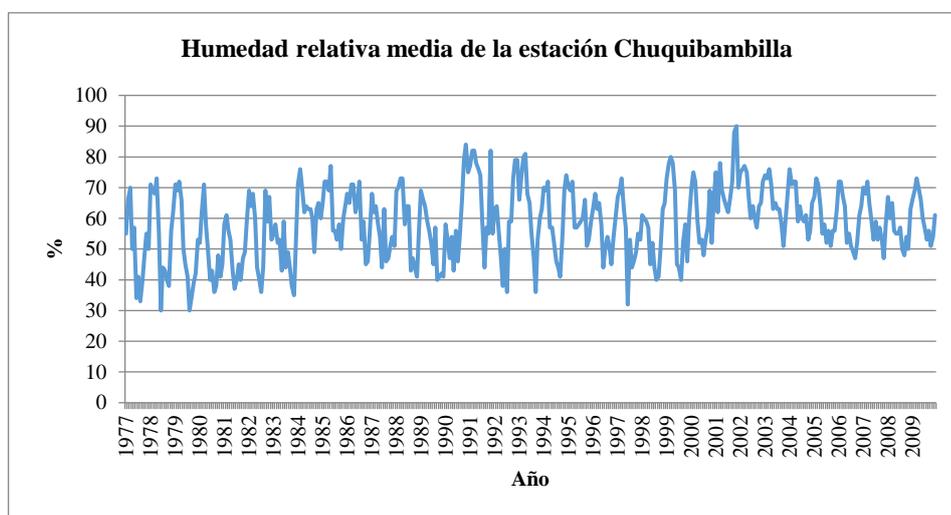


Figura 20: Humedad relativa media de la estación Chuquibambilla

Velocidad del viento

En la figura 21, se describir esta variable en la se ha considerado la estación de Chuquibambilla que está ubicado en una altitud de 3954 msnm, las distribuciones de la velocidad media del viento son similares todos los años, con un valor máximo, del orden de 4.50 m/s el más alto valor se refleja a mediados del año 2006 y 3.55 m/s en los años 1990, y 2008 respectivamente y un valor mínimo, del orden de 1.00 m/s en los años 1977, 1985, 1988 y 2003 y 1.32 m/s los que reflejan en el año 1980, 1986 y 1989 (Chuquibambilla).

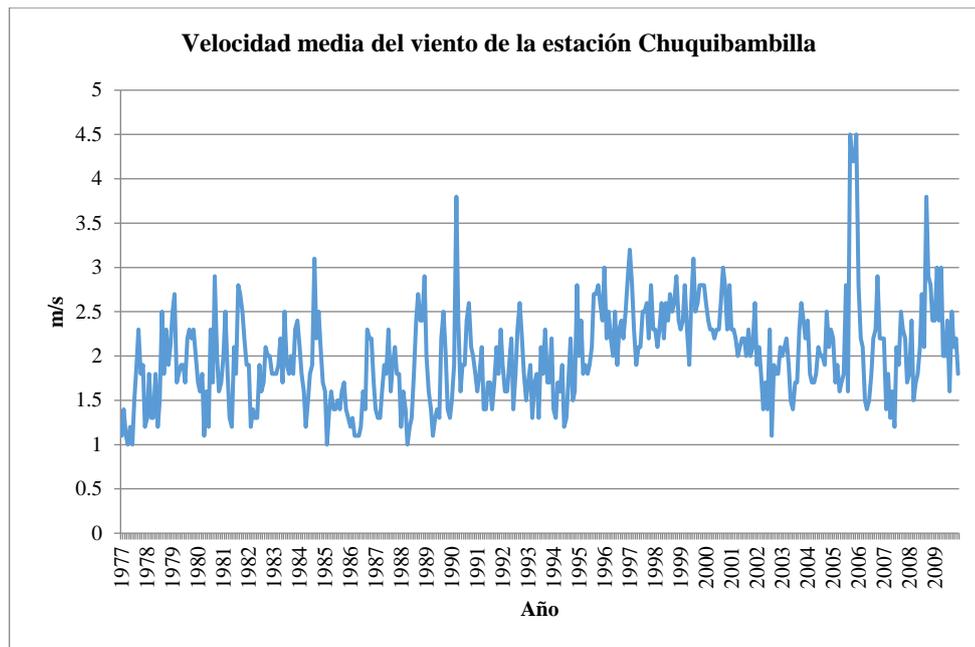


Figura 21: Velocidad media del viento de la estación Chuquibambilla

Horas de sol

El registro de las horas de sol dentro de la estación meteorológica de Chuquibambilla, se muestra en la figura 22, se observa que tiene una tendencia de la variación en cada año lo cual es variable. La variación anual en la estación de Chuquibambilla muestra el valor máximo de 10.1 h/día, de forma análoga y un valor mínimo del orden de 0.05 h/día, durante el año 1996. El número medio de horas diarias promedio anual de la estación de Chuquibambilla es de 6.5 h/día.

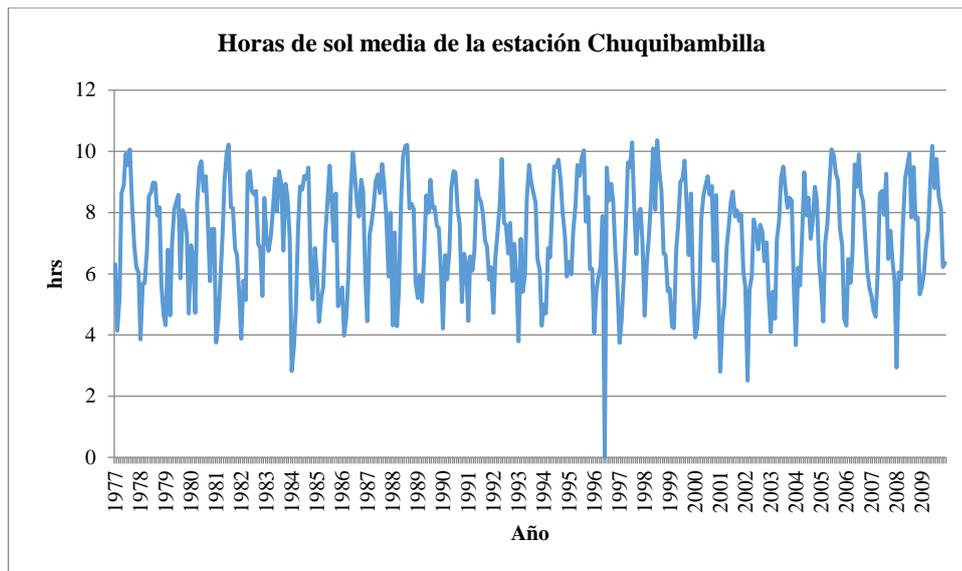


Figura 22. Horas de sol media de la estación Chuquibambilla

4.1.6. Determinación de la Eto en la estación Chuquibambilla

La evapotranspiración es la combinación de dos procesos: evaporación y transpiración. El termino evapotranspiración se utiliza para englobar tanto el proceso físico de pérdida de agua por evaporación como el proceso de evaporación del agua absorbida por las plantas (transpiración).

La evaporación es el proceso físico, mediante el cual el agua se convierte en su forma gaseosa. La evaporación del agua hacia la atmosfera ocurre desde la superficie de ríos, lagos, suelo y vegetación.

El registro de la evapotranspiración dentro de la estación meteorológica de Chuquibambilla, como se muestra en la figura 23, se observa que tiene una tendencia de la variación en cada año lo cual es variable. La evapotranspiración en la estación de Chuquibambilla, es de forma análoga con un valor máximo de 4.90 mm/día y un valor mínimo promedio de 2.5 mm/día respectivamente.

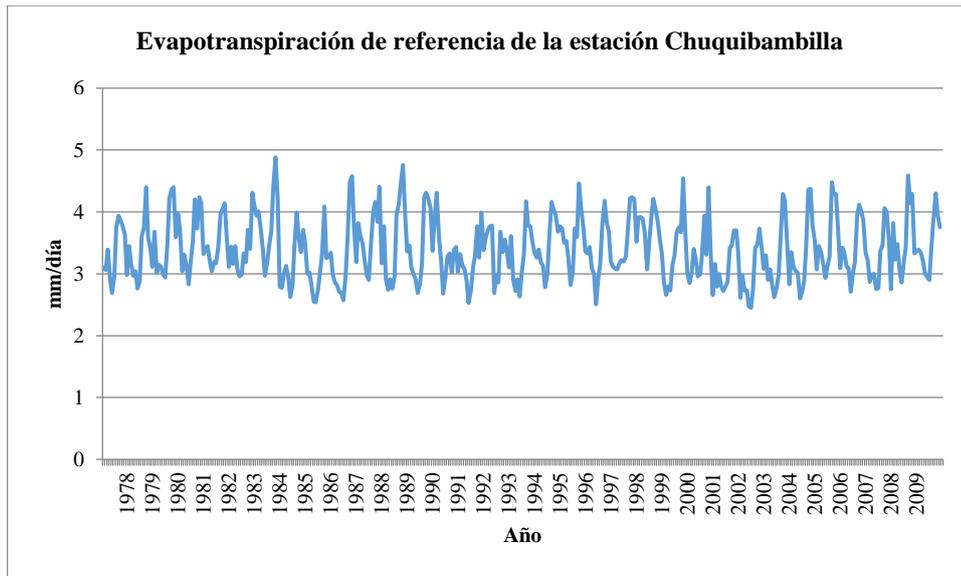


Figura 23: Evapotranspiración de referencia de la estación Chuquibambilla

4.1.7. Calibración en la estación Chuquibambilla

En el siguiente cuadro se presenta la estimación de parámetros por el método de mínimos cuadrados.

Tabla 10: Resultados regresión por mínimos cuadrados para la estación
Chuquibambilla

Dependent Variable	: ETO			
Method	: Least Squares			
Date	: 07/29/20	Time	: 23:15	
Sample (adjusted)	: 1 275			
Included observations	: 275 after adjustments			

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C(1)	0.573169	0.196234	2.920851	0.0038
TMIN	0.079204	0.004451	17.79654	0.0000
TMAX	0.162054	0.009997	16.21042	0.0000
HR	-0.016627	0.001218	-13.64890	0.0000
VV	0.330505	0.020927	15.79346	0.0000
HS	0.094409	0.010528	8.967132	0.0000

R-squared	0.887238	Mean dependent var	3.426436
Adjusted R-squared	0.885142	S.D. dependent var	0.496439
S.E. of regression	0.168247	Akaike info criterion	-0.705196
Sum squared resid	7.614558	Schwarz criterion	-0.626284
Log likelihood	102.9644	Durbin-Watson stat	1.008066

Fuente: Elaboración propia.

En Chuquibambilla el coeficiente de determinación de 88.7% es alto por lo cual el modelo es muy adecuado, por lo que no hay necesidad de transformar variables. También se muestra que todas las variables son estadísticamente significativas al 0.05 de significancia.

La estimación de parámetros por máxima verosimilitud se muestra en el cuadro siguiente.

Tabla 11: Estimación por máxima verosimilitud en la estación Chuquibambilla

LogL	: UNTITLED			
Method	: Maximum Likelihood (Marquardt)			
Date	: 07/29/20	Time	: 23:29	
Sample	: 1 276			
Included observations	: 276			
Evaluation order	: By observation			
Convergence achieved after 12 iterations				
	Coefficient	Std. Error	z-Statistic	Prob.
C(1)	0.572519	0.202098	2.832881	0.0046
C(2)	0.079193	0.004164	19.02015	0.0000
C(3)	0.162082	0.010946	14.80698	0.0000
C(4)	-0.016624	0.001215	-13.67994	0.0000
C(5)	0.330768	0.019732	16.76301	0.0000
C(6)	0.094353	0.009182	10.27626	0.0000
C(7)	0.166105	0.007909	21.00153	0.0000
Log likelihood	103.8311	Akaike criterion	info	-0.701675
Avg. log likelihood	0.376200	Schwarz criterion		-0.609853
Number of Coefs.	7	Hannan-Quinn criter.		-0.664828

Fuente: Elaboración propia.

El modelo de Eto para Chuquibambilla por máxima verosimilitud es

$$ETO = 0.572519 + 0.079193 TMIN + 0.162082 TMAX - 0.016624 HR \\ + 0.330768 VV + 0.094353 HS$$

La varianza de los errores es

$$\sigma_e^2 = 0.166105$$

4.1.8. Validación en la estación Chuquibambilla

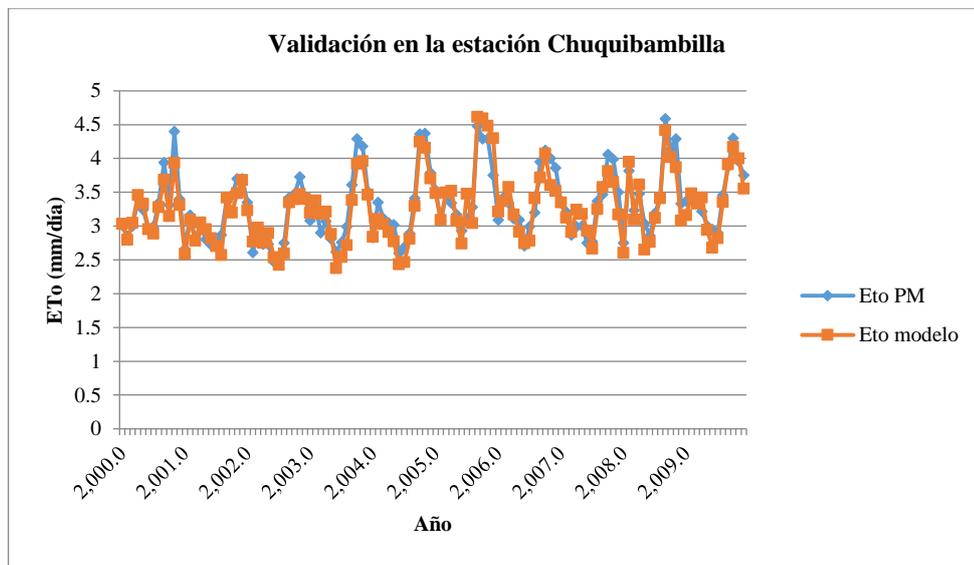


Figura 24: Validación del modelo en Chuquibambilla

4.1.9. Análisis de los elementos meteorológicos en la estación Taraco

Temperatura mínima

En la figura 25, se muestra el parámetro climático registrado en la Estación meteorológica de Taraco, ubicada a una altitud de 3829 msnm, registra la menor temperatura media mínima en promedio de la cuenca con 12.90 °C en el año 2001 y una temperatura media mínima promedio mayor valor de 18.90 °C en el año 1996, como se aprecia la distribución anual de la temperatura media mínima anual es análoga en la presente estación, con temperaturas mínimas en los meses de mayo hasta agosto (Taraco).

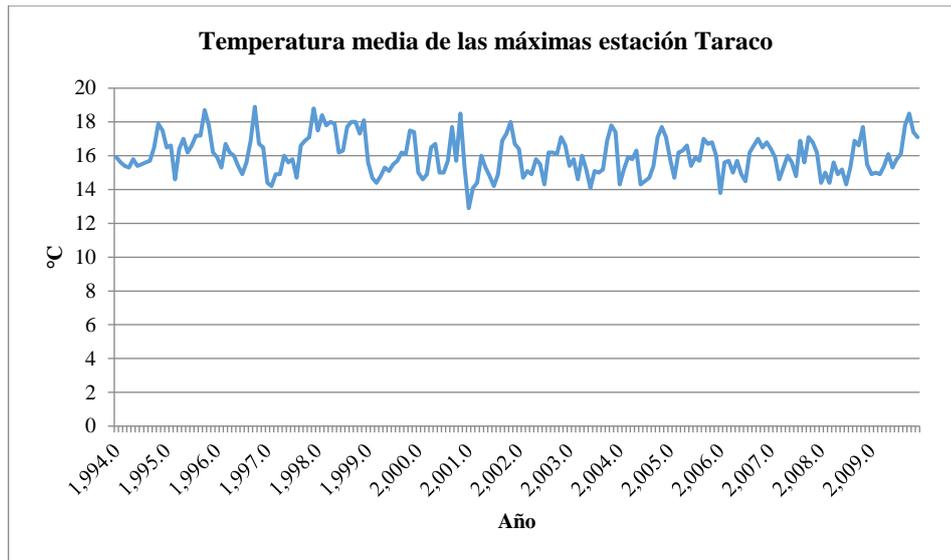


Figura 25: Temperatura media de las máximas estación Taraco.

Temperatura máxima

En la figura 26, se muestra que la temperatura media mínima viene disminuyendo los años 2003 a 2004 paulatinamente en los últimos años. Teniendo valores máximos promedios de 6.30 °C que se presenciaron en el año 2002 y 2005, asimismo, los valores mínimos promedio de -12.10 °C a inicios del año 2007 y 2009 con temperaturas mínimas entre los meses de abril a agosto (Taraco).

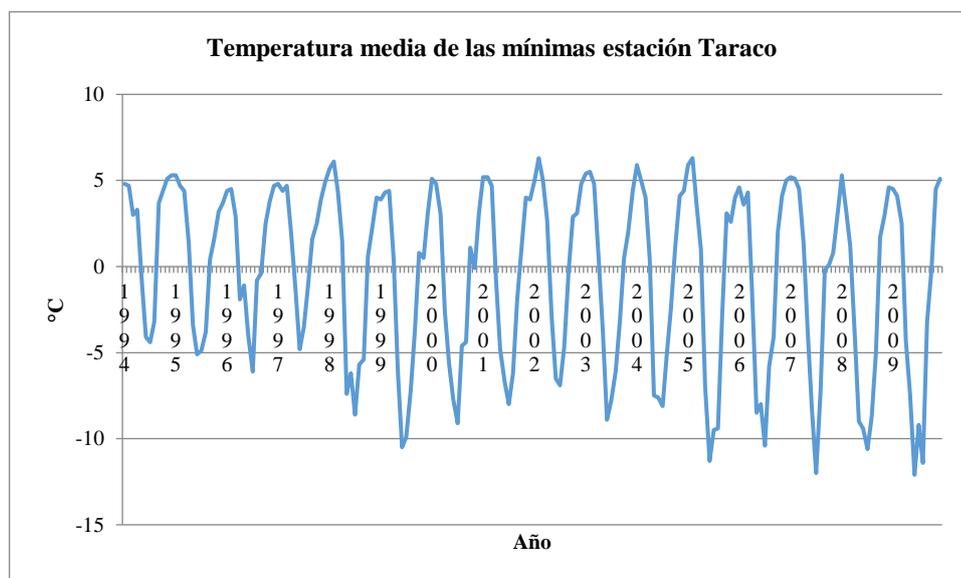


Figura 26: Temperatura media de las mínimas estación Taraco

Humedad relativa

Echarri, P. (2003) señala que, la humedad relativa es la relación entre la cantidad de vapor de agua contenido realmente en el aire estudiado (humedad absoluta) y el que podría llegar a contener si estuviera saturado (humedad de saturación). Se expresa en un porcentaje. Así, por ejemplo, una humedad relativa normal junto al mar puede ser del 90% lo que significa que el aire contiene el 90% del vapor de agua que puede admitir, mientras un valor normal en una zona seca puede ser de 30%.

La humedad relativa media es controlada en la estación meteorológica de Taraco, y otras estaciones dentro de la cuenca Ramis que se encuentran. Asimismo, su distribución anual se muestra en la figura 27, donde existe una variabilidad a lo largo de diferentes años, encontrándose un valor máximo de 91%, en el año 2008, con el periodo anual lluvioso (estación a mediana altitud dentro de la cuenca), y valores mínimos, 31% en los años 1994 y 32% en el año 1999 respectivamente (Taraco).

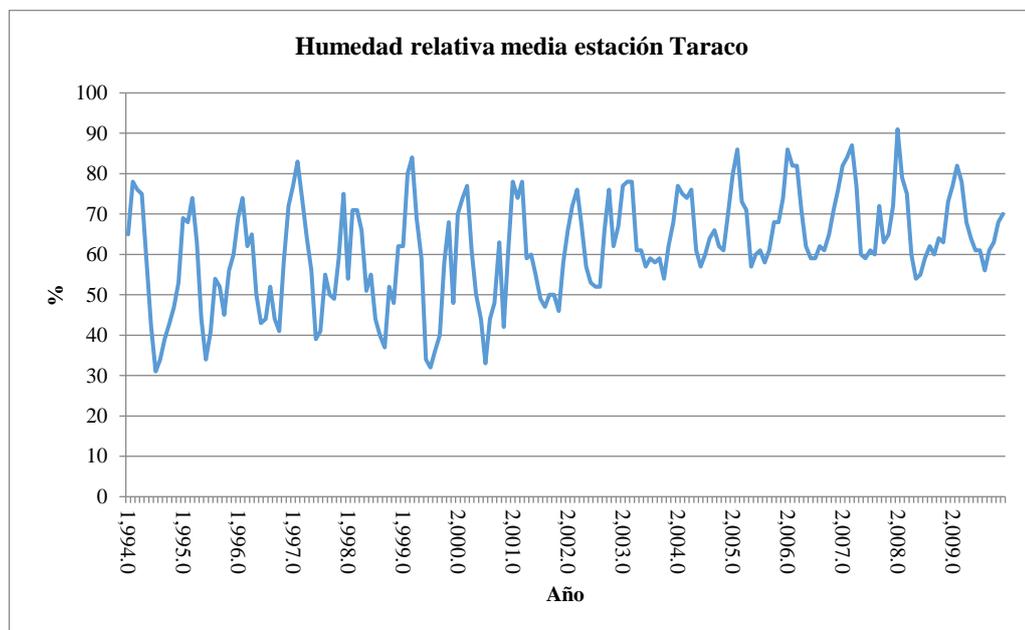


Figura 27: Humedad relativa media estación Taraco.

Velocidad del viento

En la figura 28, se describir esta variable en la se ha considerado la estación de Chuquibambilla que está ubicado en una altitud de 3954 msnm, las distribuciones de la velocidad media del viento son similares todos los años, con un valor máximo, del orden de 4.50 m/s el más alto valor se refleja a mediados del año 2006 y 3.55 m/s en los años 1990, y 2008 respectivamente y un valor mínimo, del orden de 1.00 m/s en los años 1977, 1985, 1988 y 2003 y 1.32 m/s los que reflejan en el año 1980, 1986 y 1989 (Chuquibambilla).

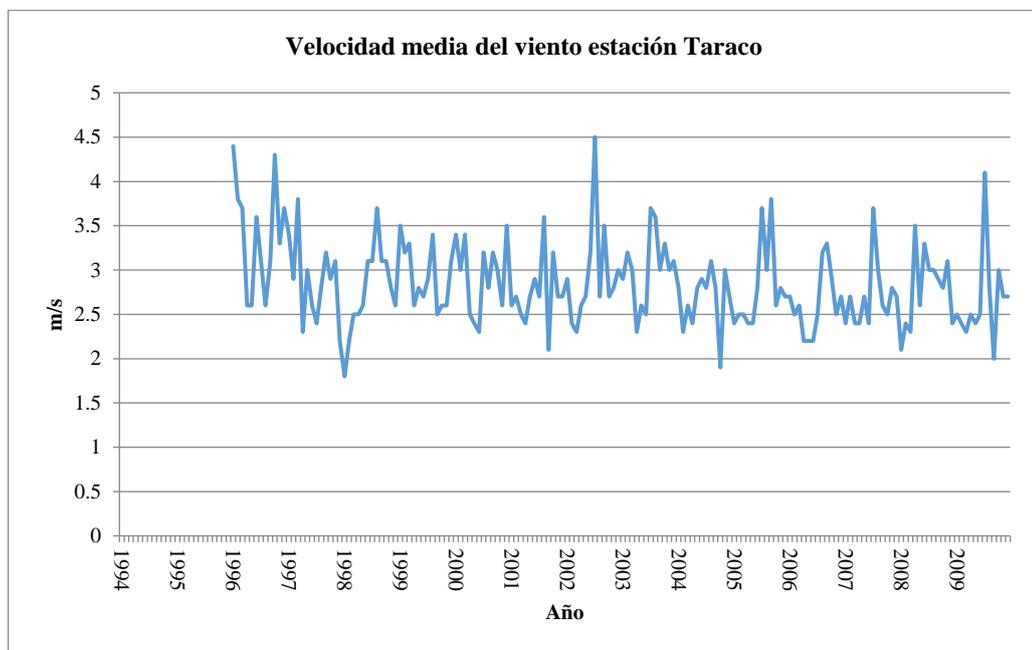


Figura 28: Velocidad media del viento estación Taraco

Evaporación

La evaporación es el proceso físico, mediante el cual el agua se convierte en su forma gaseosa. La evaporación del agua hacia la atmosfera ocurre desde la superficie de ríos, lagos, suelo y vegetación.

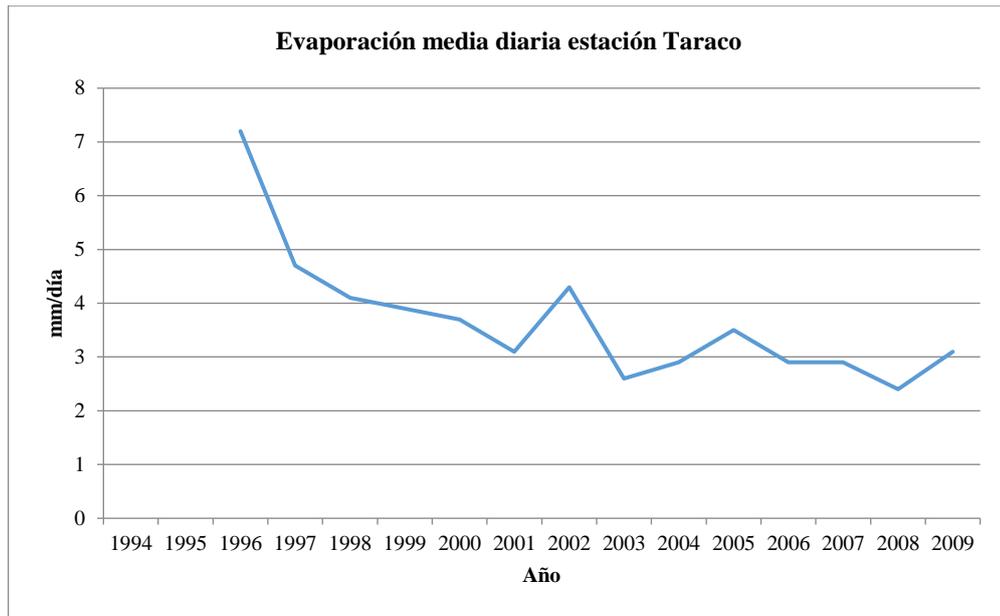


Figura 29: Evaporación media diaria estación Taraco

4.1.10. Determinación de la Eto en la estación Taraco

La evapotranspiración es la combinación de dos procesos: evaporación y transpiración. El termino evapotranspiración se utiliza para englobar tanto el proceso físico de pérdida de agua por evaporación como el proceso de evaporación del agua absorbida por las plantas (transpiración).

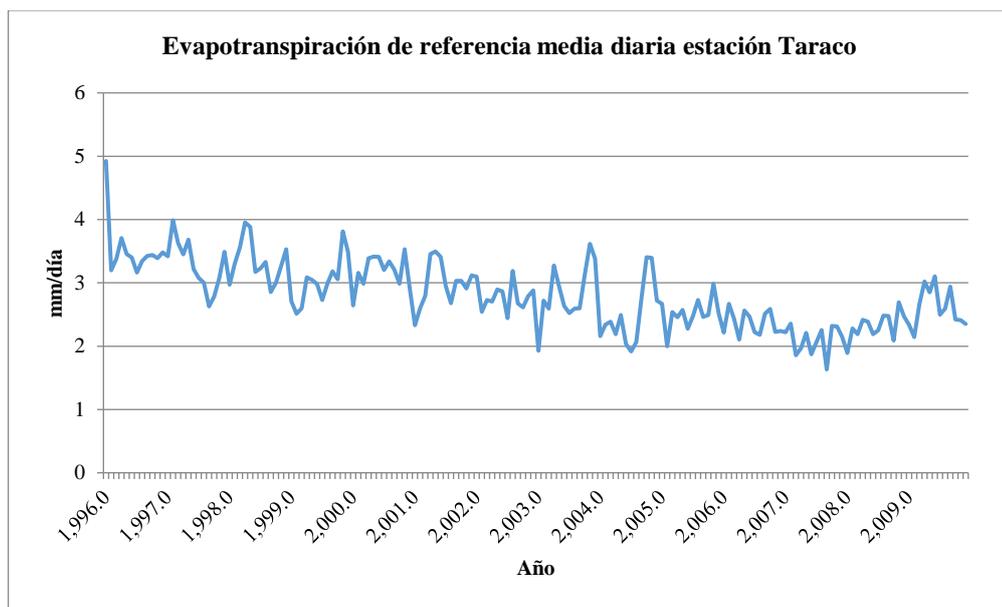


Figura 30. Evapotranspiración de referencia media diaria estación Taraco

4.1.11. Calibración del modelo en la estación Taraco

Tabla 12: Calibración del modelo en la estación Taraco por mínimos cuadrados ordinarios.

Dependent Variable	: ETO			
Method	: Least Squares			
Date	: 08/13/21	Time	: 11:24	
Sample	: 1 48			
Included observations	: 48			
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C(1)	-0.162797	0.031672	-5.140159	0.0000
C(2)	0.005922	0.000228	26.02954	0.0000
HR	-0.097689	0.004675	-20.89476	0.0000
VV	0.735211	0.004637	158.5620	0.0000
R-squared	0.998434	Mean dependent var	2.348912	
Adjusted R-squared	0.998328	S.D. dependent var	0.294496	
S.E. of regression	0.012044	Akaike info criterion	-5.920928	
Sum squared resid	0.006382	Schwarz criterion	-5.764995	
Log likelihood	146.1023	Durbin-Watson stat	1.779613	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13: Estimación de parámetros por máxima verosimilitud estación Taraco

LogL	: UNTITLED			
Method	: Maximum Likelihood (Marquardt)			
Date	: 08/13/21 Time: 11:33			
Sample	: 1 48			
Included observations	: 48			
Evaluation order	: By observation			
Convergence achieved after 10 iterations				

	Coefficient	Std. Error	z-Statistic	Prob.
C(1)	-0.162561	0.037054	-4.387102	0.0000
C(2)	0.005919	0.000243	24.37064	0.0000
C(3)	-0.097703	0.004428	-22.06468	0.0000
C(4)	0.735214	0.005181	141.9141	0.0000
C(5)	0.011566	0.001383	8.359824	0.0000

Log likelihood	146.1017	Akaike info criterion	-5.879237
Avg. log likelihood	3.043785	Schwarz criterion	-5.684320
Number of Coefs.	5	Hannan-Quinn criter.	-5.805578

Fuente: Elaboración propia.

El modelo de Eto para Taraco por máxima verosimilitud es

$$ETO = -0.1626 + 0.0059 * HR - 0.0977 * VV + 0.7352 * VVT$$

La varianza de los errores es

$$\sigma_e^2 = 0.0116$$

En la estación Taraco las variables más significativas son la humedad relativa, la velocidad del viento y la evaporación de tanque, para predecir la evapotranspiración de referencia en un modelo estimado con mínimos cuadrados ordinarios. El R^2 obtenido es de 0.9986 que muestra un buen ajuste de regresión.

En el modelo estimado por máxima verosimilitud se muestra que las variables más significativas son la humedad relativa, la velocidad del viento, la evaporación de tanque y también la varianza de los errores. En la etapa de validación del modelo estimado con máxima verosimilitud en Taraco se obtuvo un buen ajuste mostrando así que en esa estación el modelo provee buenos resultados.

4.1.12. Validación del modelo en la estación Taraco

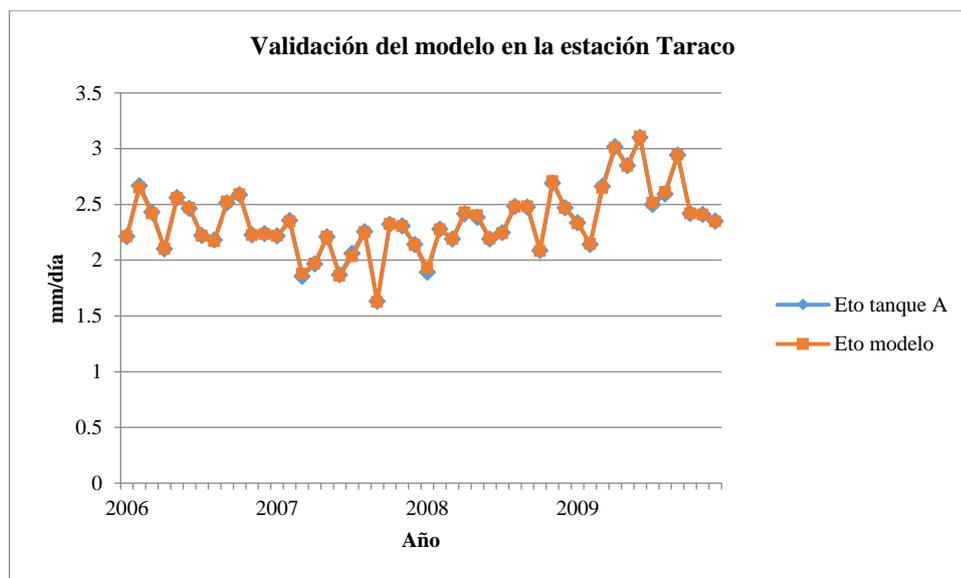


Figura 31: Validación del modelo en la estación Taraco



4.2. EVALUACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO A FIN DE DETERMINAR LA OFERTA Y DEMANDA DE AGUA PARA LOS CULTIVOS PRINCIPALES EN LAS SUBCUENCAS DEL RÍO RAMIS.

4.2.1. Evaluación del balance hídrico para los cultivos principales en las subcuencas del río Ramis

Balance hídrico para cultivos en la estación Ananea

En la estación Ananea se tiene la siguiente ETo para los promedios

Tabla 14: ETo en la estación Ananea para los promedios

Mes	Temp Min	Temp Max	Humedad	Viento	Insolación	Rad	ETo
	°C	°C	%	m/s	horas	MJ/m ² /día	mm/día
Enero	-0.9	9.6	86	2	3.9	16.4	2.48
Febrero	-0.8	10	86	1.9	4.8	17.5	2.6
Marzo	-1.2	10.2	85	2	5	17	2.5
Abril	-1.5	10.6	82	2.1	6.5	17.4	2.48
Mayo	-2.5	10.8	75	2	8.3	17.9	2.49
Junio	-3.9	10.3	76	2.2	8.9	17.4	2.3
Julio	-4	10.2	77	2.2	8.7	17.7	2.32
Agosto	-3.7	10.4	77	2.1	8.5	19.4	2.62
Septiembre	-3.5	10.1	80	2.4	7.4	19.9	2.74
Octubre	-2.2	10.6	83	2.3	6	19	2.76
Noviembre	-1.6	10.5	85	2	5.5	18.7	2.77
Diciembre	-1	9.9	87	2	4.2	16.9	2.53
Promedio	-2.2	10.3	82	2.1	6.5	17.9	2.55

Fuente: Elaboración propia.

Para el cálculo de la precipitación efectiva se utilizó el método del USDA en Cropwat.

Tabla 15. Precipitación efectiva diaria (mm) estación Ananea

	Precipit.	Prec. efec
	mm	mm
Enero	122.6	98.6
Febrero	103.8	86.6
Marzo	90.7	77.6
Abril	43.6	40.6
Mayo	16	15.6
Junio	7	6.9
Julio	5.4	5.4
Agosto	13.8	13.5
Septiembre	23.8	22.9
Octubre	46.3	42.9
Noviembre	58.9	53.4
Diciembre	93.9	79.8
Total	625.9	543.5

Fuente: Elaboración propia.

El kc del cultivo se tomó de la FAO y el tipo de suelo se tomó como media.

En la tabla 16 se muestra que en cuanto al balance hídrico en Ananea para la Alfalfa, se muestra que en los meses de abril hasta octubre hay una demanda de agua, puesto que la precipitación en los demás meses es suficiente para las necesidades de este cultivo.



Tabla 16. Requerimiento de agua por cada 10 días de la alfalfa en Ananea

Mes	Década	Etap	Kc	ETc	ETc	Prec. efec	Req.Riego
			coef	mm/día	mm/dec	mm/dec	mm/dec
Oct	2	Inic	0.4	1.11	11.1	14.7	0
Oct	3	Inic	0.4	1.11	12.2	15.7	0
Nov	1	Inic	0.4	1.11	11.1	16.2	0
Nov	2	Inic	0.4	1.11	11.1	17.1	0
Nov	3	Inic	0.4	1.08	10.8	20.3	0
Dic	1	Inic	0.4	1.04	10.4	23.9	0
Dic	2	Inic	0.4	1.01	10.1	26.9	0
Dic	3	Inic	0.4	1	11	28.9	0
Ene	1	Inic	0.4	1	10	31.7	0
Ene	2	Inic	0.4	0.99	9.9	34.3	0
Ene	3	Inic	0.4	1.01	11.1	32.5	0
Feb	1	Inic	0.4	1.03	10.3	30.1	0
Feb	2	Inic	0.4	1.04	10.4	28.8	0
Feb	3	Inic	0.4	1.03	8.2	27.8	0
Mar	1	Des	0.4	1.02	10.2	27.7	0
Mar	2	Des	0.52	1.31	13.1	27.2	0
Mar	3	Des	0.72	1.81	19.9	22.6	0
Abr	1	Med	0.92	2.29	22.9	17.3	5.6
Abr	2	Med	0.97	2.42	24.2	13	11.2
Abr	3	Med	0.97	2.42	24.2	10.4	13.8
May	1	Med	0.97	2.42	24.2	7.5	16.7



May	2	Med	0.97	2.42	24.2	4.5	19.7
May	3	Med	0.97	2.36	25.9	3.7	22.2
Jun	1	Med	0.97	2.29	22.9	3.1	19.9
Jun	2	Med	0.97	2.23	22.3	2	20.3
Jun	3	Med	0.97	2.24	22.4	1.9	20.5
Jul	1	Med	0.97	2.25	22.5	1.7	20.8
Jul	2	Med	0.97	2.26	22.6	1.4	21.2
Jul	3	Med	0.97	2.36	25.9	2.4	23.5
Ago	1	Med	0.97	2.45	24.5	3.6	20.9
Ago	2	Med	0.97	2.54	25.4	4.5	21
Ago	3	Med	0.97	2.58	28.4	5.5	22.9
Sep	1	Fin	0.97	2.62	26.2	6.3	19.9
Sep	2	Fin	0.96	2.62	26.2	7.2	19.1
Sep	3	Fin	0.94	2.59	25.9	9.6	16.4
Oct	1	Fin	0.93	2.56	25.6	12.3	13.3
					657.6	544	349

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17: Requerimiento de agua por cada 10 días de la cebada en Ananea

Mes	Decada	Etapa	Kc	ETc	ETc	Prec. efec	Req.Riego
			coef	mm/día	mm/dec	mm/dec	mm/dec
Oct	2	Inic	0.3	0.83	8.3	14.7	0
Oct	3	Des	0.36	1.01	11.1	15.7	0
Nov	1	Des	0.69	1.91	19.1	16.2	3
Nov	2	Med	1.03	2.85	28.5	17.1	11.4
Nov	3	Med	1.15	3.09	30.9	20.3	10.6
Dic	1	Med	1.15	2.99	29.9	23.9	6
Dic	2	Med	1.15	2.9	29	26.9	2
Dic	3	Med	1.15	2.88	31.7	28.9	2.8
Ene	1	Fin	1.14	2.84	28.4	31.7	0
Ene	2	Fin	0.92	2.29	22.9	34.3	0
Ene	3	Fin	0.61	1.53	16.9	32.5	0
Feb	1	Fin	0.34	0.87	6.1	21.1	0
					262.7	283.2	35.8

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 17 se muestra que en cuanto al balance para la cebada en Ananea hay un requerimiento de agua en los meses de noviembre y diciembre y en los demás hay cobertura de la necesidad por la lluvia.



En la tabla 18 se muestra que en Ananea el balance hídrico muestra que el requerimiento de agua para papa es en los meses de noviembre y diciembre, los demás meses la lluvia satisface el requerimiento.

Tabla 18. Requerimiento de agua por cada 10 días de la papa en Ananea

Mes	Decada	Etapa	Kc	ETc	ETc	Prec. efec	Req.Riego
			coef	mm/día	mm/dec	mm/dec	mm/dec
Oct	2	Inic	0.5	1.38	13.8	14.7	0
Oct	3	Inic	0.5	1.38	15.2	15.7	0
Nov	1	Des	0.55	1.51	15.1	16.2	0
Nov	2	Des	0.75	2.08	20.8	17.1	3.7
Nov	3	Des	0.96	2.59	25.9	20.3	5.7
Dic	1	Med	1.13	2.95	29.5	23.9	5.6
Dic	2	Med	1.14	2.89	28.9	26.9	2
Dic	3	Med	1.14	2.87	31.6	28.9	2.7
Ene	1	Med	1.14	2.85	28.5	31.7	0
Ene	2	Fin	1.14	2.82	28.2	34.3	0
Ene	3	Fin	1.04	2.62	28.8	32.5	0
Feb	1	Fin	0.9	2.3	23	30.1	0
Feb	2	Fin	0.78	2.04	14.3	20.1	0
					303.8	312.3	19.6

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 19 se refleja también en Ananea que para el trigo el balance hídrico muestra requerimiento de agua en noviembre y diciembre, siendo la lluvia quien abastece los demás meses hasta la cosecha.

Tabla 19. Requerimiento de agua por cada 10 días del trigo en Ananea

Mes	Década	Etapa	Kc coef	ETc mm/día	ETc mm/dec	Prec. efec mm/dec	Req.Riego mm/dec
Oct	2	Inic	0.3	0.83	8.3	14.7	0
Oct	3	Inic	0.3	0.83	9.1	15.7	0
Nov	1	Des	0.3	0.84	8.4	16.2	0
Nov	2	Des	0.48	1.34	13.4	17.1	0
Nov	3	Des	0.76	2.06	20.6	20.3	0.3
Dic	1	Med	1.04	2.72	27.2	23.9	3.3
Dic	2	Med	1.14	2.89	28.9	26.9	1.9
Dic	3	Med	1.14	2.87	31.6	28.9	2.7
Ene	1	Med	1.14	2.85	28.5	31.7	0
Ene	2	Fin	1.14	2.81	28.1	34.3	0
Ene	3	Fin	0.92	2.32	25.5	32.5	0
Feb	1	Fin	0.62	1.6	16	30.1	0
Feb	2	Fin	0.38	1	7	20.1	0
					252.6	312.3	8.2

Fuente: Elaboración propia.

Balance hídrico para cultivos en la estación Chuquibambilla**Tabla 20.** Eto para valores promedio en la estación Chuquibambilla

Mes	Temp Min °C	Temp Max °C	Humedad %	Viento km/día	Insolación horas	Rad MJ/m ² /día	ETo mm/día
Enero	2.4	15.8	67	2	4.7	17.7	3.05
Febrero	2.6	15.8	68	2	5.5	18.7	3.17
Marzo	2	15.9	68	2	5.7	18.1	3.01
Abril	-0.5	16.2	62	2	7.2	18.4	2.85
Mayo	-5.5	15.8	56	2	8.7	18.4	2.51
Junio	-9.1	15.3	53	2	8.7	17.2	2.13
Julio	-9.8	15.3	51	2	9.1	18.2	2.21
Agosto	-7.8	16.4	49	2	8.6	19.5	2.57
Septiembre	-3.9	17.1	51	2	8	20.8	3.04
Octubre	-1.6	17.8	52	2	7.4	21.3	3.37
Noviembre	-0.4	17.9	55	2	7	21.1	3.48
Diciembre	1.2	16.8	61	2	5.9	19.6	3.32
Promedio	-2.5	16.4	58	2	7.2	19.1	2.89

Fuente: Elaboración propia.



Tabla 21. Precipitación efectiva diaria (mm) estación Chuquibambilla

	Precipit.	Prec. efec
	mm	mm
Enero	148.6	113.3
Febrero	120.5	97.3
Marzo	120.1	97
Abril	49.6	45.7
Mayo	9.7	9.5
Junio	3	3
Julio	1.6	1.6
Agosto	5.2	5.2
Septiembre	19.9	19.3
Octubre	46.1	42.7
Noviembre	65.9	58.9
Diciembre	113	92.6
Total	703.2	586

Fuente: Elaboración propia.



Tabla 22. Requerimiento de agua por cada 10 días de la alfalfa en Chuquibambilla

En la tabla 22 se muestra que en Chuquibambilla el balance hídrico muestra que: para alfalfa el requerimiento de agua es en abril, mayo, junio, julio, agosto, setiembre y octubre, los demás meses la lluvia satisface los requerimientos.

Mes	Década	Etap	Kc	ETc	ETc	Prec. efec	Req.Riego
			coef	mm/día	mm/dec	mm/dec	mm/dec
Oct	2	Inic	0.4	1.35	13.5	14.5	0
Oct	3	Inic	0.4	1.36	15	16.2	0
Nov	1	Inic	0.4	1.38	13.8	17.3	0
Nov	2	Inic	0.4	1.4	14	18.8	0
Nov	3	Inic	0.4	1.37	13.7	22.9	0
Dic	1	Inic	0.4	1.35	13.5	27.5	0
Dic	2	Inic	0.4	1.32	13.2	31.5	0
Dic	3	Inic	0.4	1.29	14.2	33.6	0
Ene	1	Inic	0.4	1.25	12.5	36.6	0
Ene	2	Inic	0.4	1.22	12.2	39.5	0
Ene	3	Inic	0.4	1.24	13.6	37.1	0
Feb	1	Inic	0.4	1.25	12.5	33.7	0
Feb	2	Inic	0.4	1.27	12.7	31.7	0
Feb	3	Inic	0.4	1.25	10	31.9	0
Mar	1	Des	0.4	1.23	12.3	34	0
Mar	2	Des	0.52	1.57	15.7	34.7	0
Mar	3	Des	0.72	2.12	23.3	28.2	0
Abr	1	Med	0.91	2.64	26.4	20.5	5.9



Abr	2	Med	0.96	2.74	27.4	14.5	12.9
Abr	3	Med	0.96	2.63	26.3	10.7	15.6
May	1	Med	0.96	2.52	25.2	6.3	18.9
May	2	Med	0.96	2.4	24	1.8	22.2
May	3	Med	0.96	2.29	25.1	1.5	23.6
Jun	1	Med	0.96	2.17	21.7	1.6	20.1
Jun	2	Med	0.96	2.05	20.5	0.8	19.7
Jun	3	Med	0.96	2.07	20.7	0.7	20
Jul	1	Med	0.96	2.1	21	0.6	20.4
Jul	2	Med	0.96	2.12	21.2	0.3	20.9
Jul	3	Med	0.96	2.23	24.6	0.8	23.8
Ago	1	Med	0.96	2.35	23.5	1	22.5
Ago	2	Med	0.96	2.46	24.6	1.3	23.4
Ago	3	Med	0.96	2.62	28.8	3	25.8
Sep	1	Fin	0.96	2.76	27.6	4.6	23
Sep	2	Fin	0.94	2.87	28.7	6	22.6
Sep	3	Fin	0.93	2.92	29.2	8.8	20.4
Oct	1	Fin	0.91	2.96	29.6	11.8	17.8
					711.6	586.5	379.4

Fuente: Elaboración propia.



En la tabla 23 se muestra que en estación perteneciente a Chuquibambilla el balance hídrico muestra que para la cebada los requerimientos son en noviembre y diciembre, con los demás meses satisfechos por la lluvia.

Tabla 23. Requerimiento de agua por cada 10 días de la cebada en Chuquibambilla

Mes	Década	Etapa	Kc	ETc	ETc	Prec. efec	Req.Riego
			coef	mm/día	mm/dec	mm/dec	mm/dec
Oct	2	Inic	0.3	1.01	10.1	14.5	0
Oct	3	Des	0.36	1.24	13.6	16.2	0
Nov	1	Des	0.68	2.34	23.4	17.3	6.1
Nov	2	Med	1	3.51	35.1	18.8	16.2
Nov	3	Med	1.12	3.85	38.5	22.9	15.7
Dic	1	Med	1.12	3.78	37.8	27.5	10.3
Dic	2	Med	1.12	3.71	37.1	31.5	5.7
Dic	3	Med	1.12	3.62	39.8	33.6	6.2
Ene	1	Fin	1.11	3.49	34.9	36.6	0
Ene	2	Fin	0.91	2.76	27.6	39.5	0
Ene	3	Fin	0.6	1.85	20.4	37.1	0
Feb	1	Fin	0.34	1.06	7.4	23.6	0
					325.7	319.1	60.2

Fuente: Elaboración propia.



En la tabla 24 se muestra que en estación perteneciente a Chuquibambilla el balance hídrico muestra que para la papa se requiere agua en octubre, noviembre y diciembre, los demás meses la lluvia satisface las necesidades del cultivo.

Tabla 24. Requerimiento de agua por cada 10 días de la papa en Chuquibambilla

Mes	Década	Etapa	Kc coef	ETc mm/día	ETc mm/dec	Prec. efec mm/dec	Req.Riego mm/dec
Oct	2	Inic	0.5	1.68	16.8	14.5	2.3
Oct	3	Inic	0.5	1.7	18.7	16.2	2.5
Nov	1	Des	0.54	1.87	18.7	17.3	1.4
Nov	2	Des	0.74	2.57	25.7	18.8	6.9
Nov	3	Des	0.94	3.24	32.4	22.9	9.5
Dic	1	Med	1.11	3.73	37.3	27.5	9.8
Dic	2	Med	1.12	3.7	37	31.5	5.6
Dic	3	Med	1.12	3.61	39.7	33.6	6.1
Ene	1	Med	1.12	3.51	35.1	36.6	0
Ene	2	Fin	1.12	3.41	34.1	39.5	0
Ene	3	Fin	1.01	3.13	34.4	37.1	0
Feb	1	Fin	0.87	2.72	27.2	33.7	0
Feb	2	Fin	0.75	2.39	16.7	22.2	0
					373.9	351.4	44.2

Fuente: Elaboración propia.



En la tabla 25 se muestra que en estación perteneciente a Chuquibambilla el balance hídrico muestra que para el trigo se requiere agua es en noviembre y diciembre, los demás meses la lluvia satisface las necesidades del trigo.

Tabla 25. Requerimiento de agua por cada 10 días del trigo en Chuquibambilla

Mes	Decada	Etapa	Kc	ETc	ETc	Prec. efec	Req.Riego
			coef	mm/día	mm/dec	mm/dec	mm/dec
Oct	2	Inic	0.3	1.01	10.1	14.5	0
Oct	3	Inic	0.3	1.02	11.2	16.2	0
Nov	1	Des	0.3	1.04	10.4	17.3	0
Nov	2	Des	0.48	1.66	16.6	18.8	0
Nov	3	Des	0.75	2.56	25.6	22.9	2.8
Dic	1	Med	1.02	3.42	34.2	27.5	6.7
Dic	2	Med	1.12	3.68	36.8	31.5	5.4
Dic	3	Med	1.12	3.59	39.5	33.6	5.9
Ene	1	Med	1.12	3.5	35	36.6	0
Ene	2	Fin	1.11	3.38	33.8	39.5	0
Ene	3	Fin	0.9	2.77	30.5	37.1	0
Feb	1	Fin	0.61	1.92	19.2	33.7	0
Feb	2	Fin	0.38	1.21	8.5	22.2	0
					311.5	351.4	20.8

Fuente: Elaboración propia.



V. CONCLUSIONES

En la calibración la información de la estación Ananea los coeficientes de regresión de la temperatura mínima y máxima son estadísticamente significativos al nivel de significancia de 0.05, sin embargo, de humedad relativa, velocidad del viento y horas de insolación no son significativos. El coeficiente de determinación (r^2) de 0.34, indica que el 34% de la varianza de la evapotranspiración de referencia es explicado por el modelo de regresión lineal. El valor de r^2 es relativamente bajo, por lo que se realizó pruebas de normalidad de las variables regresionado y luego se ha transformado las variables no normales. Los resultados de regresión lineal por mínimos cuadrados con datos transformados, muestran que la temperatura media de las mínimas, máximas y la velocidad del viento son estadísticamente significativas al 0.05 de significancia. La transformación ha aumentado poco el coeficiente de determinación elevándolo a 37%. Se pasó a estimar por máxima verosimilitud los parámetros del modelo. En la etapa de validación en Ananea el modelo muestra un desempeño deficiente.

En la estación Chuquibambilla según la estimación por mínimos cuadrados el coeficiente de determinación de 88.7% es alto por lo cual el modelo es muy adecuado, por lo que no hay necesidad de transformar variables. También, se muestra que todas las variables son estadísticamente significativas al 0.05 de significancia. Se pasó a la estimación por máxima verosimilitud y en la validación se muestra una buena correspondencia entre la evapotranspiración de referencia estimada con Penman-Monteith y por el modelo. Asimismo, en Taraco la estimación por mínimos cuadrados presenta un coeficiente de determinación alto de 99.9%. En Taraco la humedad relativa, la velocidad del viento y la evaporación son altamente significativas al 0.05 de



significancia con máxima verosimilitud y la validación, correspondencia muy buena entre la evapotranspiración por el método del tanque y por el modelo.

En cuanto al balance hídrico en Ananea para la Alfalfa, se muestra que en los meses de abril hasta octubre hay una demanda de agua, puesto que la precipitación en los demás meses es suficiente para las necesidades de este cultivo. En cuanto al balance para la cebada en Ananea hay un requerimiento de agua en los meses de noviembre y diciembre y en los demás hay cobertura de la necesidad por la lluvia tanto para la papa, trigo. En Chuquibambilla el balance hídrico muestra que: para alfalfa el requerimiento de agua es en abril, mayo, junio, julio, agosto, setiembre y octubre, los demás meses la lluvia satisface los requerimientos; para cebada y papa presentan necesidades de agua desde noviembre a diciembre y trigo se requiere agua desde octubre a diciembre, los demás meses la lluvia satisface las necesidades del cultivo.



VI. RECOMENDACIONES

Realizar la estimación de parámetros por máxima verosimilitud en otras zonas del altiplano para obtener modelos más prácticos y de poco requerimiento de datos para estimar la evapotranspiración de referencia.

Investigar el balance hídrico de cultivos en otras cuencas de la vertiente del lago Titicaca a nivel de campo y determinar las necesidades reales de los cultivos, puesto que la precipitación efectiva cubre gran parte de las necesidades de agua.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcántara R. J. (1986). “Cálculo de la demanda de Agua de un proyecto de riego”
Asociación de Ingenieros Agrícolas del Perú. Curso de Hidrología Aplicada. Lima
–Perú.
- 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.
- Aparicio Mijares, F.J. (1992). “Fundamentos de Hidrología de Superficie” Editorial
Limusa S.A. de C.V. Grupo Noriega Editores – México.
- ASCE-EWRI. (2005). The ASCE standardized referent crop evapotranspiration equation.
Reston: Technical Committee Report on Environmental and Water Resource
Institute of the American Society of Civil Engineers from the Task Committee on
Standardization of Reference Evapotranspiration, 70 pp.
- Belizario, G. (2014). *Impactos del cambio climático en la agricultura de la cuenca Ramis,*
Puno-Perú [Universidad Nacional del Altiplano].
<http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/256>
- Belizario, G. (2015). Efectos del cambio climático en la agricultura de la cuenca Ramis,
Puno-Perú. *Rev. Investig. Altoandin.*, 17(1), 47–52.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18271/ria.2015.77>
- Belizario, G., Huaquisto, E., & Chirinos, T. (2013a). Efectos del cambio climático en la
temperatura y precipitación - Capachica, Perú. *Revista de Investigaciones*
Altoandinas, 15(4), 15–24.
- Belizario, G., Huaquisto, E., & Chirinos, T. (2013b). Influencia del cambio climático en



- los elementos climáticos de la cuenca del río Coata-Puno. *Revista Investigaciones Altoandinas*, 15(1), 35–54.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5607224>
- Buytaert, W., Celleri, R., De Bievre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Sci. Rev.* 79, 53–72.
- Camargo, A., & Sentelhas, P. (1997). Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.5, n.1, p.89-97. DOI <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662007000600006>.
- Chang – Navarro L. (1993). “El Manejo de las Cuencas Hidrográficas en el Perú” Proyecto Fomento de la Transferencia de la Tecnología. Lima- Perú 12 Pág.
- Chavarri, Eduardo A. (2005). “Apuntes del curso de Modelos Matemáticos en Hidrología”. Maestría en Recursos Hídricos. UNALM. Lima. Perú.
- Chereque M, W. (1989). “Hidrología” CONCYTEC Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima – Perú. 146. Pág.
- Chow, V.; Maidament, D. y Mays, L. (1994). “Hidrología Aplicada”. Ed. Mc Graw Hill. Interamericana S.A. (trad.) Impreso D’VINNI Editorial Ltda. Santa Fé Bogotá D. C. Colombia 571 Pág.
- 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.



- Dourojeanni R.A. “Principios para Elaborar un Plan de Protección de Cuencas”, boletín técnico N° 11 Ministerio de Agricultura Lima – Perú 24.Pág. (1978).
- 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.
- Fuentes Yague. J. L. (1996). “Técnicas de Riego” Segunda Edición. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid España. 471 Pág.
- Hydrologic Engineering Center, (2003). “HEC-FIA, Flood Impact Analysis, User’s Manual, April 2003, CPD-81”, U. S. Army Corps of Engineers, Davis, CA.
- INRENA. (2008). Actualización del balance hídrico de la cuenca del río Ramis. Ayaviri Melgar Puno: Ministerio de Agricultura Instituto Nacional de Recursos Naturales Intendencia de Recursos Hídricos Administración Técnica del Distrito de Riego Ramis.
- Jensen, M. E., Burman, R. D., & Allen, R. G. (1990). Evapotranspiration and irrigation water requirements. New York: American Society of Civil Engineers (ASCE Manuals and Report on Engineering Practice, 70), 332 p.
- Laqui, W. (2013). Estimación de la evapotranspiración de referencia ETo utilizando modelos de Redes Neuronales Artificiales en Llachahui. Puno Peru: II simposio internacional del lago Titicaca TDP. ALT.
- Martinez, R., Boueri, M., & Escalona, P. (2005). Correlación entre la evaporación en tina y la evapotranspiración de referencia en cinco estaciones climatológicas de Venezuela. Bioagro, Barquisimeto, v.17, n.2, p.79-83.
- Mejía M. A. (2001). “Hidrología Aplicada” Vol. I Lima – Perú 108 Pág.



- Mijares, F. J. (1989). Fundamentos de hidrología de superficie. Limusa.
- Miller, I. Freund, J. Jonson R. (1992). “Probabilidad y Estadística para Ingenieros”.
Primera Edición. PRENTICE-HALL HISPANOAMERICANA, S.A. México.
- Olarte H, W. (1987). Manual de Riego por Gravedad, CCTA, Lima, Perú.
- ONERN. (1980). “Inventario y Evaluación Nacional de las Aguas Superficiales” Lima –
Perú.
- ONERN. (1980). “Plan Nacional de Ordenamiento de los Recursos Hidráulicos del Perú
– Bases Metodológicas, OEA – CIDIAT – ONERN, Lima – Perú.
- Ponce V. M. (1989). “Engineering Hydrology – Principles and Practices”. Prentice Hall.
San Diego State University. EE.UU.
- Samani, Z. (2000). Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum
climatological data. J. Irrig. Drain. Eng. 126 (4): 265-267. DOI
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2000\)126:4\(265\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2000)126:4(265)).
- Santayana V.S. (1990). “Ingeniería de Recursos Hídricos” Departamento de Recursos
Agua y Tierra de UNALM Lima – Perú.
- Silva, T. J., Montenegro, A. A., Rodriguez, J. J., & Bonfim, E. (2003). Aplicação de
lisímetro de pesagem hidráulica na determinação da evapotranspiração de
referência, em Petrolina - PE. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, 23(3), 511-520.
- Vásquez V. A. (2000). “Manejo De Cuencas Alto andinas” Tomo I Impreso en Perú.
512 Pág.



- Vega, E. C., & Jara, J. C. (2006). Estimación de la evapotranspiración de referencia utilizando la temperatura del aire en dos regiones del Ecuador. Guayaquil: Actas: Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2006. 1 CD-ROM.
- Villacis, F. (2001). Estudio meteorológico de la Provincia de Manabí. Portoviejo: Tesis (Ingeniero Agrónomo) - Facultad de Ingeniería Agronómica, Universidad Técnica de Manabí.
- Yoder, R., Odhiambo, L., & Wright, W. (2005). Evaluation of methods for estimating daily reference crop evapotranspiration at a site in the humid southeast United States. *Appl. Eng. Agric.* 21(2), 197-202. DOI: <https://digitalcommons.unl.edu/biosysengfacpub>.



ANEXOS

Anexo 1: Temperatura media de las máximas (°C) estación Ananea

AÑOS	ENE	FEB	MAR	ABRL	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
2002	X	X	X	X	X	X	X	9.2	9.6	10.2	10.4	10.6
2003	9.8	9.9	9.4	10.4	10.5	10.2	9.8	9.6	10.1	11.1	10.9	10.4
2004	8.7	9.9	11	11	10.8	9.2	8.7	9.6	9.3	10.7	10.4	9.5
2005	10.4	9.5	10.7	11.3	11.5	10.7	11.3	11	10.9	10.4	10.6	9.6
2006	9.5	10.5	10.6	10.6	10.9	10.1	10.4	10.7	10.7	10.6	10.3	10.1
2007	10.6	10	9.5	10.3	11.2	11.7	10.4	11.3	8.7	10.3	10.2	9.5
2008	8.6	9.4	9.3	9.9	9.7	10.1	10.5	11.1	10.4	10.3	11.1	9.9
2009	9.5	10	10.2	10.1	10.5	10.3	10.1	10.8	11.1	11.5	10.4	9.9
2010	10	10.7	10.7	10.9	11.2							
media	9.64	9.99	10.18	10.56	10.79	10.33	10.17	10.41	10.10	10.64	10.54	9.94

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2: Temperatura media de las mínimas (°C) estación Ananea

AÑOS	ENE	FEB	MAR	ABRL	MAY	JUN	JUL	AGOT	SET	OCT	NOV	DIC
2002	X	X	X	X	X	X	X	-3.4	-2.4	-1.3	-1.3	0.1
2003	0.6	0.5	0.1	-0.3	-1.8	-3.2	-3.4	-3.5	-2.9	-1.6	-1.3	0.4
2004	0.3	0.1	-0.1	-0.5	-1.8	-3.7	-4	-3.7	-3.5	-1.7	-0.5	-0.3
2005	0	0.7	0.1	-0.4	-1.5	-4.1	-4.2	-3.9	-3.3	-1	-0.5	-0.2
2006	0	0	-0.3	-1.7	-3.1	-3	-4.6	-4.4	-3.9	-5	-3.3	-4.1
2007	-4.1	-3.5	-4.5	-3.5	-4.9	-5.2	-4	-3.6	-3.4	-2	-1.2	-1.2
2008	-0.8	-1.9	-1.3	-1.6	-3	-3.8	-4.2	-3.3	-6	-2.4	-3	-2.1
2009	-1.7	-1.5	-2.4	-2	-1.8	-4.1	-3.3	-4.1	-2.7	-2.6	-2	-0.8
2010	-1.2	-0.8	-1.3	-1.7	-1.9							
media	-0.86	-0.80	-1.21	-1.46	-2.48	-3.87	-3.96	-3.74	-3.51	-2.20	-1.64	-1.03

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 3: Humedad relativa media (%) estación Ananea

AÑOS	ENE	FEB	MAR	ABRL	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
2002	X	X	X	X	X	X	X	89	87	87	90	98
2003	88	87	88	83	76	74	73	75	83	80	86	91
2004	88	89	85	81	68	77	75	80	84	89	86	83
2005	84	90	90	84	78	79	77	75	72	84	85	86
2006	87	82	81	81	70	77	79	73	71	79	81	83
2007	82	82	84	82	76	67	74	67	78	79	79	79
2008	86	86	84	80	75	80	80	75	76	83	84	86
2009	84	83	84	86	82	80	80	82	86	82	88	89
media	85.57	85.57	85.14	82.43	75.00	76.29	76.86	77.00	79.63	82.88	84.88	86.88

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 4: Velocidad Media del Viento (m/s) Estación Ananea

AÑOS	ENE	FEB	MAR	ABRL	MAY	JUN	JUL	AGOT	SET	OCT	NOV	DIC
2002	X	X	X	X	X	X	X	2.1	1.5	2.5	1.8	2.1
2003	2	2.2	1.5	1.9	1.6	1.5	3	1.9	2.1	2.2	1.8	2.1
2004	2.2	1.7	1.9	1.6	2.1	1.6	1.4	2.1	2	2.1	1.8	1.9
2005	1.8	1.8	2	2	2.1	2.4	1.9	2.1	2.8	2.1	1.8	2
2006	1.7	1.8	2	1.9	2	1.9	1.9	2.2	2.2	2.5	1.8	1.8
2007	2.2	2	2.2	2.1	1.7	3.8	2.3	2.2	2.6	2.1	1.9	1.9
2008	2.4	2.1	2.4	2.2	1.9	2.1	2.7	1.9	2.9	2.5	2.6	2
2009	1.7	1.9	2.1	2.5	2.4	2.1	2.5	2.5	2.9	2	2.4	2.2
2010	1.8	2.1	2.3	2.3	2.3							
media	1.98	1.95	2.05	2.06	2.01	2.20	2.24	2.13	2.38	2.25	1.99	2.00

Fuente: Elaboración propia.



Anexo 5: Horas de sol (h/mes), estación Ananea

AÑOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
2002	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	183	134.7
2003	121.7	123.1	113.4	211	257	274.9	269.8	264.6	220.7	237.9	198.7	153.2
2004	109.3	156.8	152.9	222.4	286.7	231.3	266.2	235	195.4	213.7	170.4	125.7
2005	113.7	115.8	198.6	208.1	270.5	289.7	287.6	279.8	248.6	179.8	144.2	129.7
2006	139.7	138.9	168.4	178.6	290.3	235.9	267.5	240.6	234.5	172	148.1	126
2007	124.9	106.1	122.4	154.5	220.2	279.5	239.7	284.1	202.7	164.8	153.6	142
2008	78.9	142.9	153.7	193.3	264.4	273.3	293.4	274.6	235.4	190.2	184	121.7
2009	162.3	149.6	180.5	187.8	218.7	279.1	257.9	268.1	222	139.5	147.9	114

Fuente: Elaboración propia.