



PROYECTO DE INVESTIGACIÓN CON EL FINANCIAMIENTO DEL FEDU 2022

1. Título del proyecto

Calibración del exponente de la ecuación de Hargreaves y Samani para el cálculo de la evapotranspiración de referencia bajo condiciones climáticas de la región Puno

2. Área de Investigación

Área de investigación	Línea de Investigación	Disciplina OCDE
Ingeniería	Recursos naturales y medio ambiente	Recursos hídricos

3. Duración del proyecto (meses)

12 meses

4. Tipo de proyecto

Individual	☐
Multidisciplinario	☒
Director de tesis pregrado	☐

5. Datos de los integrantes del proyecto

Apellidos y Nombres	MAMANI LUQUE OSCAR RAUL
Escuela Profesional	INGENIERIA AGRICOLA
Celular	999 992009
Correo Electrónico	omamanil@unap.edu.pe

Apellidos y Nombres	GONZALES GONZALES VICTOR ANDRES
Escuela Profesional	INGENIERIA AGRONOMICA
Celular	950 926151
Correo Electrónico	Vigogo09@hotmail.com

Apellidos y Nombres	AGUILAR RAMOS EUSTAQUIO VICTORIANO
Escuela Profesional	INGENIERIA AGRONOMICA
Celular	974 751954
Correo Electrónico	eustaquiovar@hotmail.com

I. Título

Calibración del exponente de la ecuación de Hargreaves y Samani para el cálculo de la evapotranspiración de referencia bajo condiciones climáticas de la región Puno

II. Resumen del Proyecto.

La estimación de la evapotranspiración de referencia (ET_o) con la ecuación de Penman Monteith requiere diferentes variables climatológicas y resolver ecuaciones con complejidad diversa, cuando no hay la información climatológica que permita usar Penman Monteith se recomienda el método de Hargreaves y Samani para predecir ET_o, el cual sólo requiere datos de temperatura máxima y mínima, usualmente disponibles en las estaciones meteorológicas. La investigación se realizará en el ámbito de la región Puno y tiene como objetivo Calibrar el exponente de la ecuación de evapotranspiración de referencia de Hargreaves y Samani con datos de ET_o calculados por el método de Penman-Monteith bajo las condiciones climáticas de región Puno. La metodología para cada objetivo específico es: a) Obtener información de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar del SENAMHI y estimar la evapotranspiración de referencia mediante los métodos de Penman Monteith y Hargreaves-Samani, b). Determinar los exponentes HE de la ecuación de Hargreaves-Samani para las localidades de Juli, Puno, Huancané y Melgar. Los resultados de la investigación nos dará a conocer las ecuaciones de Hargreaves-Samani para cada una de las localidades y estimar la evapotranspiración de referencia mediante el método Hargreaves calibrado, los mismos que serán de utilidad para calcular la demanda de agua de los cultivos en la Región Puno

III. Palabras claves (Keywords)

Evapotranspiración de referencia, Calibración, Hargreaves y Samani, Penman Monteith

IV. Justificación del proyecto

En los estudios hidrológicos uno de los componentes más importantes es la evapotranspiración de referencia (ET_o), usada para la programación de riego, la planificación agrícola o los balances hídricos regionales; la ET_o se puede estimar mediante métodos directos e indirectos. Dentro de los métodos indirectos destacan los empíricos y semiempíricos los cuales usan datos meteorológicos, y estos métodos incluyen ecuaciones de balance de energía complejas que requieren un número mayor de variables climatológicas, o ecuaciones simples que usan un mínimo de variables meteorológicas (Hargreaves y Samani, 1985).

Actualmente, a nivel mundial el método de mayor precisión para estimar la evapotranspiración de referencia (ET_o) es la ecuación de Penman Monteith, también conocida como FAO-56 (Allen et al., 2006). La estimación de ET_o con la ecuación de Penman Monteith requiere diferentes variables climatológicas y resolver ecuaciones con complejidad diversa. Cuando no hay la información climatológica no es posible utilizar la ecuación de Penman Monteith, en estos casos se recomienda el método de Hargreaves y Samani para predecir la ET_o, el cual sólo requiere datos de temperatura máxima y mínima, usualmente disponibles en las estaciones meteorológicas (Campos, 2005).

La ecuación de Hargreaves y Samani proporciona estimaciones confiables para intervalos de tiempo semanal o mensual y los resultados se pueden mejorar



haciendo ajustes regionales a sus coeficientes (Droogers y Allen, 2002; Hargreaves y Allen, 2003).

La determinación de las necesidades de riego de los cultivos se basa en la estimación precisa de la evapotranspiración de referencia (ET_o) de cada zona en particular, y a su vez, las posibles alternativas para la estimación están sujetas a la limitación de la información meteorológica existentes, el método de Hargreaves y Samani presenta un potencial para su aplicación debido a que sólo utiliza información de temperatura máxima y mínima del aire; sin embargo, requiere del cálculo de parámetros de ajuste climático para cada zona.

La ecuación de Hargreaves y Samani ajustada para la región Puno, permitirá obtener valores confiables de evapotranspiración de referencia partiendo sólo de datos observados de temperatura del aire. Las evapotranspiraciones obtenidas permitirán mejorar las estimaciones de necesidades hídricas de los cultivos de la región Puno

V. Antecedentes del proyecto

Kelso-Bucio (2012) realizó una investigación sobre la calibración del exponente de la ecuación Hargreaves- ET_o en los estados de Chiapas, Oaxaca, Puebla y Veracruz, México. Los resultados indican una mejora significativa en la estimación ET_o a intervalos diarios mediante Hargreaves corregido y una reducción en la sobrestimación o subestimación producida por Hargreaves sin correcciones en su exponente. El SEE promedio fue inferior a 1.0 mm/d con respecto al método de Penman Monteith (PM).

Tabari y Talaee (2011) efectuaron una calibración de la ecuación de Hargreaves en regiones de clima árido y frío de Iran, y propusieron valores de HC (0.0031) para clima árido y (0.0028) para clima frío. Por tanto, una alternativa para mejorar la estimación de ET_o mediante Hargreaves y Samani consiste en la calibración regional del método usando valores meteorológicos locales.

Kelso-Bucio (2012) realizó una investigación sobre la calibración del exponente de la ecuación Hargreaves- ET_o en los estados de Chiapas, Oaxaca, Puebla y Veracruz, México. Los resultados indican una mejora significativa en la estimación ET_o a intervalos diarios mediante Hargreaves corregido y una reducción en la sobrestimación o subestimación producida por Hargreaves sin correcciones en su exponente. El SEE promedio fue inferior a 1.0 mm/d con respecto al método de Penman Monteith (PM).

Almorox (2012) realizó una calibración del modelo de Hargreaves para la estimación de la evapotranspiración de referencia en Coronel Dorrego, Argentina, el objetivo principal de este trabajo es analizar la posibilidad de calibración y ajuste del método HG en la estación de Coronel Dorrego. Se han comparado los métodos PM y HG, encontrándose una buena correlación entre ambos. Se concluye que el modelo HG es una metodología adecuada, para la zona de Coronel Dorrego y se sugiere la fórmula siguiente: $ET_o \text{ HG} = 0,00206 \cdot Ra \cdot (T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}})^{0,49} \cdot (t_m + 17,8) \text{ mm/día}$

De Sousa et al (2013) realizaron la calibración de la ecuación de Hargreaves-Samani para estimar la evapotranspiración de referencia en la región subhúmeda de Brasil. Este estudio tuvo como objetivo determinar la ETo por el método de Hargreaves-Samani en la cuenca experimental de la finca “Riacho do Papagaio”, en el municipio de São João, en el noreste de Brasil, utilizando datos de 2011 y 2012. Evapotranspiración de referencia estimada por el método Hargreaves-Samani no calibrado (EToHS) se sobrestimó en todos los meses (RMSE = 1,43 mm/d), principalmente en los meses de menor demanda evaporativa (de mayo a julio).

Hargreaves y Samani desarrollaron un enfoque alternativo para estimar la ETo donde solo se requieren la temperatura media máxima y mínima media del aire y la radiación extraterrestre (el método de Hargreaves-Samani se denomina en lo sucesivo HS). Debido a que la radiación extraterrestre se puede calcular para un determinado día y lugar, solo las temperaturas mínima y máxima son los parámetros que requieren observación (Sentelhas et al, 2010)

Trajkovic (2007) realizó un estudio cuyo objetivo es investigar la posibilidad de calibrando la ecuación en la región de los Balcanes Occidentales, Sudeste de Europa mediante el ajuste del exponente de Hargreaves HE. Datos de Palic, Sarajevo y Nis se han utilizado para estimar la HE ajustada. Se propone un valor de 0.424 en lugar del 0.5 original como uno que debería utilizarse en la ecuación ajustada de Hargreaves AHARG para las ubicaciones de los Balcanes Occidentales. Los valores de ETo estimados por AHARG se compararon con estimaciones de PM de FAO-56 para ocho lugares húmedos Varazdin, Zagreb, Bihac, Novi Sad, Negotin, Kragujevac, Nis y Vranje. Las estimaciones de AHARG coincidieron estrechamente con las estimaciones de PM de la FAO-56 en la mayoría de los lugares. El SEE varió de 0,17 mm /día para Varazdin a 0,24 mm /día para Vranje, con un promedio de 0,21 mm /día. La sobreestimación promedio fue de alrededor del 1%.

Trajkovic (2005) utilizó simple regresión lineal para la calibración regional de la ecuación de Hargreaves. Sin embargo, la ecuación calibrada de Hargreaves sobrestimó estimaciones de PM de FAO-56 incluso después de la calibración. El promedio de estimado los valores estaban aproximadamente un 13% por encima del promedio de FAO-56 PM estimados. Estos resultados indican que la calibración de la ecuación para la región de los Balcanes Occidentales debe hacerse a través de la ajuste del exponente de Hargreaves. El principal objetivo de este estudio es para investigar la posibilidad de ese tipo de calibración de la ecuación en la región de los Balcanes Occidentales.

Čadro et al (2017) validaron métodos de cálculo y 21 versiones ajustadas localmente de las mismas ecuaciones contra el método FAO-PM ETo. Se utilizaron datos climáticos diarios, registros de temperatura del aire máxima y mínima (°C), precipitación (mm), mínima y máxima humedad relativa (%), velocidad del viento (m/s) y horas de sol (h) para el período 1961-2015 (55 años) y se promediaron cada mes. Los resultados, confirman que de acuerdo a los indicadores estadísticos, el método más adecuado y confiable para el

cálculo mensual de ETo en Bosnia y Herzegovina es el método Trajkovic ajustado, el método de Hargreaves-Samani ajustado fue el segundo método con mejor rendimiento.

Xu et al (2012) mencionan que la ecuación de Hargreaves-Samani (HS) que estima la evapotranspiración de referencia (ETo) utilizando solo la temperatura como entrada, debería ser más adecuado para la predicción ETo basada sobre los datos de pronóstico del tiempo. En el estudio actual, la ecuación HS se calibra con ETo diario mediante la ecuación de Penman-Monteith y se evalúa para comprobar la posibilidad de predicción de ETo diaria basada en datos de pronóstico del tiempo. Es probable que la ecuación HS pueda sobreestimar la ETo diaria en las regiones húmedas de China. Se calculan los coeficientes a y c como 0,00138 y 0,5736 de acuerdo con la calibración local. La ecuación HS calibrada funciona considerablemente mejor que el original.

Dejaman et al, (2016) realizaron una investigación con el objetivo de evaluar, calibrar y validar seis ecuaciones para estimar ETo ((Trabert, Mahringer, Penman1948, Albrecht, Valiantzas1 y Valiantzas2). De acuerdo a los resultados las seis ecuaciones mostraron una buena concordancia con el PM-ETo ($R^2 > 0.60$) para las estimaciones diarias de ETo, la ecuación de Valiantzas2 fue el mejor modelo para el Delta del río Senegal y tuvo la diferencia de raíz cuadrada media (RMSE) más baja de 0.45 mm/día y el porcentaje más bajo de error de estimación (PE) alrededor de 7,1%.

Xu et al, (2013) realizaron un estudio que tiene como objetivo mejorar el rendimiento de métodos simples para la estimación de la evapotranspiración de referencia diaria (ETo) en el este de China húmedo, los métodos son: Penman – Monteith de la FAO-56 ecuación (FAO-56 PM), Priestley – Taylor 1972 (P-T 1972), Hargreaves – Samani 1985 (H-S 1985) y Turc 1961 (TU 1961). Estos métodos fueron evaluados y calibrados en base a experimentos con lisímetro de césped bien regado. El Penman – Monteith de la FAO-56 ecuación (FAO-56 PM) es el mejor método y los métodos basados en radiación (TU 1961 y P-T 1972) funcionan mucho mejor que los basados en temperatura, método (H-S 1985).

Trajkovic et al (2020) realizaron una investigación con el objetivo principal de comparar los enfoques de ETo calibrados basados en la temperatura con la ecuación de PM estándar utilizando datos meteorológicos de quince estaciones CLIMWAT ubicadas en la cuenca de Pannonia. Se evaluaron doce ecuaciones basadas en la temperatura de acuerdo con el método de PM. La ecuación de Hargreaves (HT) calibrada regionalmente dio el RMSE más bajo en siete sitios y el segundo RMSE más bajo en tres sitios. El nuevo enfoque Thornthwaite (TT) calibrado regionalmente arrojó el RMSE más bajo tres veces y el segundo RMSE más bajo siete veces. Los resultados generales muestran la ventaja del enfoque HT excepto en algunas estaciones del sureste donde predomina el enfoque TT. Se puede concluir que los enfoques basados en la temperatura calibrados regionalmente (HT y TT) son los más adecuados para estimar la ETo en la cuenca de Pannonia

Quej et al (2019), mencionan que la estimación de la evapotranspiración de referencia (ET_o) utilizando la temperatura del aire es particularmente atractiva para lugares donde los datos de la radiación solar, velocidad del viento y la humedad del aire no están disponibles. En este estudio, siete modelos basados en temperatura (TET) y el modelo estandarizado. Usando solo datos de temperatura de la península de Yucatán, México, se utilizó el modelo de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) -Penman-Monteith (PMT) para estimar ET_o como estándar.

Xu y Sing (2002) realizaron estudios de cinco ecuaciones de evapotranspiración potencial empírica, Hargreaves y Blaney-Criddle (basado en la temperatura), Makkink y Priestley-Taylor (basado en radiación) y Rohwer (basado en transferencia de masa) fueron evaluados y comparados con Ecuación de Penman-Monteith utilizando datos meteorológicos diarios de la estación de Changins en Suiza. Los cálculos de la ecuación de Penman-Monteith siguieron el procedimiento recomendado por FAO (Allen et al., 1998). La comparación se realizó primero utilizando los valores constantes originales involucrados en cada ecuación empírica y luego se hace usando los valores constantes recalibrados.

Toro et al (2015) desarrollaron una investigación en la zona Norte del eje bananero del Urabá Antioqueño, Colombia con el objeto de evaluar la confiabilidad para calcular la Eto de los métodos: Hargreaves y radiación (Eto-PM-Samani), con respecto al método de PM. Para estimar la radiación solar se generaron los coeficientes de Angstrom-Prescott (coeficientes de las estaciones), además con los coeficientes $a=0.25$, $b=0.50$, $a=0.2$, $b=0.52$ y $a=0.29$, $b=0.42$, y con dos métodos. La estimación de la radiación solar con los coeficientes de las estaciones a_p y b_p presentó los valores de la raíz del error cuadrático medio (RSME) y el error relativo (RE) más bajos, seguido del método de Frere1978. La mejor estimación de la evapotranspiración se obtuvo con EtoHS1985, ya que presentó los valores más bajos de RSME y RE y los valores más altos de R^2 , mientras los métodos EtoHargreaves y Eto-PM-Samani presentan RSME y RE similares y son mejores para el primero, y con el modelo lineal entre Eto PM y EtoHS1985 se redujo el error y tiene una $R^2 > 0.8$.

Kisi (2014) realizó una investigación para estimar la evapotranspiración de referencia (ET_o) el mismo que es muy importante para la gestión de los recursos hídricos y determinación del presupuesto hídrico, especialmente en zonas áridas. Las nuevas ecuaciones empíricas se aplicaron a datos climáticos diarios de cuatro estaciones, Adana, Antalya, Isparta y Mersin, ubicadas en Región mediterránea de Turquía. Los resultados se comparan con la referencia evapotranspiraciones (ET_o) obtenidas por FAO 56 Penman-Monteith (PM) y siguientes ecuaciones empíricas; Copais, Turc, Hargreaves-Samani, Hargreaves, Ritchie e Irmak.

Tabari (2010) menciona que la evapotranspiración es uno de los elementos más importantes para cuantificar agua disponible, ya que generalmente



constituye el componente más grande de la tierra en el ciclo del agua. Este estudio evaluó cuatro modelos (Makkink, Turc, Priestley – Taylor y Hargreaves) comúnmente utilizado para estimar la evapotranspiración mensual del cultivo de referencia (ET_o) valores. El objetivo principal de este estudio fue determinar el modelo utilizado para estimar ET_o con pequeños requisitos de datos y alta precisión para doce estaciones sinópticas en cuatro climas de Irán. Los resultados mostraron que el modelo Turc era el más adecuado modelo en la estimación de ET_o para climas fríos, húmedos y áridos. El modelo de Hargreaves resultó ser el modelo más preciso en condiciones climáticas cálidas, húmedas y semiáridas

Bachour et al (2013) indican que la evapotranspiración (ET) es un componente importante del ciclo hidrológico, especialmente para la agricultura de regadío. Métodos directos de estimar la ET de referencia es difícil o requiere muchas variables meteorológicas que no siempre están disponibles en todas las estaciones meteorológicas. La ecuación de Hargreaves (HG) requiere solo datos medidos de temperatura del aire diaria y radiación extraterrestre calculada para las estimaciones de ET. A menos que sea regionalmente calibrada, la HG tiende a sobrestimar o subestimar sistemáticamente la ET. Esta ecuación fue evaluada en condiciones semiáridas en el valle de Bekaa del Líbano utilizando 16 años de datos climáticos diarios completos de la estación meteorológica de Terbol.

VI. Hipótesis del trabajo

La ecuación de evapotranspiración de referencia de Hargreaves y Samani calibrada permitirá obtener valores confiables de evapotranspiración de referencia bajo condiciones climáticas de la región Puno.

Hipótesis específicas:

- La evapotranspiración de referencia se estima mediante las ecuaciones de Penman Monteith y Hargreaves – Samani para las localidades de Juli, Puno, Huancané, Azangaro y Melgar.
- La calibración de los coeficiente de la ecuación de Hargreaves Samani a partir de estimaciones de evapotranspiración de referencia mediante el método de Penman Monteith para las condiciones climáticas de Juli, Puno, Huancané, Azangaro y Melgar es adecuado

VII. Objetivo general

Calibrar el exponente de la ecuación de evapotranspiración de referencia de Hargreaves y Samani con datos de ET_o calculados por el método de Penman-Monteith bajo condiciones climáticas de la región Puno

VIII. Objetivos específicos

- Estimar la evapotranspiración de referencia mediante las ecuaciones de Penman Monteith y Hargreaves – Samani para las localidades de Juli,

Puno, Huancané, Azangaro y Melgar.

- Calibrar los coeficientes de la ecuación de Hargreaves Samani a partir de estimaciones de evapotranspiración de referencia mediante el método de Penman Monteith. para las localidades de Juli, Puno, Huancané, Azangaro y Melgar

- IX. Metodología de investigación (Describir el(los) método(s) científico(s) que se empleará(n) para alcanzar los objetivos específicos, en forma coherente a la hipótesis de la investigación. Sustentar, con base bibliográfica, la pertinencia del(los) método(s) en términos de la representatividad de la muestra y de los resultados que se esperan alcanzar. Incluir los análisis estadísticos a utilizar)

Objetivo específico 1: Estimar la evapotranspiración de referencia.

Para estimar la evapotranspiración de referencia se va a utilizar los métodos de Penman Montheit y Hargreaves-Samani.

Método de Penman Monteith.

Según Allen *et al.* (2006) este método utiliza la siguiente ecuación:

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

Donde:

ET₀: Evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹)

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

R_a : Radiación extraterrestre (mm día⁻¹)

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

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

u₂ : Velocidad del viento a 2 m de altura (m s⁻¹)

e_s : Presión de vapor de saturación (kPa)

e_a : Presión real de vapor (kPa)

e_s – e_a : Déficit de presión de vapor (kPa)

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

γ : Constante psicrometrica (kPa °C⁻¹).

Para estimar la evapotranspiración de referencia, se va a utilizar programa CROPWAT, que ha sido elaborado por la Dirección de Fomento de Tierras y Aguas de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO), es un software libre.

Método de Hargreaves – Samani.

El método indirecto Hargreaves y Samani emplea datos meteorológicos mensuales de temperatura mínima, temperatura máxima y temperatura media. Según Hargreaves y Samani, (1985) este método utiliza la siguiente ecuación:

$$HG = HC R_a \left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} + HT \right) (T_{\max} - T_{\min})^{HE}$$

Donde:

HG es la evapotranspiración de referencia (mm/d)

Ra es la radiación extraterrestre (mm/d).

Tmax es la temperatura máxima diaria (°C)

Tmin es la temperatura mínima diaria (°C)

HC es el coeficiente empírico de Hargreaves (0.0023)

HT es el coeficiente empírico de temperatura (17.8)

HE es el exponente empírico de Hargreaves (0.5).

Objetivo específico 2: Calibración del exponente de la ecuación de Hargreaves y Samani.

Para realizar la calibración del exponente HE de la ecuación de Hargreaves y Samani, se realizará mediante la igualdad de términos entre PM y HG propuesta por Trajkovic (2007) para predecir los valores de PM.

$$PM = 0.0023 R_a \left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} + 17.8 \right) (T_{\max} - T_{\min})^{HE}$$

En este estudio, la calibración del exponente HE se realizará mediante la siguiente ecuación que proviene de la ecuación anterior (PM).

$$HE = \frac{\log \left[\frac{PM}{0.0023 R_a \left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} + 17.8 \right)} \right]}{\log [T_{\max} - T_{\min}]}$$

Evaluación de parámetros

Una vez obtenido el exponente HE recalibrado por estación, con la ecuación HG se estima HGHE a intervalos diarios. HG se estima con sus coeficientes originales para evaluar el porcentaje de cambio entre ambos métodos y estimar la mejora en las estimaciones con respecto a PM.

El rendimiento en la predicción de ETo con los nuevos coeficientes se evalúa con los criterios de comparación sesgo medio del error (MBE), error relativo (RE), error cuadrático medio (RMSE), desviación estándar del error (SEE), índice de correspondencia (D) y el cociente entre ambas estimaciones promedio de ETo (r) (Willmott, 1982). Estos criterios se definen como:

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n}$$

$$RE = \frac{MBE}{\bar{O}} 100$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0.5}$$

$$SEE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (PM^i - HG_{HE}^i)^2}{n-1} \right]^{0.5}$$

$$D = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + O_i - \bar{O})^2} \right]$$

$$\bar{r} = \frac{\bar{P}}{\bar{O}}$$

Donde:

P_i es el valor estimado con cada modelo de prueba, O_i es el valor estimado con PM, $\bar{P}$ es el promedio de los valores estimados para cada modelo de prueba, $\bar{O}$ es el promedio de los valores estimados con PM, y n es el tamaño de la muestra

X. Referencias

- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., y Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. *Estudio FAO Riego y Drenaje No. 56*. Roma, Italia.
- Almorox, J.; Aguirrea, M.; Elisei, V.; Commegna, M. (2012). Calibración del modelo de Hargreaves para la estimación de la evapotranspiración de referencia en Coronel Dorrego. *Rev. FCA UNCUIYO*. 2012. 44(1): 101-109. ISSN impreso 0370-4661. ISSN (en línea) 1853-8665.

- Bachour, R., Walker, WR, Torres-Rua, AF y McKee, M. (2013). Assessment of Reference Evapotranspiration by the Hargreaves Method in the Bekaa Valley, Lebanon. *Irrigation and Drainage Engineering Journal*, 139 (11), 933–938. doi: 10.1061 / (asce) ir.1943-4774.0000646
- Breña, A. y Jacobo, M. (2006). Principios y fundamentos de la Hidrología Superficial. México D.F. Universidad Autónoma Metropolitana. www.uamenlinea.uam.mx
- Čadro, S., Uzunović, M., Žurovec, J. y Žurovec, O. (2017). *Validación y calibración de varios métodos alternativos de evapotranspiración de referencia en las condiciones climáticas de Bosnia y Herzegovina. Investigación internacional sobre la conservación del suelo y el agua*, 5 (4), 309–324. doi: 10.1016 / j.iswcr.2017.07.002
- Campos D., F. 2005. Estimación empírica de la ETP en la república mexicana. Ingeniería Hidráulica en México 20 (3): 99-110.**
- De Sousa, J.; Dantas, A.; Soares E.; Hammecker, C.; Gico, S.; Brayner de Oliveira C. (2013). Calibration of Hargreaves-Samani Equation for Estimating Reference Evapotranspiration in Sub-Humid Region of Brazil. *Journal of Water Resource and Protection*, 2013, 5, 1-5 Published Online December 2013 (<http://www.scirp.org/journal/jwarp>) <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2013.512A001>
- Djaman, K., Tabari, H., Balde, AB, Diop, L., Futakuchi, K. e Irmak, S. (2016). Analyses, calibration and validation of evapotranspiration models to predict grass-reference evapotranspiration in the Senegal river delta. *Revista de hidrología: Estudios regionales*, 8, 82–94. doi: 10.1016 / j.ejrh.2016.06.003
- Droogers, P., and R. Allen G. 2002. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. Irrig. Drain Syst. 16 (1): 33-45.**
- Gamez W. (2010). Texto básico de hidrología. Universidad Nacional Agraria, Managua. 150 pág.
- FAO. (2013). *Afrontar la escasez de agua. Un marco de acción para la Agricultura y la seguridad alimentaria*. Roma: FAO 2013. E-ISBN 978-92-5-307633-8. Obtenido de <http://www.fao.org/docrep/018/i3015s/i3015s.pdf>
- George H. Hargreaves y Zohrab A. Samani. (1985). *Evapotranspiración del cultivo de referencia a partir de la temperatura. Ingeniería aplicada a la agricultura*, 1 (2), 96–99. doi: 10.13031 / 2013.26773.
- Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Eng. in Agric.*, 1(2): 96-99.

- Kelso-Bucio, Henry A., Bâ, Khalidou M., Sánchez-Morales, Saúl, & Reyes-López, Delfino. (2012). Calibración del exponente de la ecuación Hargreaves-ET_o en los estados de Chiapas, Oaxaca, Puebla y Veracruz, México. *Agrociencia*, 46(3), 221-229. Recuperado en 18 de mayo de 2021, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952012000300002&lng=es&tlng=es.
- Kisi, O. (2014). Comparison of different empirical methods for estimating daily reference evapotranspiration in Mediterranean climate. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. Submitted February 15, 2013; accepted August 20, 2013; posted ahead of print August 21, 2013. doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000664
- Pérez, G. (2015). Manual de hidrología aplicada. Lima, Peru. 227 pag.
- Quej VH, Almorox J, Arnaldo AJ, Moratiel M (2019) Evaluation of temperature-based methods for the estimation of reference evapotranspiration in the Yucatán Peninsula, Mexico. *Journal of Hydrologic Engineering* 24(2):5018029, DOI: 10.1061/(ASCE) HE.1943-5584.0001747
- Sentelhas, P. et al (2010). "Evaluation of FAO Penman-Monteith and Alternative Methods for Estimating Reference Evapotranspiration with Missing Data in Southern Ontario, Canada," *Agricultural Water Management*, Vol. 97, No. 5, 2010, pp. 635-644. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2009.12.001>
- Tabari, H. (2010). Evaluation of Reference Crop Evapotranspiration Equations in Various Climates. *Water Resour Manage* (2010) 24:2311–2337 DOI 10.1007/s11269-009-9553-8
- Tabari, H., and P. Talaei H. 2011. Local of the Hargreaves and Priestley-Taylor equations for estimating reference evapotranspiration in arid and cold climates of Iran based on the Penman-Monteith model. *J. Hydrol. Eng.* 16 (10): 837-845
- Toro-Trujillo, A. María, Arteaga-Ramírez, Ramón, Vázquez-Peña, M. Alberto, & Ibáñez-Castillo, L. Alicia. (2015). Modelos para estimar la evapotranspiración de referencia en la zona norte bananera del Urabá Antioqueño (Colombia). *Agrociencia*, 49(8), 821-836. Recuperado en 18 de mayo de 2021, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952015000800001&lng=es&tlng=es.
- Trajkovic, S. (2005). "Temperature-based approaches for estimating reference evapotranspiration." *J. Irrig. Drain. Eng.*, 131_4_, 316–323.
- Trajkovic, S. (2007). *Hargreaves versus Penman-Monteith en condiciones de humedad*. *Revista de ingeniería de riego y drenaje*, 133 (1), 38-42. doi: 10.1061 / (asce) 0733-9437 (2007) 133: 1 (38).

- Trajkovic, S., Gocic, M., Pongracz, R., Bartholy, J. y Milanovic, M. (2020). Assessment of Reference Evapotranspiration by Regionally Calibrated Temperature-Based Equations. *KSCE Journal of Civil Engineering* DOI 10.1007/s12205-020-1698-2.
- Vásquez, A. Mejía, A., Faustino J., Terán R., Vásquez I., Díaz J., Vásquez C., Castro A., Tapia M. y Alcántara J. (2016). Manejo y gestión de cuencas hidrográficas. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima-Perú. 707 p.
- Vásquez, A., Vásquez, I., Vásquez, C. y Cañamero, M. (2017). Fundamentos de la Ingeniería de riego. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima-Perú. 442 p
- Xu, C. y Singh V. (2002). Cross Comparison of Empirical Equations for Calculating Potential Evapotranspiration with Data from Switzerland. *Water Resources Management* 16: 197–219, 2002. doi: 10.1023 / a: 1020282515975.
- Xu, J., Peng, S., Ding, J., Wei, Q. y Yu, Y. (2013). Evaluation and calibration of simple methods for daily reference evapotranspiration estimation in humid East China. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 59 (6), 845–858. doi: 10.1080 / 03650340.2012.683425

XI. Uso de los resultados y contribuciones del proyecto (Señalar el posible uso de los resultados y la contribución de los mismos)

Los resultados de esta investigación pueden ser utilizados por productores agrícolas, consultores de proyectos agrícolas, investigadores universitarios, técnicos del Ministerio de Agricultura y Riego, formuladores de políticas para los estudios agrícolas, hidrológicos y ambientales

XII. Impactos esperados

i. Impactos en Ciencia y Tecnología

Con la investigación se busca la incorporación de conocimiento científico y tecnológico con la determinación de las necesidades hídricas de los cultivos, evapotranspiración de referencia calibrada para las localidades de Juli, Puno, Huancané, Azangaro y Melgar

ii. Impactos económicos

La estimación de la evapotranspiración de referencia por los agricultores y funcionarios de las administraciones locales del agua será de utilidad para determinar las necesidades hídricas de los cultivos en la región Puno, prever la falta de agua en épocas de sequías y planificar la construcción de infraestructuras de riego en el ámbito de la región Puno, para no tener pérdidas económicas en las actividades agrícolas y pecuarias

iii. Impactos sociales



Los resultados de la investigación se socializará con las autoridades locales del agua, autoridades de los gobiernos distritales y provinciales y autoridades comunales, los mismos serán de utilidad para los agricultores del ámbito de la región Puno

iv. Impactos ambientales

La determinación de la evapotranspiración de referencia en la región Puno, no produce alteraciones del medio ambiente, en vista que se trabaja con registros de variables meteorológicas, contribuirá para determinar las necesidades hídricas de los cultivos

XIII. Recursos necesarios

Hardware: Laptop, impresora, cámara fotográfica.

Software: Microsoft Office 2016, Cropwat 8.0.1, ArcGis, Hidroesta 2.

Recurso Humano: Docentes de las Facultades de Ingeniería Agrícola y Ciencias Agrarias y personal de apoyo

XIV. Localización del proyecto (indicar donde se llevará a cabo el proyecto)

La investigación se llevara a cabo en el ámbito de la región Puno y se considera las provincias de Juli, Puno, Huancané, Azángaro y Melgar

XV. Cronograma de actividades

ACTIVIDADES	2022											
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.
1. Revisión bibliográfica	X	X	X	X								
2. Obtención de la información meteorológica de SENAMHI.			X	X								
3. Determinación de la evapotranspiración de referencia método Penman Monteith				X	X							
4. Determinación de la evapotranspiración de referencia método Hargreaves - Samani					X	X	X					
5. Calibración del exponente HE de la ecuación de Hargreaves Samani								X	X	X		
6. Análisis y redacción del informe final									X	X	X	X



XVI. Presupuesto

Descripción	Unidad de medida	Costo Unitario (S/.)	Cantidad	Costo total (S/.)
Bienes				
Información meteorológica	Global	1	3000	3,000
Material bibliográfico	Global	1	1000	1,000
Varios	Unidad	1	1000	1,000
Servicios				
Pasajes	Unidad	20	50	1,000
Alimentación	Unidad	20	50	1,000
Alojamiento	Unidad	20	50	1,000
Materiales de escritorio	Varios	1	1000	1,000
Personal de apoyo	Unidad	2	500	1,000
Varios	Unidad	1	1000	1,000
TOTAL (s/.)				11,000