



Scientia Agropecuaria

Web page: <http://revistas.unitru.edu.pe/index.php/scientiaagrop>

Facultad de Ciencias
Agropecuarias

Universidad Nacional de
Trujillo

RESEARCH ARTICLE



Vulnerability of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) to environmental stress events in the high Andean regions of Peru

Vulnerabilidad de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) ante eventos de estrés ambiental en las regiones altoandinas del Perú

Kevin P. Ccoyllar-Quintanilla^{1, *} ; Ana F. Zaravia-Povis¹ ; Arlitt A. Lozano-Povis¹ ; José V. Cornejo-Tueros¹ 

¹ Universidad Continental, Campus Huancayo S.A.C. Av. San Carlos 1980 - Urb. San Antonio, Huancayo, Junín. Peru.

* Corresponding author: 75988814@continental.edu.pe (K. P. Ccoyllar Quintanilla).

Received: 30 March 2021. Accepted: 27 November 2021. Published: 15 December 2021.

Abstract

Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) is an agricultural crop that was domesticated in the Andes of Peru and Bolivia, and that has managed to be produced in any type of soil, characterized by its high amount of nutrients and because it is a species that comes to combat abiotic stresses such as drought, salinity, among others. For example, in the face of drought and high temperatures, this crop becomes very tolerant as it has shown that it uses smaller amounts of water and adapts to fluctuations in the climate during biomass production, which makes it a great alternative for regions, arid and semi-arid. In this sense, the objective of this research article was to determine the vulnerability of the cultivation of quinoa to environmental stress events in the high Andean regions of Peru, through the development and analysis of the current distribution model and its future projections for 2050 and 2070 in scenarios RCP 2.6, RCP 4.5 and RCP 8.5 considering their points of presence and the different bioclimates. Likewise, determine by means of the BAM diagram the optimal zones for its development, considering the abiotic, biotic and accessibility variables. In conclusion, it was obtained that quinoa becomes very tolerant to abiotic stress events such as drought and high temperatures, highlighting as the most optimal areas for its development the departments of Puno, Apurímac, Ayacucho and Cuzco.

Keywords: quinoa; yield; vulnerability; climate models; environmental stress.

Resumen

La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd), es un cultivo agrícola que fue domesticado en los Andes del Perú y Bolivia, y que ha logrado producirse en cualquier tipo de suelo, caracterizándose por su alta cantidad de nutrientes y porque es una especie que llega a combatir los estreses abióticos como la sequía, la salinidad, entre otros. Por ejemplo, ante la sequía y altas temperaturas, este cultivo llega a ser muy tolerante pues ha demostrado que utiliza menores cantidades de agua y se adapta a las fluctuaciones del clima durante la producción de biomasa, lo que la convierte en una gran alternativa para regiones áridas y semiáridas. En ese sentido, el objetivo de este artículo de investigación fue determinar la vulnerabilidad del cultivo de la quinua ante eventos de estrés ambiental en las regiones altoandinas del Perú, mediante la elaboración y análisis del modelo de distribución actual y sus proyecciones futuras para el 2050 y 2070 en escenarios RCP 2.6, RCP 4.5 Y RCP 8.5 considerando sus puntos de presencia y los distintos bioclimas. Asimismo, determinar mediante el diagrama BAM las zonas óptimas para su desarrollo, teniendo en cuenta las variables abióticas, bióticas y accesibilidad. En conclusión, se obtuvo, que la quinua llega a ser muy tolerante a eventos de estrés abiótico como sequía y altas temperaturas; destacando como zonas óptimas para su desarrollo los departamentos de Puno, Apurímac, Ayacucho y Cuzco.

Palabras clave: quinua; rendimiento; vulnerabilidad; modelos climáticos; estrés ambiental.

DOI: <https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.063>

Cite this article:

Ccoyllar-Quintanilla, K. P., Zaravia-Povis, A. F., Lozano-Povis, A. A., & Cornejo-Tueros, J. V. (2021). Vulnerabilidad de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) ante eventos de estrés ambiental en las regiones altoandinas del Perú. *Scientia Agropecuaria*, 12(4), 589-597.

1. Introducción

La presencia de fenómenos climáticos extremos, representan grandes desafíos para la seguridad alimentaria (Lennox & Gowdy, 2014) pues estos tienen un efecto negativo en el rendimiento y la producción de alimentos. En este sentido, una especie puede ser

influenciada por 3 condiciones ambientales que son : los factores abióticos como la precipitación o temperatura que indican las condiciones apropiadas para garantizar el crecimiento del cultivo; los factores bióticos (bacterias, hongos y virus) que pueden afectar el proceso de crecimiento de la planta dañando el tallo, panoja y otros

órganos (Palit et al., 2020); y la presencia de plantas invasoras que compiten con estos cultivos consumiendo sus nutrientes provocando la disminución de su productividad (Valdez-Arena et al., 2020).

En medio de este escenario, hace algunos años, un reducido grupo de agricultores de las zonas altoandinas realizan la siembra y cultivo de la quinua, tratándose de un producto muy nutritivo ya que produce un metabolito secundario conocido como fenólica (Borrell et al., 2020). Este cultivo ha mostrado un prometedor proceso de adaptación ante el cambio climático logrando un normal desarrollo vegetativo a altitudes entre 2000 y 3500 msnm, cumpliendo con el índice de cosecha y rendimiento esperado (Amador & Montesinos, 2017). Entre los principales exportadores de este producto se encuentran Perú y Bolivia, con un porcentaje representativo del 74%, valor que no desmerece el nivel de producción de otros países (Alandia et al., 2020). Es así que, en la mayoría de los departamentos ubicados en los andes de nuestro país, su adaptación geográfica ha permitido la renovación de prácticas agrícolas durante la etapa de siembra (Stevens, 2017) y la producción de varias cepas (Bedoya-perales et al., 2018).

Por ello, en esta investigación, se pretende determinar la vulnerabilidad del cultivo de la quinua ante eventos de estrés ambiental en las regiones altoandinas del Perú, mediante la elaboración y análisis del modelo de distribución actual y sus proyecciones futuras para el 2050 y 2070 en escenarios RCP 2.6, RCP 4.5 Y RCP 8.5 considerando sus puntos de presencia y los distintos

bioclimas. Asimismo, determinar mediante el diagrama BAM las zonas óptimas para su desarrollo, teniendo en cuenta las variables abióticas, bióticas y accesibilidad.

2. Materiales y métodos

2.1 Área de Estudio

Para esta investigación se consideró como área de estudio la zona altoandina del Perú, que geográficamente se encuentra ubicada en la latitud -9.189967 y longitud -75.015152, hace parte del continente de América del Sur y está ubicado en el hemisferio sur, además se encuentra dividido en 25 regiones políticas (Bedoya-Perales et al., 2018). A continuación, se presenta la metodología seguida para establecer el modelo de distribución potencial del cultivo de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd).

2.1.1 Puntos de Ocurrencia

Respecto a los puntos de ocurrencia o coordenadas geográficas del cultivo, fueron extraídos de bases de datos públicas que se encuentran en línea como: GBIF, Trópicos, Herbariova y Naturalist, de todo el Perú. Posterior a ello, de un total de 409 datos, se realizó la limpieza de errores de ubicación geográfica, mediante el método de observación en referencia a los XYZ Tiles del software QGIS (Deb et al., 2017). De esa manera, se llegó a obtener un total de 31 puntos de ocurrencia (Tabla 1) que formaron parte del análisis actual y futuro en el modelamiento de distribución potencial, mostrado más adelante.

Tabla 1

Registro de puntos de ocurrencia de *Chenopodium quinoa* Willd

ID	Especie	Longitud	Latitud	Departamento
1	<i>Chenopodium quinoa</i> Willd	-69.33333	-14.41667	Puno
2	<i>Chenopodium quinoa</i> Willd	-69.78333	-16.00000	Puno
3	<i>Chenopodium quinoa</i> Willd	-70.23333	-16.45000	Puno
4	<i>Chenopodium quinoa</i> Willd	-71.96670	-13.50000	Cusco
5	<i>Chenopodium quinoa</i> Willd	-75.50000	-11.80000	Junín
6	<i>Chenopodium quinoa</i> Willd	-70.08626	-16.06654	Puno
7	<i>Chenopodium quinoa</i> Willd	-72.25000	-16.00000	Arequipa
8	<i>Chenopodium quinoa</i> Willd	-77.69000	-9.41000	Ancash
9	<i>Chenopodium quinoa</i> Willd	-77.65429	-9.57343	Ancash
10	<i>Chenopodium quinoa</i> Willd	-73.99276	-13.99859	Ayacucho
11	<i>Chenopodium quinoa</i> Willd	-77.69218	-9.41970	Ancash
12	<i>Chenopodium quinoa</i> Willd	-70.16528	-16.27444	Puno
13	<i>Chenopodium quinoa</i> Willd	-78.29448	-7.94789	La Libertad
14	<i>Chenopodium quinoa</i> Willd	-73.99000	-13.89000	Ayacucho
15	<i>Chenopodium quinoa</i> Willd	-78.59000	-6.19000	Cajamarca
16	<i>Chenopodium quinoa</i> Willd	-78.59602	-6.19302	Cajamarca
17	<i>Chenopodium quinoa</i> Willd	-78.29000	-7.94000	La Libertad
18	<i>Chenopodium quinoa</i> Willd	-71.92632	-13.47445	Cusco
19	<i>Chenopodium quinoa</i> Willd	-71.88799	-13.46153	Cusco
20	<i>Chenopodium quinoa</i> Willd	-71.85022	-13.76022	Cusco
21	<i>Chenopodium quinoa</i> Willd	-71.91667	-13.66667	Cusco
22	<i>Chenopodium quinoa</i> Willd	-80.26928	-5.22773	Piura
23	<i>Chenopodium quinoa</i> Willd	-78.46499	-7.13704	Cajamarca
24	<i>Chenopodium quinoa</i> Willd	-71.66670	-13.23330	Cusco
25	<i>Chenopodium quinoa</i> Willd	-70.16530	-16.27440	Puno
26	<i>Chenopodium quinoa</i> Willd	-70.00000	-15.00000	Puno
27	<i>Chenopodium quinoa</i> Willd	-72.13333	-13.43333	Cusco
28	<i>Chenopodium quinoa</i> Willd	-71.92535	-13.67337	Cusco
29	<i>Chenopodium quinoa</i> Willd	-80.26000	-5.22000	Piura
30	<i>Chenopodium quinoa</i> Willd	-70.11667	-15.13333	Puno
31	<i>Chenopodium quinoa</i> Willd	-69.33333	-14.50000	Puno

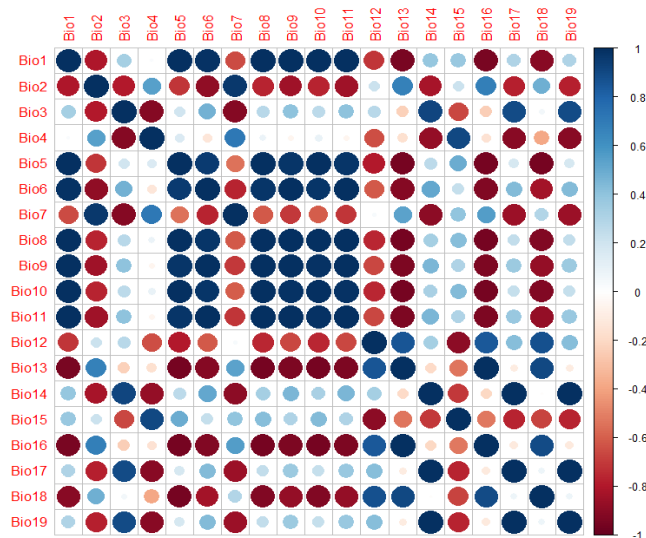


Figura 1. Matriz de correlación.

Para el análisis de estos datos, se utilizaron tres Rutas de Concentración Representativa de CO₂ (RCP 2.6, RCP 4.5 y RCP 8.5), siguiendo lo propuesto en el último informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático. Estos RCP, se encuentran en función a las capas proyectadas a los años 2050 y 2070, que son el resultado del promedio de los años (2041-2060) y (2061-2080), respectivamente. Luego, estas capas fueron recortadas con la herramienta cortar ráster por capa de máscara en formato ASC (*.asc) y sistema de coordenadas WGS84, en referencia al área de estudio con el software QGIS. De los puntos de presencia obtenidos, con la herramienta SAGA (Add raster values to point), se extrajeron los valores de 19 variables bioclimáticas descritas más adelante. Asimismo, los datos actuales fueron obtenidos del promedio de precipitación y temperatura registrados durante el período (1970-2000). Mientras que, los datos futuros, con el modelo de proyección climática HadGEM2-ES (Bosso et al., 2016), perteneciente al "Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados-Fase 5 (CMIP5)" (López-Tirado et al., 2018).

2.2 Variables Bioclimáticas (BIOS)

En un principio, fueron consideradas 19 variables bioclimáticas que incluían la temperatura y precipitación, extraídas de la base de datos WorldClim con resolución espacial de 2,5 minutos. Pero, al final, solo fueron consideradas aquellas cuyos valores se situaban por encima de $\pm 0,8$, según el modelo estadístico de Pearson (Figura 1).

2.3 Modelo de Distribución Potencial

Para el procesamiento de distribución actual y las proyecciones al 2050 y 2070 por cada RCP, se realizaron 10 repeticiones teniendo en cuenta el 100% de los puntos de ocurrencia, un umbral de convergencia de 0.00001, un número máximo de puntos de fondo de 10000 con iteraciones máximas de 500.

En cuanto al formato de salida, se seleccionó el de tipo logístico debido a que su representación es más fácil de interpretar por los sistemas de información geográfica,

además de permitir una mejor visualización. Finalmente, para el análisis del rendimiento del modelo de acuerdo al AUC, se consideró que los valores que se encontraron por debajo de 0.5 son de bajo rendimiento, mientras que los modelos con valores cercanos a 1 representaron la máxima capacidad predictiva (Dolgener et al., 2013).

Post análisis del Modelo de Distribución

Haciendo el uso del software QGIS 3.16.3, se asignó la simbología adecuada respecto a la clasificación de 0 a 1 (donde 0 indicó ausencia y 1 alta idoneidad respecto a la probabilidad de distribución adecuada para la productividad de este cultivo). Luego, para una mejor visualización del mapa resultante de probabilidad de presencia del cultivo bajo condiciones climáticas, se clasificó en 5 categorías, donde 0,00 indicaron áreas de nula probabilidad cuyo color característico fue el azul; 0,25 áreas de baja probabilidad representadas por el color verde; 0,50 áreas de media probabilidad representadas por el color amarillo; 0,75 áreas de alta probabilidad representadas por el color naranja; 1,00 de muy alta probabilidad representada por el color rojo (Yan et al., 2017).

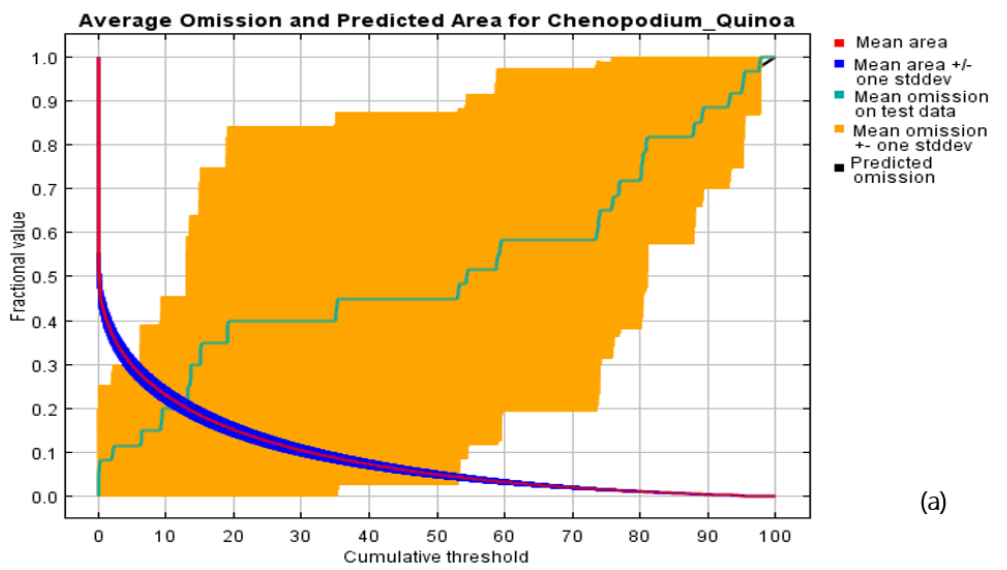
3. Resultados y discusión

3.1 Modelo de distribución

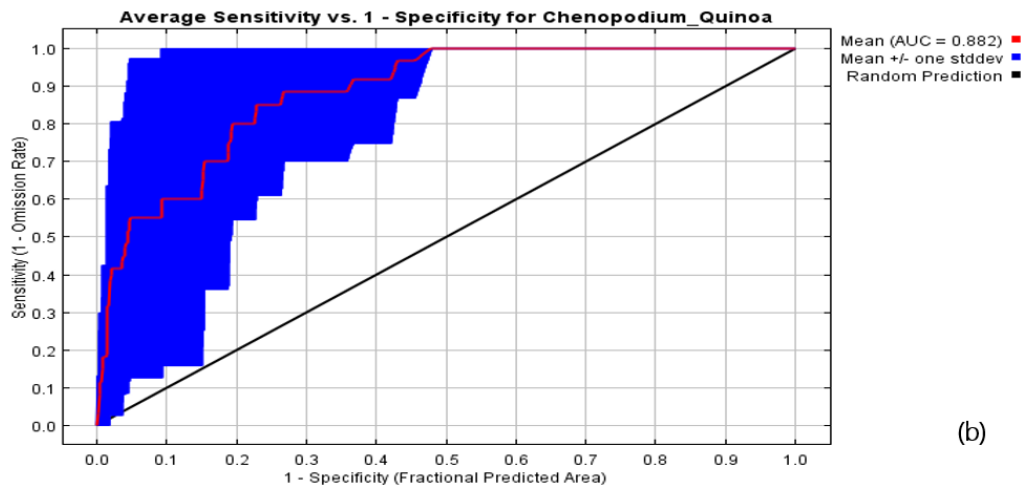
En el modelo de distribución se obtuvieron un total de ocho variables que tuvieron correlación menor o igual a 0.79 y fueron: Isotermalidad, estacionalidad de temperatura, temperatura máxima del período más caliente, rango anual de temperaturas, precipitación en el período más lluvioso, precipitación en el período más seco, estacionalidad de la precipitación y precipitación en el trimestre más caluroso, empleando el software MaxEnt. De aquí se tiene que, en cuanto a la contribución relativa proporcionada de acuerdo a la estimación de las variables ambientales en el proceso de modelado en MaxEnt, las que más influyeron en la distribución (Tabla 2) de *Chenopodium quinoa* Willd fueron: BIO5 (49,7%), BIO7 (21,8%), BIO14 (13,6%) y BIO18 (10,2%).

Tabla 2
 Porcentaje de Contribución (%C) e importancia de la permutación (IP) de la distribución potencial en el modelo Logístico

Variable	Descripción	Modelo Maxent	
		%C	IP
BIO1	Temperatura promedio anual (°C)	-	-
BIO2	Rango medio diario (temp max - temp min; promedio mensual) (°C)	-	-
BIO3	Isotermalidad (BIO1/BIO7)*100 (°C)	0.4	2
BIO4	Estacionalidad en temperatura (SD x 100) (°C)	0.8	2.2
BIO5	Temperatura máxima del período más caliente (°C)	49.7	0.8
BIO6	Temperatura mínima del período más frío (°C)	-	-
BIO7	Rango anual de temperatura (BIO5 - BIO6) (°C)	21.8	9.3
BIO8	Temperatura media en el trimestre más lluvioso (°C)	-	-
BIO9	Temperatura promedio en el trimestre más seco (°C)	-	-
BIO10	Temperatura promedio en el trimestre más caluroso (°C)	-	-
BIO11	Temperatura promedio en el trimestre más frío (°C)	-	-
BIO12	Precipitación anual (mm)	-	-
BIO13	Precipitación en el período más lluvioso (mm)	2.5	10.7
BIO14	Precipitación en el período más seco (mm)	13.6	18.2
BIO15	Estacionalidad de la precipitación (Coeficiente de Variación)	1.1	4
BIO16	Precipitación en el trimestre más lluvioso (mm)	-	-
BIO17	Precipitación en el trimestre más seco (mm)	-	-
BIO18	Precipitación en el trimestre más caluroso (mm)	10.2	52.7
BIO19	Precipitación en el trimestre más frío (mm)	-	-



(a)



(b)

Figura 2. Estimación del modelo y sensibilidad para *Chenopodium quinoa* Willd: (a) Omisión promedio y área pronosticada, (b) Sensibilidad vs Especificidad.

En relación al modelo de distribución, el BIO13 y BIO18 fueron los que contribuyeron más a la especie en escenarios climáticos dentro del área de estudio similares resultados fueron obtenidos por **Boral & Moktan (2021)** quienes, para obtener su modelo de distribución, trabajaron con variables similares a las de nuestro estudio, sin embargo, las que más influyeron fueron el BIO5 y BIO7, ya que se encuentran a menor altitud dándose el cambio de variables de mayor representatividad. Asimismo, según **Lisovsky & Dudov (2021)**, el modelo MaxEnt en un estudio no aleatorio necesita corrección geográfica respecto a los puntos de ocurrencia para obtener mayor exactitud y mejorar la predictividad en función a las variables climáticas evaluadas mediante la correlación de ellas.

Por otro lado, en la **Figura 2a** se muestra la estimación del modelo en función al valor del umbral acumulativo (X), el cual permitió predecir la presencia o ausencia de la quinua, mediante la comparación de la línea de omisión predicha y la curva de fracción del área total pronosticada. En casos extremos, el umbral 0 indicó que todos los valores de los puntos de muestreo están presentes, por lo tanto, la fracción es 1; mientras que en un umbral de 100 indicó que la fracción es 0, es decir hay ausencia de los valores.

En la **Figura 2b** se muestra la curva operacional conocida ROC (Característica Operativa del receptor) para dos grupos de datos que son el de prueba que representa el área de color azul, mientras el entrenamiento está representado por la línea de color rojo, que calcula el área que se encuentra por debajo de la curva conocido como el valor AUC, el cual permite seleccionar y evaluar el mejor modelo de distribución. Por lo tanto, el valor de AUC cercano a 1 y mayor a 0,5 se considera un buen modelo, en nuestro caso el valor de AUC medio es de 0,882 para

el cultivo *Chenopodium quinoa* Willd, indicando que este es bueno.

En ese sentido, **Ejigu & Tassie (2020)**, en su modelo de distribución el valor de AUC promedio de todas sus repeticiones, obtuvieron un valor de 0,85 lo cual indica que es bueno, en el caso de la investigación se obtuvo un valor de AUC similar indicando que el modelo tiene buen funcionamiento de predicción. Por otra parte, **Anand et al. (2021)** argumentan que mientras el modelo se acerque a la unidad es de mayor confiabilidad para la distribución de especies a escala espacio temporal respecto a variables climáticas u otros.

De la **Figura 3** se obtuvo que la extensión actual ambientalmente adecuada para el desarrollo del cultivo de la quinua tiene una probabilidad de ocurrencia mayor al 75% y se encuentra centrada en los andes del Perú, específicamente en los departamentos de Puno, Apurímac, Ayacucho y Cuzco. Por otro lado, la extensión máxima en toda la zona andina del Perú es de 70547,131 km², mínima de 27425,797 km² y un promedio de 32861,998 km² para idoneidad muy alta.

3.2 Proyección del modelo de distribución de especies

Seguidamente, según el modelo de distribución de la quinua, en la **Figura 4** se presentan las proyecciones al 2050 y 2070. De aquí se determinó que, las áreas óptimas de productividad se encuentran en la región Puno, Cuzco y Apurímac bajo escenarios RCP2.6 y RCP4.5, si es que se compara con el modelo de distribución actual. Mientras que, bajo un escenario RCP8.5 tiende a tener recuperación de extensión geográfica, teniendo mejor adaptación ante sequías. Según el IPCC para la justificación del modelado por el incremento de temperatura promedio para el año 2100 es de 0,3 – 1,7 °C en escenario RCP2.6; 1,1 – 2,6 °C en el escenario RCP4.5 y de 2,6 – 4,8 °C en el escenario RCP8.5.

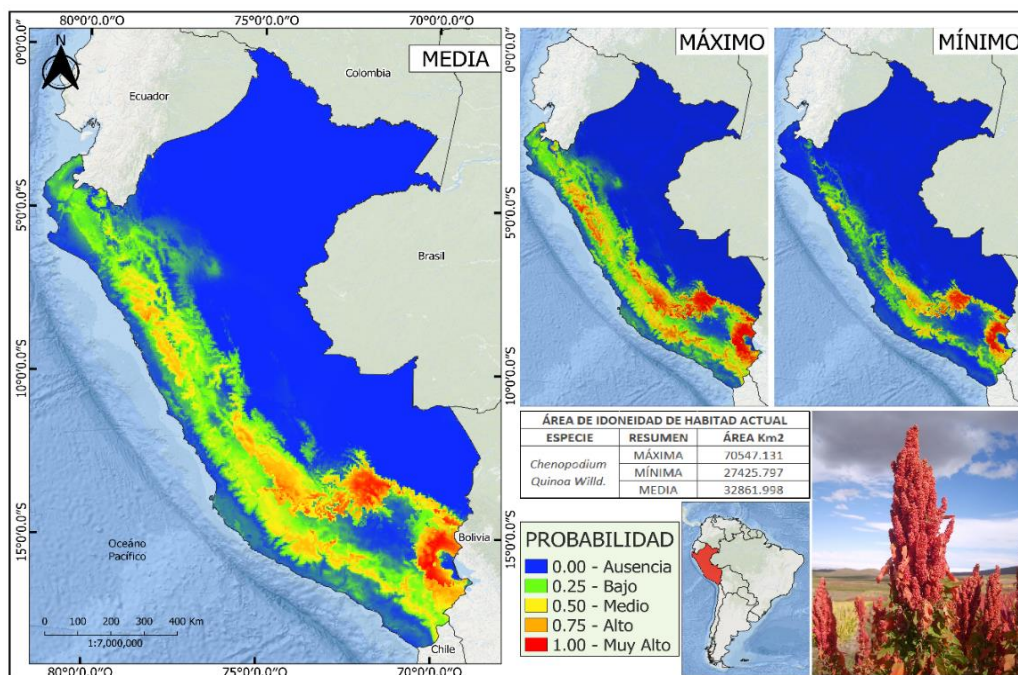


Figura 3. Extensión actual de *Chenopodium quinoa* Willd.

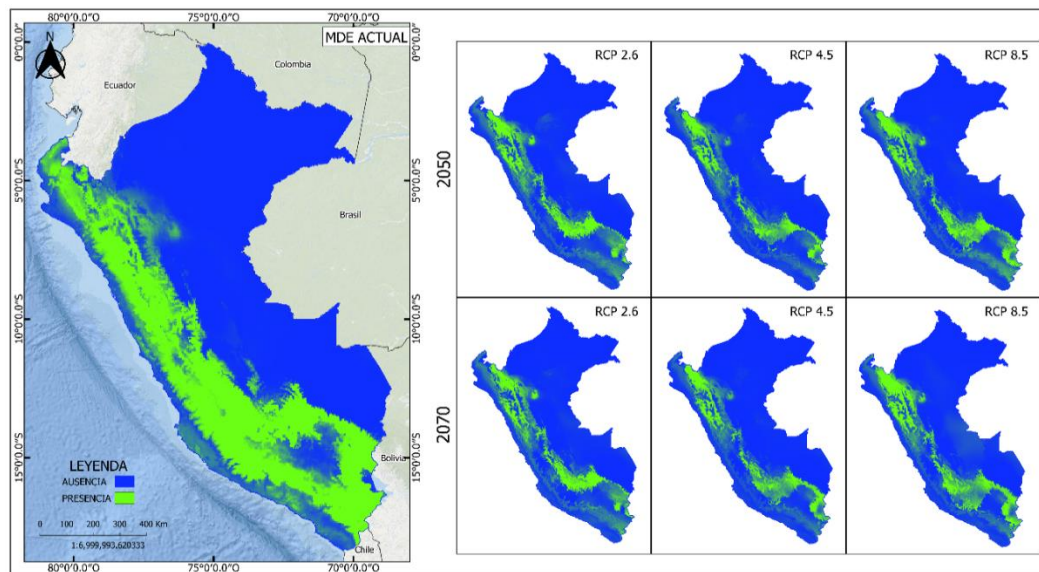


Figura 4. Proyecciones para la distribución de la quinua al 2050 y 2070.

Respecto a su presencia y distribución en función a la variabilidad climática, Hu et al. (2018) obtuvieron resultados similares al aplicar la metodología MaxEnt en la determinación de áreas óptimas para el desarrollo de las especies, concluyendo que este modelo con las variables climáticas (BIO2, BIO5, BIO7 y BIO8) tiene valor para que mediante programas de conservación persista en el futuro frente a eventos climáticos. Asimismo, Ramzani et al. (2017) refirieron que la quinua se adapta a condiciones de estrés abiótico demostrando que es posible mejorar su biodisponibilidad y translocación de nutrientes esenciales del suelo, destacando el uso de la harina de quinua por los beneficios nutricionales y funcionales que brinda. Por ello, (Vacher, 1998) evaluó la respuesta de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) y la papa amarga (*Solanum juzepczukii* Buk) ante estos eventos climáticos, obteniendo grandes resultados en el rendimiento del cultivo. Además (Fagandini et al., 2020) los andes peruanos es el origen del cultivo y mediante un mapeo participativo evidenciaron que la mayor productividad se da en la región Puno, resultado que afirma el modelo de distribución del cultivo.

3.3 Vulnerabilidad de la quinua bajo condiciones de sequía

En la Figura 5 se indica que respecto a la variable de precipitación en el BIO18 cuando se encuentra en el rango de 0 a 100 durante el trimestre más caluroso la probabilidad predicha, es de 0,82, en cambio cuando supera los 700 mm se reduce a 0, esto significa que, a más de 700 mm, el cultivo va a tener dificultades para su normal producción.

Además, en el BIO15 se alcanzó la probabilidad de 0,9 y este valor también se redujo a mayor estacionalidad de la precipitación. Por otro lado, en el BIO14 se evidenció 0,75 de probabilidad predicha por la ausencia de precipitación en el período más seco y en el BIO13 cuando la precipitación llega a alcanzar los 150 mm en el período

más lluvioso su probabilidad es de 0,70, siendo el valor óptimo para su crecimiento.

Respecto a esta variable, resultados similares fueron obtenidos por Vacher (1998), quien reportó que las respuestas a la sequía de los principales cultivos del Altiplano; quinua y papa amarga, ante eventos de déficit hídrico (con una precipitación de 62 mm y evapotranspiración potencial de 186 mm), durante los dos últimos meses del ciclo de cultivo provoca caídas masivas en el potencial hídrico de las hojas, la tasa de transpiración y conductancia estomática en todos los cultivos. Asimismo, Miranda-Apodaca et al. (2020) indican en su investigación que el metabolismo del N de la quinua es tolerante a la sequía y al estrés salino, aunque las estrategias de esta especie para hacer frente a estos estreses ambientales dependen de la cantidad de precipitación y concentración de sales, por ello se está convirtiendo en un pseudocereal alternativo para el suministro de alimentos. También, Muscolo et al. (2016) reportan que, *Chenopodium quinoa* Willd al ser una especie halófila facultativa nativa de la región andina sugiere que la salinidad más que la sequía puede mejorar el valor nutricional de la quinua, como cultivo vegetal y productor de metabolitos farmacéuticos, mientras se mantiene la producción de biomasa.

Este cultivo puede llegar a ser tolerante al estrés hídrico, sin embargo, no hay mucha información sobre su crecimiento bajo riego total, particularmente en regiones cálidas y semiáridas y en un estudio realizado por Ahmadi et al. (2019), bajo tres densidades de siembra al Sur de Irán, determinaron que la quinua tiene un sistema fisiológico específico que permite la transpiración continua y un mejor enfriamiento de las hojas a altas temperaturas indicando que es un súper cultivo que no solo puede tolerar el estrés hídrico, sino que también puede crecer potencialmente bien y producir un rendimiento de grano aceptable en las áreas cálidas y semiáridas.

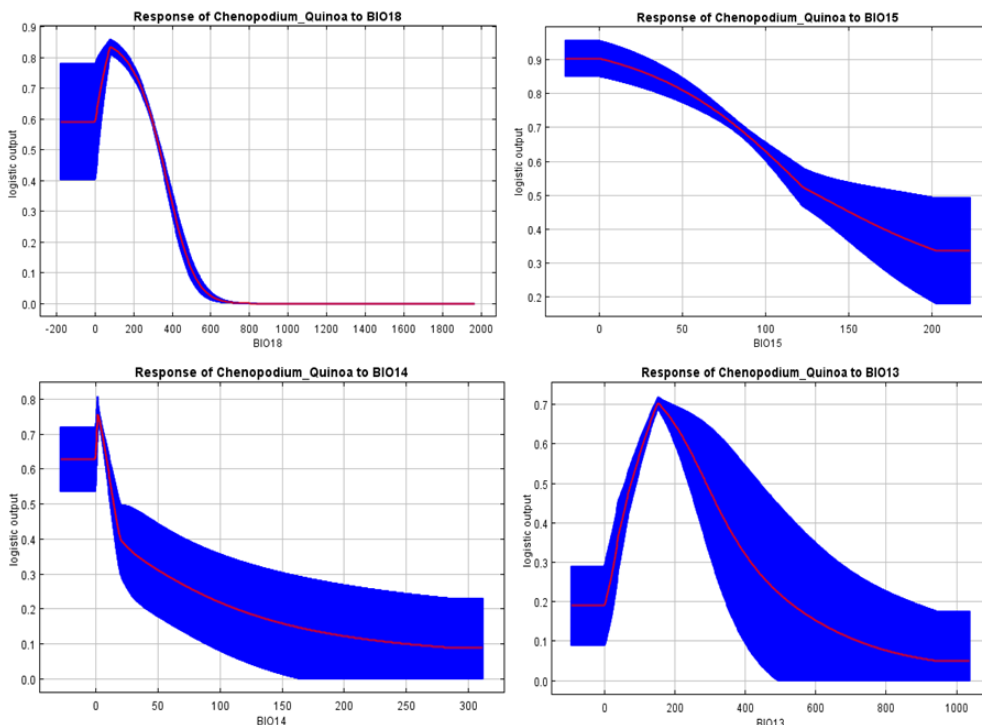


Figura 5. Respuesta de *Chenopodium quinoa* Willd a variables bioclimáticas asociadas a la precipitación.

3.4 Temperatura

El cultivo de la quinua cuenta con gran capacidad de adaptación en suelos pobres y salinos además de lograr producir granos nutritivos sin considerar su alta susceptibilidad a climas que superan los 32 °C. En la siguiente figura se muestra el promedio de las 10 repeticiones realizadas en el software MaxEnt. De esta se señala que, respecto a la variable de temperatura (BIO7) esta tiene mayor influencia en la quinua cuando alcanza un rango anual de (20 - 22 °C) teniendo una probabilidad predicha de 0,75, en el BIO5 en un rango de 0 a 5 en el período más caliente tiene probabilidad de aproximadamente de 0,74, en el BIO4 en un rango de 100 a 150 de estacionalidad tiene probabilidad de aproximadamente 0,67, en el BIO3 en un rango 90 a 95 de Isotermalidad manteniéndose constante con una probabilidad de 0,85, todo ello indica que si se obtiene esos rangos, el cultivo tendrá esa probabilidad predicha de producción.

Entre los eventos climáticos que representan uno de los principales factores limitantes de la producción agrícola altoandina, destacan las heladas. A pesar de ello, la quinua ha demostrado ser uno de los cultivos que se adapta con mayor facilidad a estas condiciones climáticas. En ese sentido **Alandía et al. (2020)** evaluaron la respuesta de la quinua ante diversas intensidades y duraciones de las heladas sobre el rendimiento de semillas, así como la tasa de muerte de las plantas, obteniendo que los daños provocados por las heladas durante la antesis en dos horas a más fueron significativos y en general, si se tiene un mayor nivel de azúcares solubles se aumentará la tolerancia a las heladas con mejores rendimientos. Mientras que, **Piedra-Bonilla et al. (2020)** analizaron si la variación del clima puede influir en estas prácticas a través

de la aplicación del modelo Probit ordenado. Este modelo les permitió separar las diferentes categorías de diversificación de cultivos, brindando como resultados que el incremento de la precipitación y temperatura no tienen efectos significativos en la aplicación de este procedimiento pero que su intensidad incrementa proporcionalmente junto a la variabilidad climática. Del mismo modo, **Kibar et al. (2021)** señalaron que, para mantener la calidad del grano y evitar pérdidas, se requieren sistemas de almacenamiento eficaces. Por lo que, evaluaron el efecto de los días de almacenamiento a diferentes temperaturas y el color de dos variedades de quinua Menta Vainilla y Titicaca. Indicando que, cuando estas variables se incrementan conducen a cambios en la humedad del grano, contenido de proteínas y propiedades de color. Ambas, lograron disminuir algunos metales como el hierro o zinc y mostraron cierta degradación dependiente de la temperatura.

En el caso de climas tropicales y templados ha hecho que se le considere un importante cultivo andino de cereales en el que la etapa de floración determina el rendimiento del grano. Es así que, **Curti et al. (2016)** buscaron evaluar la respuesta del desarrollo foliar y floral de la quinua al fotoperíodo y la temperatura a diferentes altitudes, durante tres temporadas y aplicaron un modelo fototérmico. Las tasas de desarrollo de la planta hasta la aparición de yemas florales y estados de antesis, así como la filocronía, variaron ampliamente entre las accesiones y la filocronía varió principalmente durante la fase reproductiva (**Sellami et al., 2021**). Demostrando mayor sensibilidad en las tierras bajas (normalmente de floración tardía) y la sensibilidad a la temperatura fue mayor en tierras altas (floración temprana).

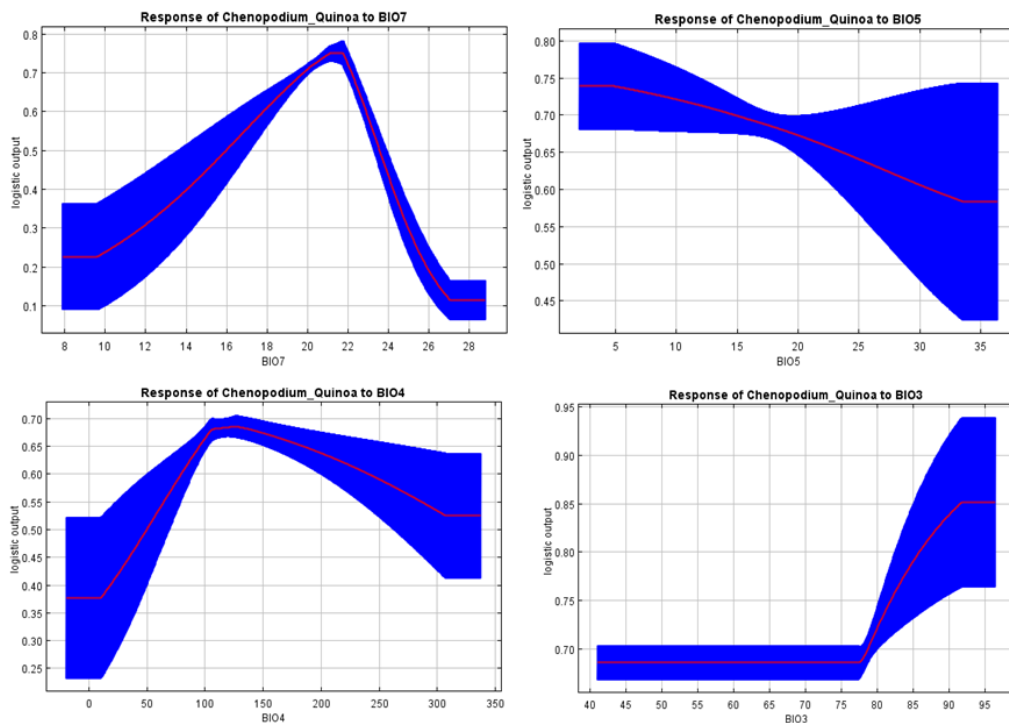


Figura 6. Respuesta de *Chenopodium quinoa* Willd a variables bioclimáticas asociadas a la temperatura.

Cabe resaltar que si la respuesta de los agricultores andinos a la creciente variabilidad del clima es positiva se incrementará la diversidad de cultivos y podrán estimarse mediante los índices de cultivos intercalados bajo condiciones ambientales favorables. Sin embargo, muchas actividades humanas como la invasión agrícola, el sobrepastoreo y las actividades mineras están favoreciendo el incremento de la vulnerabilidad de los ecosistemas, especialmente en la puna alto andina y en las demás regiones del territorio nacional que están provocando que disminuya: la provisión de alimentos, lana y fibra, fertilidad del suelo, ciclo de nutrientes, secuestro de carbono del suelo, provisión y regulación del agua, recursos genéticos, control de plagas y enfermedades, regulación de la polinización y regulación del microclima. Finalmente, **Zurita-Silva et al. (2014)** señalan que la quinua tiene una excelente calidad y propiedades especiales para tolerar el estrés abiótico, además, que la introducción del cultivo se está llevando a cabo en varias regiones y su desarrollo se está dando a altitudes más bajas de lo normal como la costa (**Cruces et al., 2020**).

4. Conclusiones

Ante los actuales problemas de contaminación ambiental, muchos cultivos no llegan a producirse de una manera efectiva, sin embargo, la quinua representa una gran alternativa, y en este estudio se ha comprobado su tolerancia a estreses abióticos como la sequía, la salinidad y distribución potencial; ya que llega a obtener una excelente productividad facilitando su alta demanda a nivel mundial. Además, se han evidenciado zonas de mayor capacidad de movilidad de *Chenopodium quinoa* Willd en los andes del Perú como los departamentos de

Puno, Apurímac, Ayacucho y Cuzco, donde las variables bioclimáticas como precipitación y temperatura son más adecuadas para la producción, a diferencia de otras zonas de la costa o la selva. Estas variables fueron decisivas para establecer el modelo de distribución de la especie actual cuyo aporte de la temperatura es mayor que el de la precipitación. Otras variables que pueden ser consideradas para el modelamiento son: las zonas de vida, capacidad de uso mayor del suelo y cobertura vegetal. Por lo que se recomienda, realizar análisis de idoneidad utilizando otras variables aparte de las bioclimáticas que puedan influir en la distribución potencial del cultivo para que de esa manera se puedan plantear mejoras importantes para el manejo preventivo de factores abióticos y bióticos, así como mejorar la calidad de predicción. También, el planteamiento de programas de extensión rural que fomenten la diversificación de sistemas haciéndolos más resiliente al cambio climático y el uso de otros insumos como el biocarbón pues ha tenido excelentes resultados respecto a una mejor eficiencia en el uso del agua bajo condiciones de estrés de salinidad y de esa poder garantizar y asegurar alimentos nutritivos como la quinua.

ORCID

- K. P. Ccoyllar Quintanilla  <https://orcid.org/0000-0001-7074-8047>
- A. F. Zaravia Povis  <https://orcid.org/0000-0001-8643-0391>
- A. A. Lozano Povis  <https://orcid.org/0000-0002-6748-4367>
- J. V. Cornejo Tueros  <https://orcid.org/0000-0001-8233-858X>

Referencias bibliográficas

Ahmadi, S. H., Solgi, S., & Sepaskhah, A. R. (2019). Quinoa: A super or pseudo-super crop? Evidences from evapotranspiration, root growth, crop coefficients, and water productivity in a hot

- and semi-arid area under three planting densities. *Agricultural Water Management*, 225, 105784.
- Alandia, G., Rodríguez, J. P., Jacobsen, S. E., Bazile, D., & Condori, B. (2020). Global expansion of quinoa and challenges for the Andean region. In *Global Food Security* (Vol. 26, p. 100429). Elsevier B.V.
- Amador, E., & Montesinos, E. (2017). Adaptación del cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) al cambio climático en los Andes del Perú. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 19(37), 15–23.
- Anand, V., Oinam, B., & Singh, I. H. (2021). Predicting the current and future potential spatial distribution of endangered *Rucervus eldii eldii* (Sangai) using MaxEnt model. *Environmental Monitoring and Assessment* 2021 193:3, 193(3), 1–17.
- Bedoya-Perales, N. S., Pumi, G., Talamini, E., & Padula, A. D. (2018). The quinoa boom in Peru: Will land competition threaten sustainability in one of the cradles of agriculture? *Land Use Policy*, 79, 475–480.
- Boral, D., & Moktan, S. (2021). Predictive distribution modeling of *Swertia bimaculata* in Darjeeling-Sikkim Eastern Himalaya using MaxEnt: current and future scenarios. *Ecological Processes* 2021 10:1, 10(1), 1–16.
- Borrell, J. S., Dodsworth, S., Forest, F., Pérez-Escobar, O. A., Lee, M. A., et al. (2020). The climatic challenge: Which plants will people use in the next century? *Environmental and Experimental Botany*, 170, 103872.
- Bosso, L., Di Febbraro, M., Cristinzio, G., Zoina, A., & Russo, D. (2016). Shedding light on the effects of climate change on the potential distribution of *Xylella fastidiosa* in the Mediterranean basin. *Biological Invasions* 2016 18:6, 18(6), 1759–1768.
- Cruces, L., de la Peña, E., & De Clercq, P. (2020). Insect diversity associated with quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) in three altitudinal production zones of Peru. *International Journal of Tropical Insect Science*, 40(4), 955–968.
- Curti, R. N., de la Vega, A. J., Andrade, A. J., Bramardi, S. J., & Bertero, H. D. (2016). Adaptive responses of quinoa to diverse agro-ecological environments along an altitudinal gradient in North West Argentina. *Field Crops Research*, 189, 10–18.
- Deb, J. C., Phinn, S., Butt, N., & McAlpine, C. A. (2017). Climatic-Induced Shifts in the Distribution of Teak (*Tectona grandis*) in Tropical Asia: Implications for Forest Management and Planning. *Environmental Management* 2017 60:3, 60(3), 422–435.
- Dolgener, N., Freudenberger, L., Schneeweiss, N., Ibsch, P. L., & Tiedemann, R. (2013). Projecting current and potential future distribution of the Fire-bellied toad *Bombina bombina* under climate change in north-eastern Germany. *Regional Environmental Change* 2013 14:3, 14(3), 1063–1072.
- Ejigu, D., & Tassie, N. (2020). Present and future suitability of the Lake Tana Biosphere Reserve in Ethiopia for the Nile monitor (*Varanus niloticus*) using the MaxEnt model. *Environmental Systems Research* 2020 9:1, 9(1), 1–15.
- Fagandini, F., Bazile, D., Drucker, A. G., Tapia, M., & Chura, E. (2020). Geographical distribution of quinoa crop wild relatives in the Peruvian Andes: a participatory mapping initiative. *Environment, Development and Sustainability*, 1–22.
- Hu, Z., Guo, K., Jin, S., & Pan, H. (2018). The influence of climatic changes on distribution pattern of six typical *Kobresia* species in Tibetan Plateau based on MaxEnt model and geographic information system. *Theoretical and Applied Climatology* 2018 135:1, 135(1), 375–390.
- Kibar, H., Sönmez, F., & Temel, S. (2021). Effect of storage conditions on nutritional quality and color characteristics of quinoa varieties. *Journal of Stored Products Research*, 91, 101761.
- Lennox, E., & Gowdy, J. (2014). Ecosystem governance in a highland village in Peru: Facing the challenges of globalization and climate change. *Ecosystem Services*, 10, 155–163.
- Lissovsky, A. A., & Dudov, S. V. (2021). Species-Distribution Modeling: Advantages and Limitations of Its Application. 2. *MaxEnt. Biology Bulletin Reviews* 2021 11:3, 11(3), 265–275.
- López-Tirado, J., Vessella, F., Schirone, B., & Hidalgo, P. J. (2018). Trends in evergreen oak suitability from assembled species distribution models: assessing climate change in south-western Europe. *New Forests* 2018 49:4, 49(4), 471–487.
- Miranda-Apodaca, J., Agirresarobe, A., Martínez-Goñi, X. S., Yoldi-Achalandabaso, A., & Pérez-López, U. (2020). N metabolism performance in *Chenopodium quinoa* subjected to drought or salt stress conditions. *Plant Physiology and Biochemistry*, 155, 725–734.
- Muscolo, A., Panuccio, M. R., Giofrè, A. M., & Jacobsen, S.-E. (2016). Drought and Salinity Differently Affect Growth and Secondary Metabolites of “*Chenopodium quinoa* Willd.” Seedlings. In *Halophytes for Food Security in Dry Lands* (pp. 259–275). Elsevier.
- Palit, P., Kudapa, H., Zougmore, R., Kholova, J., Whitbread, A., Sharma, M., & Varshney, R. K. (2020). An integrated research framework combining genomics, systems biology, physiology, modelling and breeding for legume improvement in response to elevated CO₂ under climate change scenario. *Current Plant Biology*, 22, 100149.
- Piedra-Bonilla, E. B., da Cunha, D. A., & Braga, M. J. (2020). Climate variability and crop diversification in Brazil: An ordered probit analysis. *Journal of Cleaner Production*, 256, 120252.
- Ramzani, P. M. A., Shan, L., Anjum, S., Khan, W. ud D., Ronggui, H., et al. (2017). Improved quinoa growth, physiological response, and seed nutritional quality in three soils having different stresses by the application of acidified biochar and compost. *Plant Physiology and Biochemistry*, 116, 127–138.
- Sellami, M. H., Pulvento, C., & Laviní, A. (2021). Agronomic practices and performances of quinoa under field conditions: A systematic review. In *Plants* (Vol. 10, Issue 1, pp. 1–20). MDPI AG.
- Stevens, A. W. (2017). Quinoa quandary: Cultural tastes and nutrition in Peru. *Food Policy*, 71, 132–142.
- Vacher, J. J. (1998). Responses of two main Andean crops, quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) and papa amarga (*Solanum juzepczukii* Buk.) to drought on the Bolivian Altiplano: Significance of local adaptation. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 68(1–2), 99–108.
- Valdez-Arana, J. del C., Steffolani, M. E., Repo-Carrasco-Valencia, R., Pérez, G. T., & Condezo-Hoyos, L. (2020). Physicochemical and functional properties of isolated starch and their correlation with flour from the Andean Peruvian quinoa varieties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 147, 997–1007.
- Yan, D., Chen, W., Liu, L., Li, J., Liu, L., & Wang, Y. (2017). Change in current and future geographic distributions of *Ulmus lamellosa* in China. *Journal of Forestry Research* 2017 29:4, 29(4), 1147–1156.
- Zurita-Silva, A., Fuentes, F., Zamora, P., Jacobsen, S. E., & Schwember, A. R. (2014). Breeding quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): Potential and perspectives. *Molecular Breeding*, 34(1), 13–30.