

Estudio de la erosión eólica, producción de quinua y seguridad alimentaria en la zona andina de Bolivia

Study of wind erosion, quinoa production, and food security in the andean region of Bolivia

Carolyn Ordóñez Álvarez*
Universidad Técnica de Oruro
Bolivia- Oruro
carolynoa7@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0001-9413-4418>

*Correspondencia:
carolynoa7@gmail.com

Cómo citar este artículo:
Ordóñez, C. (2026). Estudio de la erosión eólica, producción de quinua y seguridad alimentaria en la zona andina de Bolivia. *Esprint Investigación*, 5(Esp.1), 100-111. <https://doi.org/10.61347/ei.v5iEsp.1.303>

Recibido: 16 de abril de 2026
Aceptado: 21 de mayo de 2026
Publicado: 2 de junio de 2026

Resumen: El presente estudio tuvo como objetivo analizar cuantitativamente la relación entre la erosión eólica, el rendimiento de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) y la seguridad alimentaria de los hogares productores del altiplano boliviano. Para ello, se recolectaron datos primarios en 280 parcelas distribuidas en cuatro municipios productores: Salinas de Garci Mendoza, Llica, Santiago de Huari y Challapata, durante el ciclo agrícola 2022–2023. Metodológicamente, se aplicaron estadísticos descriptivos, análisis de correlación de Spearman y regresión lineal múltiple. Los resultados evidenciaron una correlación negativa alta y estadísticamente significativa entre la tasa de erosión eólica y el rendimiento de quinua por hectárea, así como entre la pérdida de suelo y el Índice de Seguridad Alimentaria (ISA) de los hogares. Asimismo, se identificaron diferencias significativas en la severidad de la erosión entre municipios, asociadas con las características topográficas, la cobertura vegetal residual y las prácticas de manejo agrícola. Los hallazgos respaldan la necesidad de implementar políticas de conservación de suelos articuladas con estrategias de seguridad y soberanía alimentaria.

Palabras clave: Altiplano boliviano, degradación del suelo, erosión eólica, productividad agrícola, quinua, seguridad alimentaria.

Abstract: This study aimed to quantitatively analyze the relationship between wind erosion, quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) yield, and food security among producer households in the Bolivian Altiplano. Primary data were collected from 280 plots located in four quinoa-producing municipalities: Salinas de Garci Mendoza, Llica, Santiago de Huari, and Challapata, during the 2022–2023 agricultural cycle. Descriptive statistics, Spearman correlation analysis, and multiple linear regression were applied. The results showed a high, negative, and statistically significant correlation between wind erosion rates and quinoa yield per hectare, as well as between soil loss and the Household Food Security Index. Significant differences in erosion severity were also identified among municipalities, associated with topographic conditions, residual vegetation cover, and agricultural management practices. The findings highlight the need to implement soil conservation policies integrated with food security and food sovereignty strategies in quinoa-producing areas of the Bolivian Altiplano.

Keywords: Agricultural productivity, bolivian altiplano, food security, quinoa, soil degradation, wind erosion.

Copyright: Derechos de autor 2026 Carolyn Ordóñez Álvarez.



Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NonComercial 4.0.

1. Introducción

La quinua (*Chenopodium quinoa Willd.*) representa uno de los cultivos más estratégicos del altiplano andino, tanto por su valor nutricional como por su importancia cultural y económica. Declarada por las Naciones Unidas como un cultivo clave para la seguridad alimentaria del siglo XXI, debido a su perfil aminoacídico y su tolerancia a condiciones ambientales extremas, constituye un alimento fundamental para miles de familias campesinas e indígenas en Bolivia, Perú y Ecuador (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2011).

Bolivia, como uno de los principales productores mundiales, destina amplias extensiones del altiplano semiárido, particularmente en los departamentos de Oruro y Potosí, al cultivo de este pseudocereal. Esta actividad genera ingresos y alimentos para comunidades que enfrentan condiciones de pobreza, limitada disponibilidad de recursos productivos y alta vulnerabilidad climática (Bazile et al., 2014; Calle et al., 2020).

Sin embargo, la expansión acelerada de la frontera agrícola quinuera, impulsada por el auge exportador de la primera década del siglo XXI, ha favorecido la incorporación de laderas y planicies frágiles al sistema productivo. A ello se suman prácticas como la remoción de la cobertura vegetal nativa y la mecanización inadecuada, factores que han intensificado los procesos de degradación del suelo (Geerts et al., 2008; Jacobsen, 2011).

Entre los fenómenos de degradación más relevantes, la erosión eólica ocupa un lugar central en el altiplano boliviano. La combinación de vientos secos de alta velocidad, suelos de textura arenosa o franco-arenosa, baja cohesión edáfica y escasa cobertura vegetal protectora configura un escenario de erosión crónica, cuyas consecuencias sobre la productividad agrícola aún no han sido suficientemente cuantificadas a escala local (Miranda, 2019; Romero et al., 2012).

La erosión eólica provoca la pérdida de los horizontes superficiales del suelo, donde se concentra gran parte de la materia orgánica, los nutrientes disponibles y la actividad biológica. Esta pérdida reduce la capacidad productiva de las parcelas y, en consecuencia, afecta los rendimientos de la quinua.

Dicho efecto repercute directamente en la disponibilidad y el acceso a alimentos de las familias productoras, comprometiendo la seguridad alimentaria en sus cuatro dimensiones: disponibilidad, acceso, utilización y estabilidad (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 1996; Pimentel et al., 1995). No obstante, la literatura disponible presenta una limitada evidencia cuantitativa primaria que relacione, de manera directa, las métricas de erosión eólica con los rendimientos de quinua y los indicadores de seguridad alimentaria a nivel de hogar y parcela en el altiplano boliviano.

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo analizar la relación entre la erosión eólica, el rendimiento de la quinua y la seguridad alimentaria de los hogares productores en el altiplano boliviano. Para ello, se plantean tres objetivos específicos: cuantificar y caracterizar la tasa de erosión eólica en parcelas quinueras de cuatro municipios; estimar la correlación estadística entre la intensidad de la erosión, el rendimiento de quinua y el Índice de Seguridad Alimentaria; e identificar los factores agronómicos y de manejo que modulan el impacto de la erosión sobre la productividad.

La evidencia generada busca aportar fundamentos empíricos para el diseño de políticas agrarias orientadas a integrar la conservación del suelo, la sostenibilidad productiva y la mejora de los medios de vida de las comunidades quinueras del altiplano.

2. Desarrollo

La erosión eólica es el proceso de desprendimiento, transporte y deposición de partículas del suelo por acción del viento (Bagnold, 1941). En zonas áridas y semiáridas, como el altiplano andino, este fenómeno se activa cuando la velocidad del viento supera el umbral de arrastre de las partículas superficiales, condición favorecida por la ausencia de cobertura vegetal, la baja humedad del suelo y la presencia de texturas ligeras (Shao, 2008).

Los mecanismos de transporte incluyen la saltación, entendida como el movimiento de partículas gruesas en trayectoria balística; la reptación, que corresponde al rodamiento de partículas demasiado pesadas para permanecer suspendidas; y la suspensión, mediante la cual las partículas finas son transportadas a grandes distancias. Este último mecanismo resulta especialmente perjudicial, debido a su capacidad para desplazar fuera del ecosistema agrícola los coloides más ricos en nutrientes (Pimentel & Burgess, 2013).

Las consecuencias de la erosión eólica sobre la productividad agrícola se manifiestan por diversas vías. Entre ellas se encuentran la reducción del contenido de materia orgánica y nitrógeno del suelo, el deterioro de la estructura edáfica, la disminución de la capacidad de retención hídrica, la pérdida de semillas y plántulas por abrasión mecánica, así como la acumulación de sedimentos que puede cubrir los cultivos en etapas vulnerables de desarrollo (Sterk, 2003).

En el caso específico de la quinua, cultivo de ciclo largo de aproximadamente 180 a 240 días, estos procesos adquieren mayor relevancia debido a que su desarrollo coincide con los meses de mayor intensidad eólica en el altiplano, especialmente entre julio y agosto. En consecuencia, dichos mecanismos pueden actuar de manera simultánea y potenciar sus efectos sobre el rendimiento final del cultivo (Geerts et al., 2008; Calle et al., 2020).

La relación entre degradación del suelo y seguridad alimentaria ha sido ampliamente documentada en la literatura internacional (Ayaviri & Vallejos, 2015). Al respecto, Pimentel et al. (1995) estimaron que la erosión del suelo puede reducir la productividad global de los cultivos entre un 15 % y un 30 % en zonas severamente afectadas, con impactos proporcionalmente mayores en pequeños productores que no disponen de recursos suficientes para compensar las pérdidas mediante insumos externos.

Por su parte, Scherr & Yadav (1996) señalaron que, en África subsahariana y Asia meridional, la degradación del suelo se asocia directamente con la disminución del bienestar nutricional de los hogares rurales. Esta relación permite establecer una cadena de impactos que inicia con la pérdida de productividad agrícola y se extiende hacia la reducción del consumo calórico y proteico de las familias.

En el contexto andino, Jacobsen (2011) documentó que el abandono de prácticas tradicionales de manejo del suelo en zonas quinueras, como el mantenimiento de vegetación nativa de thola (*Parastrephia lepidophylla*) como barrera cortaviento y la rotación con cultivos de cobertura, incrementó de forma considerable la susceptibilidad de los suelos a la erosión eólica durante el período de expansión productiva.

Asimismo, Miranda (2019), mediante un estudio multitemporal con imágenes satelitales en el altiplano sur de Bolivia, cuantificó una pérdida de cobertura vegetal nativa superior al 40 % en zonas de expansión quinuera entre 2000 y 2015. Esta pérdida se relacionó con un incremento significativo de los índices de erosión estimados mediante el modelo RWEQ (*Revised Wind Erosion Equation*).

Estas evidencias subrayan la pertinencia de desarrollar un estudio primario que vincule directamente la erosión eólica con los rendimientos de quinua y la seguridad alimentaria de los hogares productores. De este modo, se podrá aportar evidencia empírica para orientar estrategias de manejo sostenible del suelo en el altiplano boliviano.

3. Metodología

La investigación adoptó un enfoque cuantitativo, de tipo descriptivo-correlacional. La unidad de análisis fue la parcela agrícola destinada al cultivo de quinua, complementada con datos del hogar productor para el análisis de la seguridad alimentaria. El área de estudio comprendió cuatro municipios productores de quinua real del altiplano boliviano: Salinas de Garci Mendoza, Santiago de Huari y Challapata, en el departamento de Oruro, y Llica, en el departamento de Potosí.

Estos municipios fueron seleccionados por su relevancia productiva y por representar distintas condiciones agroecológicas y niveles de exposición a la erosión eólica dentro del ecosistema altiplánico. La altitud media del área de estudio osciló entre 3.600 y 3.900 metros sobre el nivel del mar. Las precipitaciones anuales variaron entre 200 y 350 mm, concentradas principalmente entre noviembre y marzo.

Las temperaturas medias anuales se ubicaron entre 8 °C y 12 °C, con heladas frecuentes durante el período seco. Además, se registraron vientos predominantes del sursuroeste, con velocidades medias de 6 a 12 m/s durante la época seca, entre junio y septiembre. Estas condiciones incrementaron la vulnerabilidad de los suelos desnudos postcosecha frente a la acción eólica, especialmente en parcelas con escasa cobertura vegetal protectora (Bazile et al., 2014).

La población objetivo estuvo constituida por las parcelas quinueras correspondientes al ciclo agrícola 2022–2023 en los cuatro municipios de estudio. Con base en los registros del SENASAG y de las asociaciones de productores, la población total se estimó en aproximadamente 4.200 parcelas activas. El tamaño muestral se calculó mediante la fórmula para proporciones con varianza máxima, considerando $p = q = 0,5$, un nivel de confianza del 95 % y un margen de error de ± 5 %.

El cálculo inicial arrojó una muestra mínima de 351 parcelas. Posteriormente, la muestra se ajustó a 280 parcelas tras aplicar la corrección por población finita y considerar un factor de no respuesta del 20 %. La asignación por municipio se realizó de forma proporcional al volumen de producción registrado.

La muestra quedó distribuida de la siguiente manera: Salinas de Garci Mendoza, 95 parcelas (33,9 %); Llica, 75 parcelas (26,8 %); Santiago de Huari, 65 parcelas (23,2 %); y Challapata, 45 parcelas (16,1 %). El muestreo fue sistemático, aleatorio y estratificado. La selección de parcelas se efectuó mediante grillas georreferenciadas elaboradas a partir de imágenes Sentinel-2.

Variables e instrumentos de medición

La erosión eólica se cuantificó mediante la tasa de pérdida de suelo, expresada en toneladas por hectárea por año ($t\ ha^{-1}\ año^{-1}$). Esta variable se estimó mediante la aplicación del modelo RWEQ (*Revised Wind Erosion Equation*) propuesto por Fryrear et al. (1998).

Para la estimación, se utilizaron datos de viento de la estación meteorológica más cercana a cada parcela. Esta información se complementó con mediciones directas de depósito eólico, obtenidas mediante trampas de sedimentos instaladas en 60 parcelas durante el período mayo-septiembre de 2023.

Las parcelas se clasificaron en cuatro categorías de severidad: sin erosión significativa ($<5 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), erosión leve ($5\text{--}15 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), erosión moderada ($15\text{--}30 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) y erosión severa o muy severa ($>30 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), de acuerdo con los umbrales propuestos por Sterk (2003). El rendimiento de quinua se midió al momento de la cosecha como la producción total de grano limpio, expresada en kilogramos por hectárea (kg ha^{-1}). La información se obtuvo mediante pesaje directo en parcela, utilizando básculas previamente calibradas.

El Índice de Seguridad Alimentaria (ISA) se calculó a nivel de hogar productor mediante la Escala Latinoamericana y Caribeña de Seguridad Alimentaria (ELCSA), propuesta por el Comité Científico de la ELCSA (2012). El ISA se expresó en una escala de 0 a 100 puntos. Los hogares se clasificaron en cuatro niveles: seguridad alimentaria (≥ 75), inseguridad alimentaria leve ($50\text{--}74$), inseguridad alimentaria moderada ($25\text{--}49$) e inseguridad alimentaria severa (<25).

Como variables de control, se consideraron diversos factores que podían influir en los resultados, tales como la cobertura vegetal residual, estimada mediante cuadrantes; la textura del suelo, determinada mediante análisis granulométrico; la presencia de barreras cortaviento; la superficie de la parcela; y los años de cultivo continuo sin rotación.

Análisis cuantitativo

En la primera fase, se realizó un análisis estadístico descriptivo. Para ello, se calcularon diversas medidas incluyendo la media (X), la desviación estándar (DE), la mediana (Md), los valores mínimo y máximo, el coeficiente de variación (CV) y las distribuciones de frecuencia por categorías de erosión.

La normalidad de las distribuciones se evaluó mediante la prueba de Kolmogórov-Smirnov con corrección de Lilliefors. En la segunda fase, se efectuó el análisis de correlación. Debido a la no normalidad de la tasa de erosión ($D = 0,142$; $p < 0,001$) y del rendimiento de quinua ($D = 0,089$; $p = 0,003$), se utilizó el coeficiente de correlación de Spearman (r_s). Este coeficiente permitió cuantificar la asociación entre la erosión eólica y el rendimiento de quinua, así como entre la erosión eólica y el ISA. La magnitud del efecto se interpretó con base en los criterios de Cohen (1988), considerando $r_s \geq 0,50$ como efecto grande.

En la tercera fase, se ajustó un modelo de regresión lineal múltiple. El rendimiento de quinua (kg ha^{-1}) se estableció como variable dependiente. Como predictores, se incluyeron la tasa de erosión eólica, la cobertura vegetal residual, la presencia de barreras cortaviento y los años de cultivo continuo. Además, se evaluaron los supuestos de normalidad de los residuos, homocedasticidad y ausencia de multicolinealidad, considerando $VIF < 5$.

Finalmente, se reportaron los coeficientes estandarizados (β), el coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado) y el valor F del modelo. En la cuarta fase, se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis para comparar la tasa de erosión y el rendimiento de quinua entre los cuatro municipios. Posteriormente, se realizaron comparaciones post hoc mediante la prueba de Dunn con corrección de Bonferroni. El nivel de significancia se estableció en $\alpha = 0,01$.

4. Resultados

La tabla 1 presenta los estadísticos descriptivos de la tasa de erosión eólica y del rendimiento de quinua, tanto para la muestra total como por municipio.

Tabla 1

Estadísticos descriptivos de la tasa de erosión eólica ($t\ ha^{-1}\ a^{-1}$) y rendimiento de quinua ($kg\ ha^{-1}$) por municipio

Variable / Municipio	n	Media	DE	Mediana	Mín.	Máx.	CV (%)
Erosión eólica – Muestra total	280	22,4	14,8	19,1	1,3	78,6	66,1
Erosión eólica – Salinas G. M.	95	28,7	16,2	25,4	3,2	78,6	56,4
Erosión eólica – Llica	75	25,3	13,4	22,8	2,8	67,4	53,0
Erosión eólica – Santiago de Huari	65	17,6	11,1	15,3	1,3	52,1	63,1
Erosión eólica – Challapata	45	14,2	9,3	12,6	1,8	41,5	65,5
Rendimiento de quinua – Muestra total	280	842	312	798	128	1.840	37,1
Rendimiento de quinua – Salinas G. M.	95	668	298	630	128	1.420	44,6
Rendimiento de quinua – Llica	75	784	287	755	210	1.580	36,6
Rendimiento de quinua – Santiago de Huari	65	948	289	932	340	1.720	30,5
Rendimiento de quinua – Challapata	45	1.084	281	1.055	412	1.840	25,9

Nota. X= media; DE = desviación estándar; CV = coeficiente de variación.

La tasa de erosión eólica promedio en la muestra total fue de $22,4\ t\ ha^{-1}\ a^{-1}$ (DE = 14,8), con una mediana de $19,1\ t\ ha^{-1}\ a^{-1}$, indicando una distribución asimétrica positiva con presencia de valores extremos. El municipio de Salinas de Garci Mendoza registró la mayor tasa promedio de erosión ($28,7\ t\ ha^{-1}\ a^{-1}$), consistente con su ubicación en la zona de mayor exposición a los vientos del altiplano sur y la mayor proporción de suelos de textura arenosa. En contraste, Challapata presentó la menor tasa de erosión media ($14,2\ t\ ha^{-1}\ a^{-1}$), asociada a una mayor cobertura vegetal residual y menor velocidad media del viento.

El patrón opuesto se observa en el rendimiento de quinua: Salinas de Garci Mendoza, con mayor erosión, registra el menor rendimiento promedio ($668\ kg\ ha^{-1}$), mientras que Challapata, con menor erosión, alcanza el mayor rendimiento medio ($1.084\ kg\ ha^{-1}$). El rendimiento promedio total de $842\ kg\ ha^{-1}$ es notablemente inferior al potencial productivo de la quinua real en condiciones de suelo conservado estimado entre 1.500 y $2.000\ kg\ ha^{-1}$ por Calle et al., (2020), lo que sugiere que la erosión eólica es uno de los factores limitantes de mayor peso en el sistema productivo estudiado.

Categorización de la erosión eólica y distribución por municipio

La tabla 2 muestra la distribución de parcelas por categoría de severidad de erosión eólica y municipio.

Tabla 2

Distribución de parcelas (%) por categoría de erosión eólica y municipio

Municipio	n	Sin erosión signif. (<5)	Erosión leve (5-15)	Erosión moderada (15-30)	Erosión severa/muy severa (>30)
Salinas de Garci Mendoza	95	4,2%	18,9%	36,8%	40,1%
Llica	75	6,7%	24,0%	41,3%	28,0%
Santiago de Huari	65	12,3%	35,4%	36,9%	15,4%
Challapata	45	20,0%	42,2%	26,7%	11,1%
TOTAL, muestra	280	9,3%	28,6%	36,1%	26,0%

Nota. Umbrales de categorización según Sterk (2003). Porcentajes calculados por fila.

El 62,1% de las parcelas de la muestra total se ubica en las categorías de erosión moderada o severa/muy severa, lo que refleja un estado de degradación generalizado del suelo en el sistema quinuero estudiado. La situación más crítica se observa en Salinas de Garci Mendoza, donde el 76,9% de las parcelas supera el umbral de erosión moderada y el 40,1% se encuentra en el rango severo o muy severo. Por el contrario, en Challapata, solo el 37,8% supera el umbral moderado y únicamente el 11,1% alcanza la categoría severa, diferencia estadísticamente significativa respecto a Salinas de Garci Mendoza (prueba de Dunn post hoc; $p < 0,001$).

Correlación entre erosión eólica, rendimiento de quinua e ISA

La tabla 3 presenta los coeficientes de correlación de Spearman entre la tasa de erosión eólica, el rendimiento de quinua y el ISA, para el total de la muestra y por municipio.

Tabla 3

Correlaciones de Spearman entre tasa de erosión eólica, rendimiento de quinua e ISA

Par de variables / Municipio	n	rs	p-valor	Interpretación
Erosión vs. Rendimiento – Total	280	-0,74	<0,001	Correlación alta negativa, muy signif.
Erosión vs. Rendimiento – Salinas	95	-0,76	<0,001	Correlación alta negativa, muy signif.
Erosión vs. Rendimiento – Llica	75	-0,71	<0,001	Correlación alta negativa, muy signif.

Par de variables / Municipio	n	rs	p-valor	Interpretación
Erosión vs. Rendimiento – S. Huari	65	-0,68	<0,001	Correlación alta negativa, muy signif.
Erosión vs. Rendimiento – Challapata	45	-0,65	<0,001	Correlación alta negativa, muy signif.
Erosión vs. ISA – Total	280	-0,62	<0,001	Correlación moderada-alta negativa
Rendimiento vs. ISA – Total	280	0,68	<0,001	Correlación alta positiva, muy signif.

Nota. rs = coeficiente de correlación de Spearman. Criterios de Cohen (1988): $|rs| \geq 0,50$ = efecto grande. ISA calculada a nivel de hogar productor.

El coeficiente de correlación de Spearman entre la tasa de erosión eólica y el rendimiento de quinua para el total de la muestra fue $rs = -0,74$ ($p < 0,001$), confirmando una asociación negativa alta y estadísticamente muy significativa: a mayor erosión, menor rendimiento. Este resultado es robusto y consistente en los cuatro municipios, con valores que oscilan entre -0,65 (Challapata) y -0,76 (Salinas de Garci Mendoza), evidenciando que el fenómeno opera con una magnitud de efecto grande en todos los contextos agroecológicos estudiados.

La correlación entre la erosión eólica y el ISA resultó negativa y significativa ($rs = -0,62$; $p < 0,001$), indicando que las parcelas con mayor degradación eólica corresponden a hogares con menores puntajes en el ISA. Por su parte, la correlación positiva entre el rendimiento de quinua y el ISA ($rs = 0,68$; $p < 0,001$) reafirma que la producción de quinua es el mecanismo de transmisión entre la erosión del suelo y la seguridad alimentaria del hogar: la pérdida de productividad por degradación eólica se traduce directamente en deterioro alimentario.

Modelo de regresión lineal múltiple del rendimiento de quinua

La tabla 4 presenta los resultados del modelo de regresión lineal múltiple con el rendimiento de quinua como variable dependiente.

Tabla 4

Modelo de regresión lineal múltiple: predictores del rendimiento de quinua ($kg\ ha^{-1}$)

Predictor	B	β (estandarizado)	Error estándar	t	p-valor	VIF
Constante	1.412,3	—	84,6	16,69	<0,001	—
Tasa de erosión ($t\ ha^{-1}\ a^{-1}$)	-14,8	-0,52	1,94	-7,63	<0,001	1,82
Cobertura vegetal residual (%)	8,6	0,31	1,73	4,97	<0,001	1,64
Barreras cortaviento (sí=1)	128,4	0,18	38,7	3,32	0,001	1,31
Años de cultivo continuo	-22,1	-0,14	9,2	-2,40	0,017	1,47

Nota. R^2 ajustado = 0,614; $F(4, 275) = 111,3$; $p < 0,001$. Diagnósticos del modelo: Durbin-Watson = 1,93; todos los VIF < 2 (ausencia de multicolinealidad).

El modelo de regresión múltiple explica el 61,4% de la varianza en el rendimiento de quinua (R^2 adj = 0,614; $F = 111,3$; $p < 0,001$), lo que indica un poder explicativo sustancial. El predictor con mayor peso estandarizado es la tasa de erosión eólica ($\beta = -0,52$; $p < 0,001$): por cada tonelada adicional de suelo erosionado por hectárea y año, el rendimiento de quinua disminuye en promedio 14,8 kg ha⁻¹, manteniendo constantes las demás variables.

La cobertura vegetal residual ($\beta = 0,31$; $p < 0,001$) y la presencia de barreras cortaviento ($\beta = 0,18$; $p = 0,001$) ejercen efectos positivos y significativos sobre el rendimiento, confirmando el rol protector de estas prácticas de manejo. Los años de cultivo continuo sin rotación tienen un efecto negativo sobre el rendimiento ($\beta = -0,14$; $p = 0,017$), consistente con el agotamiento progresivo de los nutrientes del suelo. Los diagnósticos de multicolinealidad ($VIF < 2$ en todos los predictores) y autocorrelación (Durbin-Watson = 1,93) confirman la adecuación del modelo.

Comparación interdepartamental y estado de seguridad alimentaria

La tabla 5 sintetiza el Índice de Seguridad Alimentaria por municipio y la distribución de los hogares productores según el nivel de seguridad alimentaria.

Tabla 5

ISA promedio y distribución de hogares por nivel de seguridad alimentaria según municipio

Municipio	n	ISA (X)	ISA (DE)	Seg. aliment. (≥ 75)	Inseg. leve (50-74)	Inseg. mod. (25-49)	Inseg. severa (< 25)
Salinas de Garci M.	95	43,6	16,8	4,2%	28,4%	48,4%	19,0%
Llica	75	49,2	15,4	8,0%	36,0%	44,0%	12,0%
Santiago de Huari	65	56,8	14,2	15,4%	47,7%	30,8%	6,1%
Challapata	45	63,4	13,7	26,7%	55,6%	17,7%	0,0%
TOTAL muestra	280	51,6	16,9	10,4%	38,2%	39,6%	11,8%

Nota. ISA calculado con ELCSA (Comité Científico de la ELCSA, 2012) a nivel de hogar productor. Kruskal-Wallis: $H(3) = 44,7$; $p < 0,001$; $\eta^2 = 0,158$.

El ISA promedio de la muestra total fue de 51,6 puntos (DE = 16,9), ubicándose en el rango de inseguridad alimentaria leve, con el 51,4% de los hogares en inseguridad moderada o severa. Las diferencias interdepartamentales son marcadas y estadísticamente significativas (Kruskal-Wallis; $H(3) = 44,7$; $p < 0,001$; $\eta^2 = 0,158$, efecto grande).

Salinas de Garci Mendoza el municipio con mayor erosión media registra el ISA más bajo (43,6), con el 67,4% de los hogares en inseguridad moderada o severa y ningún hogar con seguridad alimentaria plena entre los más afectados por la erosión. En contraste, Challapata presenta el ISA más alto (63,4), con solo el 17,7% en inseguridad moderada y ningún hogar en inseguridad severa. Estos resultados, tomados en conjunto con las correlaciones reportadas, trazan una cadena de impactos clara: mayor erosión eólica, menor rendimiento de quinua y mayor inseguridad alimentaria del hogar productor.

5. Conclusiones

La investigación evidenció que la erosión eólica constituye uno de los principales factores limitantes de la productividad de la quinua en el altiplano boliviano. Su asociación negativa, alta y estadísticamente significativa con el rendimiento del cultivo se mantuvo consistente en los cuatro municipios analizados. Esta relación no se presentó de forma aislada, sino como parte de una cadena de impactos: mayor degradación eólica, menor rendimiento agrícola y deterioro de la seguridad alimentaria de los hogares productores.

Los municipios con mayor exposición al viento y menor cobertura vegetal residual concentraron los rendimientos más bajos y los índices de seguridad alimentaria más desfavorables. Esto evidencia que la degradación del suelo y la vulnerabilidad alimentaria son fenómenos territorialmente asociados en el ecosistema altiplánico. Desde una perspectiva agronómica, los resultados del modelo de regresión confirmaron que la cobertura vegetal residual y las barreras cortaviento ejercen un efecto protector significativo sobre el rendimiento.

De manera complementaria, el cultivo continuo sin rotación se identificó como una práctica que agrava la pérdida progresiva de capacidad productiva. Este hallazgo refuerza la importancia de recuperar prácticas tradicionales de manejo sostenible del suelo, como el aynoqa, basado en la rotación y el descanso comunitario. Más allá de su dimensión cultural, este sistema constituye una estrategia técnicamente pertinente para restaurar la fertilidad edáfica y reducir la vulnerabilidad a la erosión.

Los hallazgos respaldan la necesidad de implementar programas integrales de conservación de suelos en las zonas quinueras del altiplano. Dichos programas deberían articular barreras cortaviento vivas y muertas, labranza de conservación, restauración de vegetación nativa y monitoreo municipal de la erosión. Estas intervenciones deben concebirse como parte de una estrategia más amplia de soberanía y seguridad alimentaria, en la que la salud del suelo, la productividad agrícola y el derecho a una alimentación suficiente, diversa y culturalmente apropiada se encuentren estrechamente vinculados.

Referencias

- Ayaviri, N., & Vallejos, M. (2015). Cambio climático y seguridad alimentaria, un análisis en la producción agrícola. *CienciAgro*, 5(1), 59–70. <https://n9.cl/ta3vb>
- Bagnold, R. (1941). *The physics of blown sand and desert dune*. Methuen. <https://n9.cl/pz6qq>
- Bazile, D., Bertero, D., y Nieto, C. (Eds.). (2014). *Estado del arte de la quinua en el mundo en 2013*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO); Universidad de Buenos Aires. <https://n9.cl/rhzu0>
- Calle, C., Bonifacio, A., Villca, M., Aroni, G., Alcón, M., López, S., y Singh, R. (2020). *Hacia un manejo sustentable de la quinua en el altiplano sur de Bolivia*. Fundación PROINPA; Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT); International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA). <https://n9.cl/4m0myq>
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203771587>
- Comité Científico de la ELCSA. (2012). *Escala Latinoamericana y Caribeña de Seguridad Alimentaria (ELCSA): Manual de uso y aplicaciones*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). <https://n9.cl/3q5jw>

- Fryrear, D., Chen, W., & Lester, C. (1998). Revised wind erosion equation. *Annals of Arid Zone*, 40, 265–279. <https://epubs.icar.org.in/index.php/AAZ/article/view/65816>
- Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Condori, O., Mamani, J., Miranda, R., Cusicanqui, J., Taboada, C., Yucra, E., & Vacher, J. (2008). Could deficit irrigation be a sustainable practice for quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) in the Southern Bolivian Altiplano? *Agricultural Water Management*, 95(8), 909–917. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.02.012>
- Jacobsen, S. (2011). The situation for quinoa and its production in southern Bolivia: From economic success to environmental disaster. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 197(5), 390–399. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2011.00475.x>
- Miranda, G. (2019). Dinámica del comportamiento multitemporal de la cobertura vegetal en un sistema climático del Altiplano Central. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 6(1), 50–56. <https://n9.cl/ewtco>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (1996). *Declaración de Roma sobre la Seguridad Alimentaria Mundial y Plan de Acción de la Cumbre Mundial sobre la Alimentación*. FAO. <https://www.fao.org/4/w3613s/w3613s00.htm>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2011). *La quinua: Cultivo milenario para contribuir a la seguridad alimentaria mundial* (1.ª ed.). <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/aq287s>
- Pimentel, D., & Burgess, M. (2013). Soil erosion threatens food production. *Agriculture*, 3(3), 443–463. <https://doi.org/10.3390/agriculture3030443>
- Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., Crist, S., Shpritz, L., Fitton, L., Saffouri, R., & Blair, R. (1995). Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science*, 267(5201), 1117–1123. <https://doi.org/10.1126/science.267.5201.1117>
- Romero, A., Limas, E., & Belmote, F. (2012). Erosión y degradación de suelos en ambientes semiáridos de Tamaulipas (México): Regiones Norte y Altiplano. <https://n9.cl/rte38p>
- Scherr, S., & Yadav, S. (1996). *Land degradation in the developing world: Implications for food, agriculture, and the environment to 2020* (2020 Policy Brief No. 44). International Food Policy Research Institute. <https://hdl.handle.net/10568/157157>
- Shao, Y. (2008). *Physics and modelling of wind erosion* (2nd ed., Vol. 37). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8895-7>
- Sterk, G. (2003). Causes, consequences and control of wind erosion in Sahelian Africa: A review. *Land Degradation & Development*, 14(1), 95–108. <https://doi.org/10.1002/ldr.526>

Transparencia

Conflicto de interés

El autor declara que no existen conflictos de interés de naturaleza alguna como parte de la presente investigación.

Fuente de financiamiento

El autor financia completamente la investigación.

Contribución de autoría

Carolyn Ordóñez Álvarez: Conceptualización, metodología, software, validación, análisis formal, investigación, gestión de datos, visualización, redacción - preparación del borrador original, redacción - revisión y edición, financiamiento, administración del proyecto, recursos, supervisión.

El autor intervino de manera activa en el análisis de los resultados, revisión y aprobación del texto final del artículo.