

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DEMANDA HÍDRICA DEL CULTIVO DE CAÑIHUA
(Chenopodium pallidicaule) **EN LA VERTIENTE DEL LAGO TITICACA DE LA REGION DE PUNO**

Eduardo Flores Condori (a); Eduardo Luis Flores Quispe (b);

(a) Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional del Altiplano de Puno Perú, Autor para correspondencia: eflores@unap.edu.pe

(b) Facultad de Ingenierías, Universidad Nacional de Moquegua Perú, Coautor para correspondencia: efloresq@unam.edu.pe

Año: 2022

Resumen

En el presente trabajo se ha evaluado los efectos del cambio climático relativo a la producción del cultivo de cañihua; se planteó como objetivo: evaluar la relación entre la producción del cultivo y los elementos climáticos en la vertiente del Lago Titicaca; la producción del cultivo ha sido obtenido de las oficinas del ministerio de agricultura de Puno y los datos meteorológicos se recabaron de las oficinas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Puno; para efectuar la prueba de normalidad se utilizó el método de Shapiro-Wilk y en base de los resultados se aplicó las pruebas estadísticas paramétricas y no paramétricas; y para evaluar la relación entre la producción de cañihua y variables climáticas se aplicó la regresión múltiple utilizando los estimadores de máxima verosimilitud. El resultado muestra que los datos según $P \geq 0.05$ las variables climáticas: las temperaturas máximas, temperaturas mínimas y humedad relativa con probabilidades de 0.487, 0.824 y 0.083 respectivamente, los valores indican que se distribuyen normalmente; para las pruebas paramétricas se utilizo el método de regresión lineal y autocorrelación y para las no paramétrica se utilizaron los métodos de Mann-Kendal y Spearman's Rho; las dos pruebas han demostrado que existe tendencia positiva; y la relación que existe entre la producción de cañihua y variables climáticas y de cuerdo a la $P \geq 0.05$, muestra que no existe significancia estadística para las estaciones meteorológicas de Ayaviri, Azángaro y Huancané; para el caso específico de Ayaviri para temperatura máxima, temperatura mínima, humedad relativa para precipitación media anual con coeficientes de regresion: 0.304, 0.137, 0.271 y 0.854 respectivamente; el signo positivo de la temperatura máxima indica relación es directa entre la producción de cañihua cuanto mayor sea la temperatura máxima la producción se incrementara. En la zona de estudio en los 31 años, y la producción de cañihua varía entre 608.00 a 236.00 Kg/ha. Con desviación estándar de 95.03 Kg.

Abstract

In the present work, the effects of climate change related to the production of the cañihua crop have been evaluated; The objective was: to evaluate the relationship between crop production and climatic elements on the slopes of Lake Titicaca; the production of the crop has been obtained from the offices of the Ministry of Agriculture of Puno and the meteorological data was collected from the offices of the

National Service of Meteorology and Hydrology of Puno; To carry out the normality test, the Shapiro-Wilk method was used and based on the results, the parametric and non-parametric statistical tests were applied; and to evaluate the relationship between cañihua production and climatic variables, multiple regression was applied using maximum likelihood estimators. The result shows that the data according to $P \geq 0.05$ the climatic variables: maximum temperatures, minimum temperatures and relative humidity with probabilities of 0.487, 0.824 and 0.083 respectively, the values indicate that they are normally distributed; for the parametric tests, the linear regression and autocorrelation method was used and for the non-parametric tests, the Mann-Kendal and Spearman's Rho methods were used; the two tests have shown that there is a positive trend; and the relationship that exists between the production of cañihua and climatic variables and according to the $P \geq 0.05$, shows that there is no statistical significance for the meteorological stations of Ayaviri, Azángaro and Huancané; for the specific case of Ayaviri for maximum temperature, minimum temperature, relative humidity for average annual precipitation with regression coefficients: 0.304, 0.137, 0.271 and 0.854 respectively; the positive sign of the maximum temperature indicates a direct relationship between the production of cañihua, the higher the maximum temperature, the production will increase. In the study area in the 31 years, and the production of cañihua varies between 608.00 to 236.00 Kg/ha. With a standard deviation of 95.03 kg.

Introducción

El altiplano peruano, el cambio climático implica temperaturas extremas, inundaciones frecuentes y la presencia de sequías y veranillos; el altiplano es una de las regiones más sensibles y perturbadas por la variabilidad climática con implicancias en las actividades del sector agropecuario,(J. Sanabria, Marengo, & Velarde, 2010), en el que estima incrementos entre 2 hasta 4 °C y un máximo al norte del Lago Titicaca de 6 °C. Los parámetros climáticos como la variación de los parámetros del clima, registran cambios importantes en sus tendencias durante el periodo 1972 a 2021.

Los parámetros climáticos de las series históricas de las temperaturas extremas presentan incrementos de 2,1 y 0,9 °C y las precipitaciones pluviales presentan una disminución de 15,80 mm/año. El calentamiento del sistema climático del altiplano es inequívoco, como evidencian ya los aumentos observados del promedio mundial de la temperatura del aire y del océano, el deshielo generalizado de nieves y hielos, y el aumento del promedio mundial del nivel del mar (IPCC, 2007).

Así mismo en la investigación realizada en Venezuela, afirma que en las últimas décadas, los efectos biofísicos del cambio climático sobre la agricultura de la zona inducen cambios en la producción y precios, que se manifiestan en el sistema económico a medida que los agricultores y otros participantes del mercado realizan ajustes de forma autónoma, modificando sus combinaciones de cultivos, uso de insumos, nivel de producción, demanda de alimentos, consumo de alimentos y comercio. Es decir, los cambios fenológicos de las plantas no son simples indicadores del cambio climático; también tienen una

importancia ecológica crítica puesto que afectan la habilidad competitiva de las diferentes especies, su conservación, y por tanto, la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas; la variabilidad climática provoca cambios significativos en las respuestas de los sistemas biofísicos y socioeconómicos, es decir, la variabilidad climática es la causa que influye directamente en la producción agropecuaria (Martelo, 2006).

Las consecuencias del calentamiento global es el derretimiento de los hielos a nivel de los casquetes polares y glaciares, lo que incorpora un volumen de agua en estado líquido a los mares, adicional a los sistemas de flujo que se observan en el ciclo global del agua (Schlesinger, 2000). Esto parece estar provocando un aumento del nivel del mar y con ello una afectación considerable a las líneas costeras de muchos países, lo cual no solo tiene consecuencias en la pérdida física de territorios y los cambios en los ecosistemas asociados, sino también impactos socioeconómicos y socioambientales, debido a que la mitad de la población mundial vive cerca de las costas y está asociada a ella cultural y económicamente. (Watson, Zinyowera, & Dokken, 1997).

En cuanto al impacto del cambio climático sobre la agricultura, existen antecedentes como al que se refiere Cline (2007) manifestando que, si continúan sin reducirse las emisiones de carbono, para el 2080 la concentración de carbono en la atmósfera se duplicará, produciendo un aumento de calentamiento global de 3,3 °C, ello incidirá en una mayor disminución de la productividad agrícola en Latinoamérica, mucho más en los países en desarrollo, con caídas de 24% sin fertilización carbónica y una reducción del 13% con fertilización carbónica. Seo & Mendelsohn (2007) predicen efectos del cambio climático sobre la agricultura para el continente africano, basados en una muestra de 2.000 observaciones, los productores grandes y pequeños perderán hasta el 25% del valor de su flujo de ingresos para 2060, el porcentaje se incrementa hasta 50% en el escenario climático más severo correspondiente a 2100.

En el altiplano de Puno, la temperatura promedio ha sufrido un incremento de 0,8°C durante el periodo 1960-2010, estos cambios tienen efectos negativos altos sobre el rendimiento de los cultivos de papa, habas y maíz, mientras para los cultivos de quinua y cañihua los efectos del cambio climático son positivos. Según las predicciones al 2035, las pérdidas ocasionadas por el cambio climático sobre la agricultura alimentaria ascienden a 0.58% del PIB de Puno 2010. En términos económicos esto equivale aproximadamente a 20 millones de dólares americanos (Tonconi, 2015).

En la región de Puno, es donde se cultiva la cañihua es decir en la cuenca del lago Titicaca donde tiene importancia en la alimentación de las familias del medio rural y el contenido alto de proteínas en sus granos, aminoácidos, vitaminas, fibra y minerales. (Pinto & Rojas, 2016).

La cañihua se cultiva en las regiones semiáridas más altas, soporta bien los climas rigurosos con heladas, sequías y bajas temperaturas. Es probablemente el grano que resiste mejor las bajas temperaturas (-3°C), sin afectarse su producción (Repo de Carrasco & Encina, 2008). Este pseudocereal tiene un contenido alto en proteínas 15.3 % y un contenido excepcional de aminoácidos (Calisaya & Alvarado, 2009).

Materiales y métodos

Materiales

Para la presente investigación se utilizó datos de series temporales, datos históricos entre el periodo de 1960 y 2010. Las variables del cambio climático como las temperaturas máximas y mínimas expresadas en grados centígrados (°C), precipitación en milímetros (mm) los cuales han sido proporcionadas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Puno (SENAMHI) de las 33 estaciones meteorológicas y las series sobre el rendimiento de la producción cañihua (t/ha) se obtuvo de las oficinas de estadística de la Región Agraria de Puno; Gobierno Regional Puno, municipalidades locales y Asociación de Productores en Puno.

Metodología empleada

1. Análisis de tendencia de variables de cambio climático

1.1. Prueba no paramétrica

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

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

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

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

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

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

Donde t_m es el número de vínculos de grado m . La prueba estadística estandarizada Z se calcula: $Z =$

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

El valor de probabilidad P de la estadística S de MK para datos de la muestra se puede estimar usando la función de distribución acumulativa normal como:

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

1.2. Prueba paramétrico

Regresión lineal en este método los datos se distribuyen normalmente, en este método relaciona entre el tiempo (X) y la variable nivel del LT. Se ha estimado el gradiente mediante la fórmula:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$
$$a = \bar{Y} - b\bar{X}$$

$$S = b/\sigma$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{12 \sum_{i=1}^n (Y_i - a - bX_i)^2}{n(n-2)(n^2-1)}}$$

Método de autocorrelación en la cual el coeficiente del primer retardo de la autocorrelación se calcula:

$$r_1 = \frac{[\sum_{i=1}^{n-1} (X_i - \bar{X})(X_{i+1} - \bar{X})]}{[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2]}$$

Si los datos de series temporales provienen de un proceso aleatorio, entonces el valor esperado y la varianza de r_1 son:

$$E(r_1) = -1/n$$

$$\text{Var}(r_1) = (n^3 - 3n^2 + 4) / [n^2 (n^2 - 1)]$$

El de z se obtiene de las tablas de probabilidad normal:

$$z = |r_1 - E(r_1)| / \text{Var}(r_1)^{0.5}$$

2. Relación de variables del cambio climático y la producción de Cañihua

Y = producción de la cañihua (Kg/ha.) y X_i = elementos climáticos (precipitación media anual, temperatura máxima, temperatura mínima, y humedad relativa). Para determinar los parámetros del modelo, se aplicó el método de los estimadores de máxima verosimilitud cuyo modelo general está expresado:

$$Y = f(X_1, \dots, X_k, \beta_1, \dots, \beta_p) + \varepsilon$$

Donde ε está distribuido en forma normal y satisface todas las otras suposiciones del modelo de regresión lineal básico. Entonces, para cada una de las N observaciones en Y_i y las X_i correspondientes, se puede escribir la distribución de probabilidad de Y_i , dadas las X_i y β , como:

$$f(Y_i, X_i, \beta) = \left[\frac{1}{2\pi\sigma^2} \right]^{1/2} \exp \left[\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \right) \left(Y_i - f(X_{1i}, \dots, X_{ki}, \beta_1, \dots, \beta_p) \right)^2 \right]$$

Donde \exp = representa la función exponencial. Entonces, la función log-verosimilitud para todas las N observaciones está dada por:

$$\text{Log}L = \sum f(Y_i, X_i, \beta) = -\left(\frac{N}{2}\right) \log 2\pi - \left(\frac{N}{2}\right) \log \sigma^2 - \left(\frac{1}{2\sigma^2}\right) \sum \left(Y_i - f(X_{1i}, \dots, X_{ki}, \beta_1, \dots, \beta_p) \right)^2$$

(Todas las sumatorias son calculadas sobre las observaciones $i = 1, 2, \dots, N$.)

Al diferenciar la última ecuación con respecto a cada una de las β y σ^2 , igualando a 0 y resolviendo, obtendremos un sistema de $p+1$ ecuaciones no lineales con $p+1$ incógnitas. Si las ecuaciones no son lineales, el proceso de solución es más complejo y se debe usar un procedimiento numérico.

2. Relación entre producción de cañihua y los elementos climáticos

$$Y = f(Q_1, \dots, Q_k, \beta_1, \dots, \beta_p) + \varepsilon$$

Donde:

Y= producción de cañahua (ton/año);

X_i = valores de los elementos climáticos registrados;

β_i = parametros del modelo; y

ε = error estocastico del modelo

Resultados y discusión

Para evaluar la normalidad de los datos se ha empleado la prueba de Shapiro-Wilk, por contar con observaciones menor que 50; se obtuvo resultado que las Temperaturas máximas, temperaturas mínimas y humedad relativa son datos que siguen distribución normal. Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula y rechazamos la hipótesis alterna por tener valores superiores a $P \geq 0.05$, la cual indica

Tabla 1 La prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para la producción de cañihua y variables climáticas.

Variables	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
Producción de cañihua (kg/Ha)	0,921	31	0,026
Temperatura máxima (°C)	0,969	31	0,487
Temperatura Minina (°C)	0,980	31	0,824
Humedad relativa (%)	0,940	31	0,083
Precipitación pluvial (mm)	0,910	31	0,013

que la distribución de los datos es normal por lo tanto se aplica la estadística paramétrica; sin embargo, las variables producción de Cañihua y precipitación media anual presentan valores inferiores teniendo $P < 0.05$ en este caso rechazamos la hipótesis nula y aceptamos la hipótesis alterna, por lo tanto, los datos no son normales y se aplicara la estadística no paramétrica, tal como muestra en la tabla 1.

Tabla 2 Análisis de tendencia de la producción de Cañihua (Kg/ha) por el efecto del calentamiento global de la región de Puno (1990 – 2021).

	Prueba estadística	criterio de evaluación			Resultado
		a=0.10	a=0.05	a=0.01	
Mann-Kendall	2.142	1.645	1.96	2.576	S (0.05)
Spearman's Rho	1.575	1.645	1.96	2.576	NS

Para la producción de cañihua se hizo el análisis de tendencia utilizando estadística no paramétrica empleando los métodos de Mann-Kendal y Spearman's Rho, de la cuales se obtuvo significancia para el método de Mann-Kendal a la probabilidad de $P=0.05\%$; sin embargo, no existe significancia para el método de Spearman's Rho.

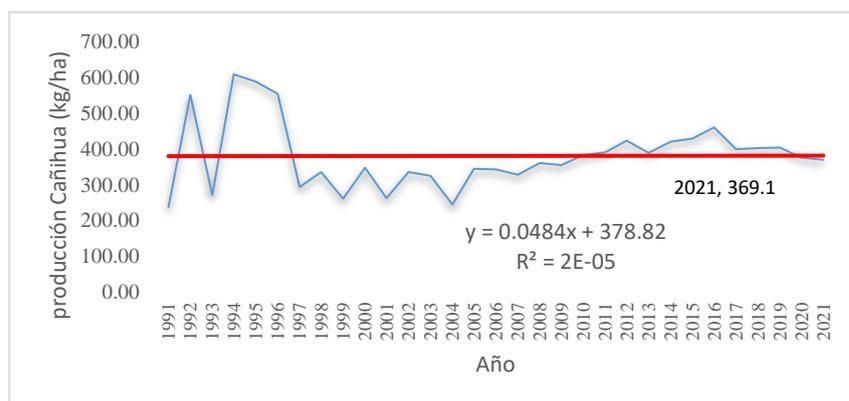


Figura 1 Variación temporal de la producción de cañihua (ton/ha) en Puno (1990-2021)

De acuerdo a la figura 1, muestra una tendencia positiva es decir que la producción promedio anual fue de 379.59 Kg/ha. Que en comparación con la producción del año de 2021 se obtuvo una producción de 369.1 Kg/ha la cual es ligeramente inferior a la producción promedio de los 31 años, esto nos evidencia que la variación climática influye a la producción del cultivo de cañihua en las provincias de Melgar, Azangaro y Huancane del departamento de Puno.

Tabla 3 Análisis de tendencia de temperaturas máximas (°C) que afecta al calentamiento global en la región de Puno (1990 – 2021).

Prueba de tendencia	Prueba estadística	Criterio de evaluación			Resultado
		a=0.10	a=0.05	a=0.01	
Linear regresión	3.162	1.699	2.045	2.756	S (0.01)
Auto Correlación	2.390	1.645	1.960	2.576	S (0.05)

En el análisis de tendencia de temperaturas máximas que supuestamente que afecta al calentamiento global en la región de Puno, se ha aplicado estadísticas paramétricas como la regresión lineal y autocorrelación tal como podemos observar en la tabla 3, que ambas pruebas son significativas a la probabilidades de 0.01 y 0.05 respectivamente; es decir que existe una tendencia positiva en ambos casos cuyo valor promedio es de 16.6 °C respecto el valor que corresponde al año 2021 que es de 16.6 °C entre estos valores no existe mucha diferencia.

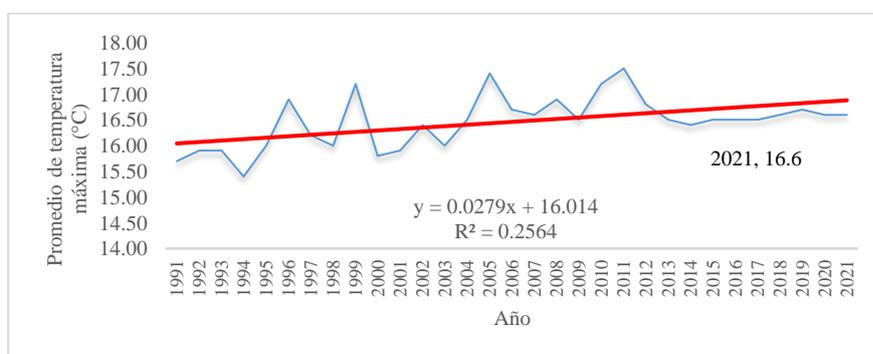


Figura 2 Variación de las temperaturas máximas en la región de Puno (1990-2021)

Tabla 4 Análisis de tendencia de la variación de temperaturas mínimas y su efecto al calentamiento global en la región de Puno (1990 – 2021).

Prueba de tendencia	Prueba estadística	criterio de evaluación			Resultado
		a=0.1	a=0.05	a=0.01	
Linear regresión	1.807	1.699	2.045	2.756	S (0.10)
Auto Correlación	2.600	1.645	1.960	2.576	S (0.01)

En el análisis de tendencia de temperaturas mínimas que afecta al calentamiento global en la región de Puno, se ha aplicado estadística paramétrica como es la regresión lineal y autocorrelación la cual se muestra en la tabla 4, las pruebas son significativas a las probabilidades de 0.10 y 0.01 respectivamente; es decir que existe una tendencia positiva, y el valor promedio es de 2.81°C respecto el valor que corresponde al año 2021 que es de 3.6 °C entre estos valores existe incremento de aproximadamente 1°C.

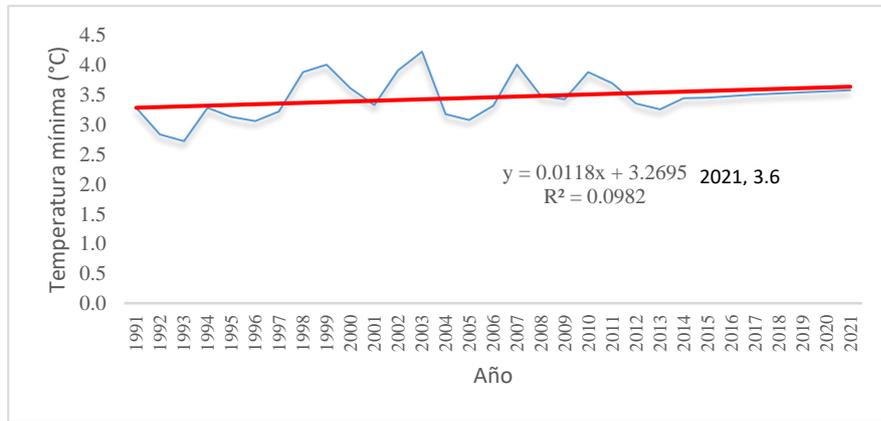


Figura 3 Variación de las temperaturas mínimas medias anuales de Puno en los años 1990-2021

De acuerdo a la figura 3, la tendencia presenta valor positivo y el coeficiente de determinación es 9.82% que es un valor baja y el valor del intercepto es de 3.26 °C que es un valor próximo a la media de los 31 años de observación.

Tabla 5 Análisis de tendencia de la variación de la humedad relativa (HR %) y su efecto al calentamiento global en la región de Puno (1990 – 2021).

Prueba de tendencia	Prueba estad	criterio de evaluación			Resultado
		a=0.10	a=0.05	a=0.01	
Linear regresión	4.556	1.699	2.045	2.756	S (0.01)
Auto Correlación	4.888	1.645	1.960	2.576	S (0.01)

Una vez aplicada la estadística paramétrica para el caso de la humedad relativa, donde ambas pruebas demuestran alta significancia estadística, es decir existe tendencia positiva cuyo intercepto es de 56.39% y el valor promedio de los 31 años es de 61.806 % y el valor obtenido del año 2021 es de 65.90% estos valores reflejan un incremento. Sabemos, que la humedad relativa es la relación porcentual entre la cantidad de vapor de agua real que contiene el aire y la que necesitaría contener para saturarse a idéntica temperatura, es decir, una humedad relativa del 60% quiere decir que de la totalidad de vapor de agua (el 100%) que podría contener el aire a esta temperatura, solo tiene el 60%. El coeficiente de determinación es de 41.72% este valor es baja.

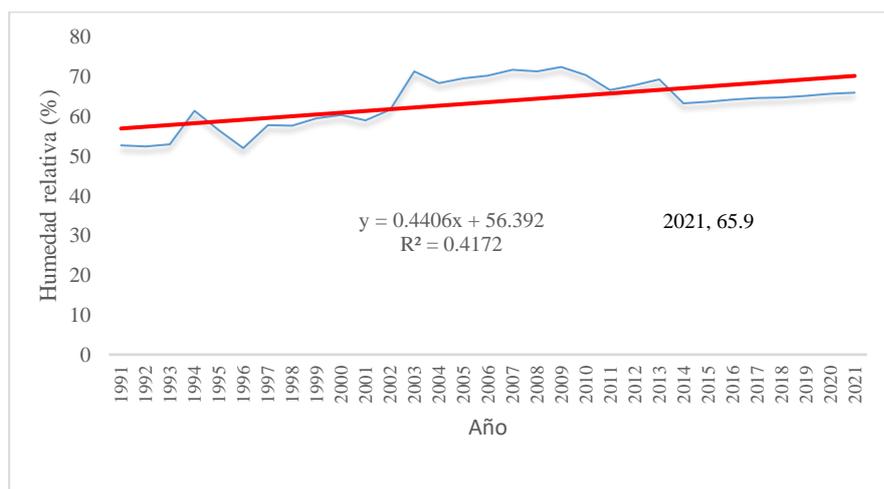


Figura 4 Variación de la humedad relativa medias anuales de Puno (1990-2021)

Tabla 6 Análisis de tendencia de la variación de la precipitación pluvial promedio anual en (mm) y su efecto por el calentamiento global en Puno (1990 – 2021).

	Prueba estad	criterio de evaluación			Resultado
		a=0.10	a=0.05	a=0.01	
Mann-Kendall	1.751	1.645	1.960	2.576	S (0.1)
Spearman's Rho	1.703	1.645	1.960	2.576	S (0.1)

Para el análisis de tendencia- de la variación de la precipitación pluvial promedio anual se aplico los métodos no paramétricos Mann-Kendall y Spearman's Rho que ambas pruebas muestran significancia estadística a la probabilidad de $P=0.1$, la tendencia es positiva el valor promedio de los 31 años es de 101.86 mm y el valor promedio para el año 2021 es de 96.00 mm que es ligeramente inferior respecto al promedio, el coeficiente de determinación es casi nulo.

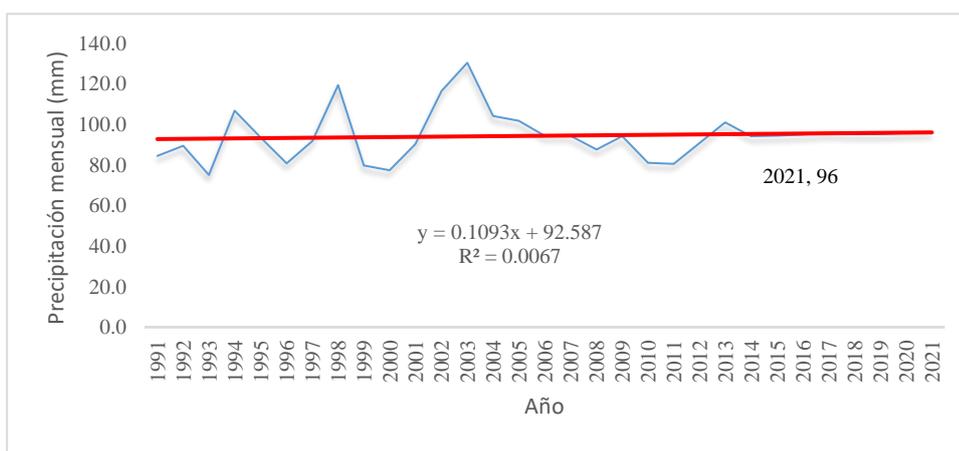


Figura 5 Variación de las precipitaciones mensual de la región de Puno en los años 1990-2021

La pendiente es positiva con un valor de intercepto de 92.587 mm. En el altiplano las características estacionales del clima en la vertiente del titicaca, se manifiestan principalmente en la variación del régimen de las precipitaciones. Se sabe que los cultivos no solo son afectados por la poca precipitación anual, sino también por su irregular distribución espacial y temporal a lo largo de todo el año.

Relación entre la producción de cañihua y elementos climáticos

Tabla 7 Estadística descriptiva de los elementos climáticos y la producción de cañihua (Kg/ha).

Descriptiva	X1(T. max)	X2(T. min)	X3(H. relativa)	X4(P. Pluvial)	Y(Kg/ha)
Media	16.6671	2.8078	61.8065	101.8655	379.5935
Mediana	16.6570	2.9667	63.6439	102.9435	369.1000
Máximo	18.1250	4.0333	75.8333	131.4833	608.0000
Mínimo	15.4917	1.0333	40.5000	65.6333	236.0000
Std. Dev.	0.6224	0.6452	9.1284	13.9076	95.0331

La producción de la cañihua varía entre un máximo de 608.00 Kg/ha y un mínimo de 236.00 Kg/ha este valor de producción corresponde a las estaciones agroclimáticas de Ayaviri, Azangaro y Huancane donde la producción es intensa. Para la evaluación de la relación entre la producción de cañihua y los elementos agroclimáticos se ha utilizado la metodología de regresión múltiple utilizando los estimadores de máxima verosimilitud llegando a los resultados que haciendo comparación con la probabilidad $P \leq 0.05$ las variables de temperatura máxima ($P=0.3044$), temperatura mínima ($P=0.1369$), humedad relativa ($P=0.2711$) y precipitación media anual ($P=0.8535$) estos valores no son significativos estadísticamente para variables climáticas para la estación meteorológica de Ayaviri, esto considerando como variable dependiente la producción de cañihua.

Tabla 8 La regresión múltiple por el método de estimadores de máxima verosimilitud para la estación de Ayaviri

variables		Coefficiente	Error estándar	z-estadística	Probabilidad
Coefficiente	C(1)	-0.074271	4.96565	-0.014957	0.9881
Temperatura máxima	C(2)	1.192624	1.161304	1.026970	0.3044
Temperatura mínima	C(3)	-0.499709	0.335977	-1.487330	0.1369
Humedad relativa	C(4)	0.699547	0.635660	1.100504	0.2711
Precipitación media total	C(5)	0.054641	0.295908	0.184656	0.8535
Sigma	C(6)	0.223219	0.033355	6.692235	0.0000
Log likelihood		2.500000	Akaike info criterion		0.2258
Avg. log likelihood		0.080645	Schwarz criterion		0.5033
Number of Coefs.		6.000000	Hannan-Quinn criter.		0.3162

Realizada el proceso de regresión múltiple utilizando el método de estimadores de máxima verosimilitud para la estación meteorológica de Ayaviri y se obtuvo la ecuación siguiente:

$$Y = -0.074 + 1.19X_1 - 0.49X_2 + 0.69X_3 + 0.05X_4 + 0.2X_5$$

Para la evaluación de la relación entre la producción de cañihua y los elementos agroclimáticos y se ha llegado como resultados y que en comparación con la probabilidad $P \leq 0.05$ las variables de temperatura máxima ($P=0.8236$), temperatura mínima ($P=0.3104$), humedad relativa ($P=0.6648$) y precipitación media anual ($P=0.7237$) estos valores no son significativos estadísticamente para variables agroclimáticos para la estación meteorológica de Azangaro, es decir considerando como variable dependiente la producción de cañihua.

Tabla 9 Resultado de regresión múltiple utilizando el método de estimadores de máxima verosimilitud para la producción de cañihua y las variables agroclimáticas de la estación de Azángaro

variables		Coefficiente	Error estándar	z-estadística	Probabilidad
Coefficiente	C(1)	8.807026	4.075998	2.160704	0.0307
Temperatura máxima	C(2)	-0.390059	1.749498	-0.222955	0.8236
Temperatura mínima	C(3)	-0.476654	0.469924	-1.014321	0.3104
Humedad relativa	C(4)	-0.422999	0.976226	-0.433301	0.6648
Precipitación media total	C(5)	0.152825	0.432297	0.353518	0.7237
Sigma	C(6)	0.230693	0.042414	5.439035	0.0000
Log likelihood		1.479135	Akaike info criterio		0.29166
Avg. log likelihood		0.047714	Schwarz criterio		0.56921
Number of Coefs.		6.000000	Hannan-Quinn criterion		0.38214

Realizada el proceso de regresión múltiple utilizando el método de estimadores de máxima verosimilitud para la estación meteorológica de Azangaro y se obtuvo la ecuación:

$$Y = 8.07 - 0.39X_1 - 0.47X_2 - 0.47X_3 + 0.15X_4 + 0.23X_5$$

Para la evaluación de la relación entre la producción de cañihua y los elementos climáticos se ha utilizado la metodología de estimación de máxima verosimilitud y se ha llegado como resultados que en comparación con la probabilidad $P \leq 0.05$ las variables de temperatura máxima ($P=0.8330$), temperatura mínima ($P=0.7274$), humedad relativa ($P=0.5298$) y precipitación media anual ($P=0.8684$) estos valores no son significativos estadísticamente para variables climáticos para la estación meteorológica de Huancané, es decir considerando como variable dependiente la producción de cañihua.

Tabla 10 Resultado de regresión múltiple por el método de estimadores de máxima verosimilitud para la estación de Huancané

variables		Coefficiente	Error estándar	z-estadística	Probabilidad
Coefficiente	C(1)	6.535137	3.826061	1.708059	0.08760
Temperatura máxima	C(2)	0.227058	1.076862	0.210851	0.83300
Temperatura mínima	C(3)	-0.118642	0.340340	-0.348599	0.72740
Humedad relativa	C(4)	-0.350845	0.558428	-0.628272	0.52980
Precipitación media total	C(5)	0.070954	0.428081	0.165750	0.86840
Sigma	C(6)	0.235129	0.038988	6.030741	0.00000
Log likelihood		0.889282	Akaike info criterion		0.329724
Avg. log likelihood		0.028687	Schwarz criterion		0.607270
Number of Coefs.		6.000000	Hannan-Quinn criter.		0.420197

$$Y = 6.53 + 0.22X_1 - 0.12X_2 - 0.35X_3 + 0.07X_4 + 0.23X_5$$

Discusión

El cultivo de cañihua en los últimos 31 años se observa que el rendimiento varía entre 603.32 kg/ha a 786.32 kg/ha y con desviación estándar de 45.94kg; demostrando que esta relacionada con el volumen de producción en dicho periodo de análisis, donde en promedio alcanzó una producción de 592.63 Ton. por campaña agrícola (Quispe, y otros, 2022). Los factores agroclimáticos tienen mayor influencia en el comportamiento del rendimiento de la producción de cañihua; de ellos se hizo el análisis estadístico y de los coeficientes obtenido con el modelo planteado, llegando a los resultados para las estaciones meteorológicas de Ayaviri, Azángaro y Huancané; las mismas que son consistentes y coincide con los signos esperados de los coeficientes de las variables en análisis.

Según Benique (2019), indica que por cada variación en una unidad de la temperatura máxima el rendimiento de la cañihua aumenta en 3%, y por cada variación en una unidad de la precipitación máxima el rendimiento aumenta 0.34%, por cada variación en una unidad de la precipitación mínima el rendimiento se cae en -2.16%. Mientras la variable humedad máxima por cada variación en una unidad influye en el rendimiento en 0.70%, y la humedad mínima en 0.93% (Benique, 2019).

En la presente investigación se obtuvo un modelo de regresión múltiple utilizando los estimadores de máxima verosimilitud la cual tiene mejores características que en comparación con lo obtenido por mínimos cuadrados ordinarios tal como obtuvieron Quispe-Mamani et al.(2022); además ellos obtuvieron una influencia de 53.68% de las variables climáticas sobre el rendimiento de Cañihua, del mismo modo que en nuestra investigación. En nuestra investigación las variables de mayor influencia son la temperatura mínima en las estaciones: Ayaviri, Azangaro y Huancane; mientras la variable agroclimática de humedad relativa en la estación Huancané, por tener menores valores de probabilidad de los coeficientes en los modelos de regresión. En relación a este resultado Quispe-Mamani et al. (2022) han obtenido de forma similar que la humedad relativa y la temperatura mínima son las variables más influyentes en el rendimiento de Cañihua.

Conclusiones

Realizada la prueba de normalidad por el método de Shapiro-Walk a los datos agroclimáticos como son: temperaturas máximas, temperaturas mínimas y humedad relativa, se obtuvieron valores de 0.487, 0.824 y 0.083 respectivamente, siguen a la distribución normal; por lo que, se acepta la hipótesis nula y rechazamos la hipótesis alterna; para el análisis de tendencia se ha utilizado las pruebas paramétricas como regresión lineal y autocorrelación; y para las pruebas no paramétrica como es el caso Mann-Kendal y Spearman's Rho; los resultados de estas pruebas demuestran que existen tendencias positivas para todas las variables tal como se observa en los gráficos; considerando los resultados de análisis de tendencia y de acuerdo a la probabilidad $P \leq 0.05$, para todas las variables son significativos.

La relación que existe entre la producción de cañihua y variables climáticas a la probabilidad de $P \geq 0.05$, no muestra significancia estadística para las variables agroclimáticas como: la temperatura

máxima, temperatura mínima, humedad relativa y precipitación pluvial media, para las tres estaciones meteorológicas de Ayaviri, Azángaro y Huancané; para la estación Ayaviri la temperatura máxima, Temperatura mínima, humedad relativa y precipitación media anual con coeficientes: 0.304, 0.137, 0.271 y 0.854 respectivamente, estos valores tienen signo positivo lo indica la relación directa, es decir a mayor temperatura máxima se incrementa la producción de cañihua. El rendimiento de la producción de cañihua varía entre 608.00 a 236.00 Kg/ha. Con desviación estándar de 95.03 Kg.

Agradecimientos

Nuestro agradecimiento a la Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno y a sus autoridades.

Referencias

- Aceituno, P. (1988). On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part I: Surface climate. *Monthly Weather Review*, 116(3), 505-524.
- Aceituno, P. (1989). On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part 2. Upper-Air Circulation. *Journal of Climate*, 2, p. 341-355.
- Aceituno, P., & Montesinos, A. (1993). Circulation anomalies associated with dry wet periods in the South American Altiplano. *Fourth International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography Hobart, Australia*, p.330-331.
- Chura, C. R., Cubillas, L. A., Tam, J. M., Segura, M. Z., & Villanueva, C. Q. (2012). Relación entre el Nivel del Lago y la Precipitación Sobre los Desembarques del Pejerrey *Odontesthes Bonariensis* (Valenciennes, 1835) en el Sector Peruano del Lago Titicaca entre 1981 Y 2010. *Ecología Aplicada*, 12(1).
- Galvez, A. P. (2017). Caracterización de la sequías Históricas y Proyectadas Bajo Escenarios de Cambio Climático en la Cuenca del Río Mantaro. Lima Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina, Maestría en Recursos Hídricos.
- Guzmán, F. (2013). Evaluación del impacto del cambio climático en el cultivo de café en la cuenca alta del río Sisa, provincias de Lamas (distrito Alonso de Alvarado) y El Dorado (distrito San Martín de Alao) región San Martín. Lima Perú: Tesis de maestría. Universidad Nacional Agraria La Molina. 80 p.
- IPCC. (2007). *IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- Kiladez, G., & Diaz, H. (1989). Global climate anomalies associated with extremes in the Southern Oscillation. *J. Climate* 2, p. 1069-1090.
- Lagos, P., Silva, Y., Nickl, E., & Mosquera, K. (2008). El Niño-related precipitation variability in Perú. *Advances in Geosciences*. 14, p. 231-237.
- Lavado, C. W., Ronchail, J., Labat, D., Guyos, L., & Espinoza, J. (2012). A basin-scale analysis of rainfall and runoff in Peru (1969-2004) Pacific, Titicaca and Amazonas drainages. *Hydrological Sciences Journal*. 57 (4), p. 1-18.
- Martelo, M. t. (2006). Impacto del cambio climático en la agricultura de Venezuela. Caracas. Venezuela: Universidad Central de Venezuela. Departamento Ingeniería Hidrometeorológica, Facultad de Ingeniería.
- Martin, L., Fournier, M., Mourguiart, P., Siffedine, A., Turq, B., Absy, M. L., & Flesor, M. L. (1993). Southern oscillation signal in South American paleoclimatic data of the last 7000 years. *Quaternary Research*, 39, 338-346.

- MINAM. (2014). Estado de la Calidad Ambiental de la Cuenca del Lago Titicaca Ambito Peruano. Lima Peru.: Comisión Multisectorial para la Prevención y Recuperación Ambiental del Lago Titicaca y sus Afluentes (D.S. N° 075-2013-PCM).
- Rome-Gaspaldy, S., & Ronchail, J. (1999). La pluviometría en el Perú durante las fases ENSO y LNSO. *Bulletin de l'Institut francais d'études Andins*. 27(3), p. 675-685.
- Ronchail, J., Espinoza, J., Calde, J., & Lavado, W. (2014). Evolucion del nivel del Lago Titicaca durante el siglo 20. https://www.researchgate.net/publication/301363061_.
- Sanabria, J., Marengo, J., & Valverde, M. (2009). Escenarios de Cambio Climático con modelos regionales sobre el Altiplano Peruano (Departamento de Puno). São Paulo, Brasil: Revista Peruana Geo-Atmosférica Rpga (1), 134-149 (2009).
- Sanabria, J., Marengo, J., & Velarde, M. (2010). Escenarios de Cambio Climático con modelos regionales sobre el Altiplano Peruano (Departamento de Puno) Centro de Ciencias do Sistema Terrestre-INPE. Rodovia Presidente Dutra, Km 40, 12630-000 Cachoeira Paulista, São Paulo, Brasil: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, SENAMHI.
- Schlesinger, W. (2000). Biogeoquímica: un análisis del cambio global. Barcelona: Colección Ariel Ciencias. Editorial Ariel, S.A. 582 p.
- Sztorch, L., Gicquel, V., & Desenclos, J. C. (1989). The Relief Operation in Puno District, Peru. after the 1986 Floods of Lake Titicaca. *Disasters*, 13: 33-43, p 50-62. doi:doi: 10.1111/j.1467-7717.1989.tb00693.x
- TDPS, (-S. G. (2011). Perspectivas del Medio Ambiente. Panama: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).
- Velasquez, V. (2011). Efectos del cambio climático en el sector primario de dos especies de importancia económica para el estado de México. Tesis de Ingeniería Geógrafa. Universidad Nacional Autónoma de México. 83 p.
- Watson, R. M., Zinyowera, R., & Dokken, D. (1997). Impactos regionales del cambio climático; evaluación de la vulnerabilidad (Resumen para responsables de políticas). Informe especial de grupo de trabajo II del IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). Publicado por la Organización Petrológica Mundial (OMM) & el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), Suiza. , 16 p.