

## Frontera agrícola de la producción de quinua (*Chenopodium Quinoa*) y valoración de la fertilidad de suelos. Un estudio en el departamento de Oruro Bolivia

*Agricultural frontier of quinoa (Chenopodium Quinoa) production and soil fertility assessment. A study in the department of Oruro, Bolivia*

**Pedro Román Vallejos Mamani\***  
Universidad Técnica de Oruro  
Oruro - Bolivia  
vallejos\_pedro@yahoo.es  
<https://orcid.org/0009-0002-0707-9113>

\*Correspondencia:  
vallejos\_pedro@yahoo.es

**Cómo citar este artículo:**  
Vallejo, P. (2025). Frontera agrícola de la producción de quinua (*Chenopodium Quinoa*) y valoración de la fertilidad de suelos. Un estudio en el departamento de Oruro Bolivia. *Esprint Investigación*, 4(4), 190-205. <https://doi.org/10.61347/ei.v4i4.195>

**Recibido:** 5 de septiembre de 2025  
**Aceptado:** 10 de octubre de 2025  
**Publicado:** 21 de noviembre de 2025

**Copyright:** Derechos de autor 2025 Pedro Román Vallejos Mamani.



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

**Resumen:** La zona del Inter Salar presenta condiciones y características particulares, incluso únicas, para la producción de quinua, un cultivo altamente exigente en nitrógeno y potasio. La baja fertilidad de los suelos, consecuencia de los bajos niveles de materia orgánica y nitrógeno, provoca rendimientos reducidos. Sin embargo, el conocimiento sobre la distribución espacial de la fertilidad del suelo, especialmente en las nuevas zonas con actividad agrícola, sigue siendo una incógnita. Por esta razón, el presente estudio tiene como objetivo evaluar el estado actual de la fertilidad en suelos cultivados, no cultivados y con potencial de expansión de la frontera agrícola en la provincia Ladislao Cabrera. Se determinó que la provincia cuenta con 17.216 ha de quinua. La superficie con prioridad 1 para la apertura de nuevas áreas agrícolas asciende a 46.972 ha, mientras que la de prioridad 2 alcanza 31.288 ha, sumando un total de 78.200 ha como superficie máxima probable de expansión de la frontera agrícola. Los análisis de laboratorio indican que los suelos presentan texturas arenoso-francas y arenosas, con pH moderadamente alcalinos y neutros. Los niveles de materia orgánica y nitrógeno total son muy bajos, mientras que los contenidos de fósforo y potasio son moderados a altos, características típicas de los suelos de origen volcánico. En cuanto a la capacidad de intercambio catiónico, se clasifican como muy baja a baja, lo que determina una fertilidad general reducida. Estas condiciones plantean interrogantes que abren líneas potenciales para futuras investigaciones, como comprender por qué esta zona del departamento de Oruro presenta los rendimientos más altos en el cultivo de quinua y qué otras propiedades del suelo o factores ambientales influyen de manera determinante en dichos resultados.

**Palabras clave:** Expansión agrícola, fertilidad de suelos, materia orgánica.

**Abstract:** *The Inter Salar zone presents particular, even unique, conditions and characteristics for quinoa production, a crop highly demanding in nitrogen and potassium. The low soil fertility, resulting from reduced levels of organic matter and nitrogen, leads to limited yields. However, knowledge about the spatial distribution of soil fertility, especially in newly cultivated agricultural areas, remains uncertain. For this reason, the present study aims to evaluate the current state of fertility in cultivated soils, uncultivated soils, and soils with potential for agricultural frontier expansion in the Ladislao Cabrera Province. It was determined that the province has 17,216 ha of quinoa. The area classified as priority 1 for the expansion of new agricultural zones amounts to 46,972 ha, while priority 2 covers 31,288 ha, totaling 78,200 ha as the maximum probable area for agricultural frontier expansion. Laboratory analyses indicate that the soils exhibit sandy-loam and sandy textures, with pH levels ranging from moderately alkaline to neutral. The contents of organic matter and total nitrogen are very low, whereas phosphorus and potassium levels are moderate to high—features typical of volcanic-origin soils. Regarding cation exchange capacity, values are classified as very low to low, resulting in overall reduced fertility. These conditions raise questions that open potential avenues for future research, such as understanding why this area of the Oruro Department achieves the highest quinoa yields and what other soil properties or environmental factors play a determining role in these results.*

**Keywords:** Agricultural expansion, organic matter, soil fertility.

## 1. Introducción

Desde la década de los setenta, los primeros investigadores en la zona del Inter Salar informaban los problemas derivados del uso de maquinaria agrícola, la influencia antrópica y la erosión suscitada en este sector del departamento de Oruro. Han pasado más de treinta años y los problemas continúan siendo los mismos; a pesar de ello, la superficie sembrada sigue incrementándose. Según Tapia (1979), el cultivo de quinua requiere, para un mejor desarrollo y producción, suelos bien drenados, de textura franco-arenosa a arenosa. El uso actual de la tierra muestra que las áreas productoras se caracterizan por tener suelos con estos atributos y se localizan principalmente en las pendientes de las serranías, montañas y piedemontes, donde existe una mayor humedad y la incidencia de heladas no es tan extrema ni severa. En muchas de estas zonas, la producción es mecanizada, empleando tractores con arados de disco, rastras y subsoladores. El uso de esta tecnología en pendientes con suelos de textura gruesa y débilmente estructurados acelera los procesos de erosión y degradación, lo cual está provocando una disminución de la fertilidad y de la capacidad productiva de estos suelos (Gobierno de Bolivia, 1997; Nelson, 2009; Crossman et al., 2013).

Cada cultivo presenta requerimientos climáticos y edafológicos particulares, los cuales dependen también de la variedad (Laguna et al., 2006; González et al., 2015). La zona del Inter Salar presenta condiciones y características particulares, e incluso únicas, para la producción de quinua, cultivo que es muy exigente en nitrógeno y potasio, aunque no tanto en fósforo. Los bajos rendimientos de quinua se deben principalmente a la baja fertilidad de los suelos, consecuencia de la escasa materia orgánica y del nitrógeno aprovechable (Ballón, 1975). Por su parte, Tapia (1979) encontró que la aplicación de fertilizante (40-00-00) mejoró la producción de quinua como respuesta al nitrógeno, especialmente cuando este se aplica en épocas de lluvia (enero y febrero). Asimismo, menciona que la quinua responde favorablemente a la aplicación de estiércol, recomendando aplicar 1500 kg por hectárea (Quintanilla, 2010).

En la localidad de Salinas, el humus de lombriz favoreció un mayor desarrollo en la altura de la planta, diámetro, longitud de panoja, diámetro del tallo y tamaño del grano en comparación con el testigo. Los mayores rendimientos se lograron con la aplicación de 200, 150 y 100 granos de humus por hoyo, obteniéndose producciones de 672,5; 621,2; y 593,7 kg/ha, respectivamente, en relación con el testigo, que reportó 420,8 kg/ha.

Dado que es necesario conocer el estado actual de la fertilidad de los suelos en toda la provincia Ladislao Cabrera, considerada la zona potencialmente quinuera del departamento de Oruro, se consideró conveniente realizar una serie de muestreos de suelo en el municipio de Pampa Aullagas, con el fin de valorar la fertilidad de suelos cultivados, no cultivados y con potencial de expansión de la frontera agrícola en la provincia Ladislao Cabrera, mediante técnicas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y teledetección para efectuar un mapeo espacial de la fertilidad de los suelos.

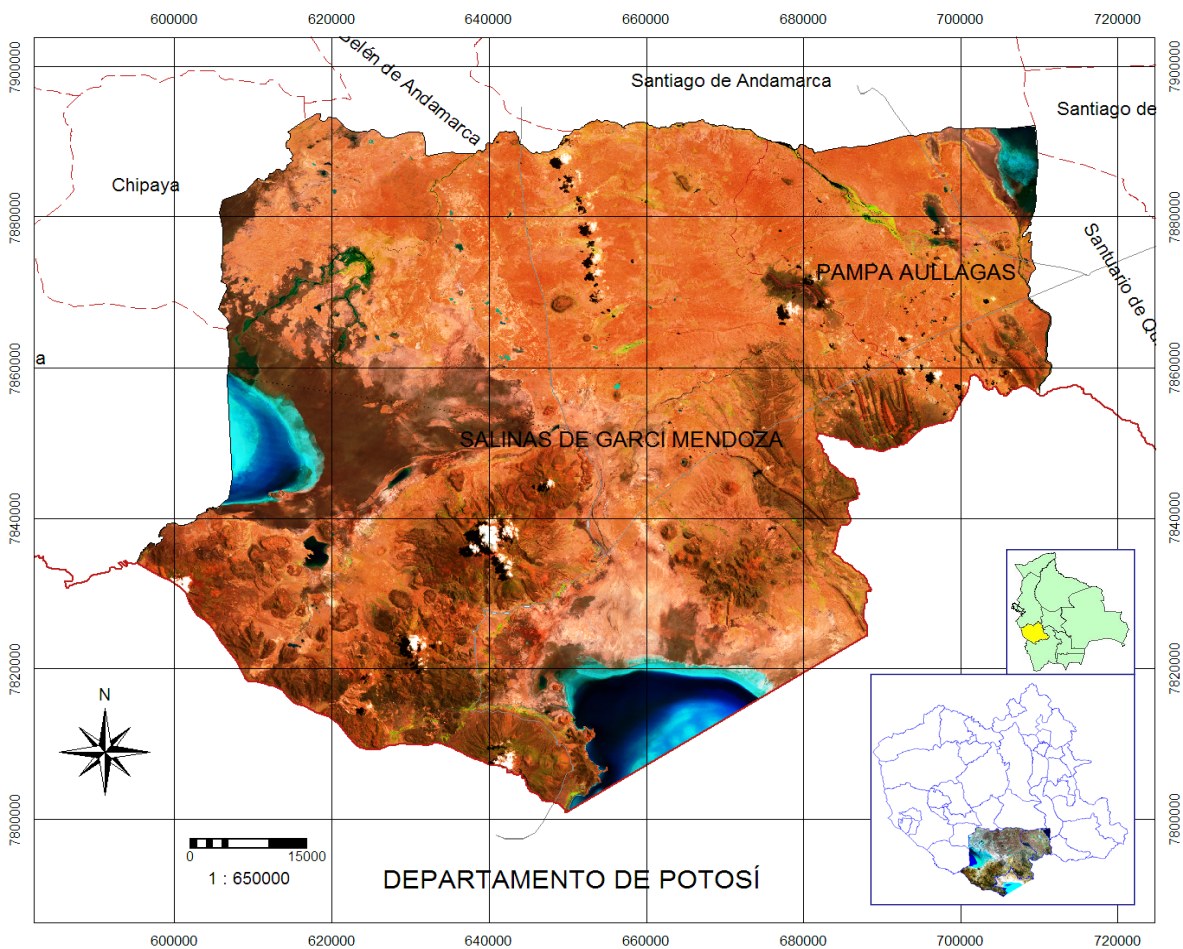
Los SIG y la teledetección se han convertido actualmente en herramientas que permiten analizar, buscar y mapear datos con ubicación geográfica precisa. Estas tecnologías permiten integrar el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), facilitando la localización de diferentes puntos de interés y complementando los estudios con datos de campo. Además, posibilitan análisis multitemporales y espaciales, a partir de los cuales es posible determinar impactos que relacionen condiciones anteriores y posteriores a una acción o intervención sobre un área específica. Así, el objetivo de la investigación es valorar el área potencial de expansión de la frontera agrícola de quinua (*Chenopodium quinoa*) en la provincia Ladislao Cabrera y evaluar la fertilidad de los suelos en el municipio de Pampa Aullagas.

## Área de estudio

El área de estudio se ubica al sur del departamento de Oruro y comprende una superficie aproximada de 7.259,46 km<sup>2</sup>. La zona se caracteriza por ser árida y semiárida, con precipitaciones escasas e irregularmente distribuidas entre los meses de diciembre y marzo. Según el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), la precipitación media anual es del orden de 304,8 mm/año y la temperatura promedio alcanza los 8,3 °C. La humedad relativa se mantiene alrededor del 46,5 %, mientras que la velocidad promedio del viento es de 2,3 km/h, aunque con frecuencia se registran ráfagas que alcanzan los 80 km/h. La figura 1 muestra la ubicación geográfica del área de estudio.

### Figura 1

*Ubicación geográfica del área de estudio*



## 2. Metodología

### Evaluación de la Cobertura Vegetal mediante técnicas de Teledetección

El estado actual de la cobertura vegetal en la provincia Labrera Cabrera se evaluó a través de técnicas de Teledetección y levantamiento de datos GPS. La imagen satelital utilizada correspondió al sensor Landsat 5 tomada en fecha 19/03/2010 (periodo más recomendado para hacer una evaluación de la cobertura vegetal) (Crossman et al., 2013; Bazile & Baudrom, 2015; Chuvieco, 2002).

Tras la homogeneización radiométrica y el ajuste geométrico, se procedió a la identificación de unidades utilizando para ello transformaciones sobre los niveles digitales de las bandas que realzan la cobertura vegetal (Alonso-Fradejas et al., 2015; Bazile & Baudrom, 2015; Andersen, 2007; Ataucusi et al., 2023); Para ello se determinó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI); Este índice es un indicador de comprobada eficacia para estudios de vegetación. La ecuación 1 muestra las variables requeridas para el cálculo del Índice de Vegetación Normalizado.

$$NDVI = \left[ \left( \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR} \right) * 127 \right] + 128 \quad (1)$$

Donde: NDVI, es el Índice de Vegetación Normalizado; SWIR, es la banda del infrarrojo cercano y el NIR, es la banda del rojo. Los valores digitales en el mapa del NDVI oscilan entre -1 a 1, por esta razón se aplicaron los coeficientes de 127 y 128 según se muestra en la ecuación. Posteriormente, el mapa de NDVI se clasificó según niveles digitales como se indica en la tabla 1, los rangos de clasificación fueron los siguientes:

**Tabla 1**

*Rango de valores NDVI*

Rango de valores NDVI	Categoría de cobertura o uso del suelo
< 100	Cuerpos de Agua y Salares
100 a 123	Suelo desnudo
123 a 134	Suelo con vegetación ralo
134 a 138	Herbazal – arbustal moderado
138 a 149	Herbazal – arbustal denso
> 149	Vegetación verde (Bofedales)

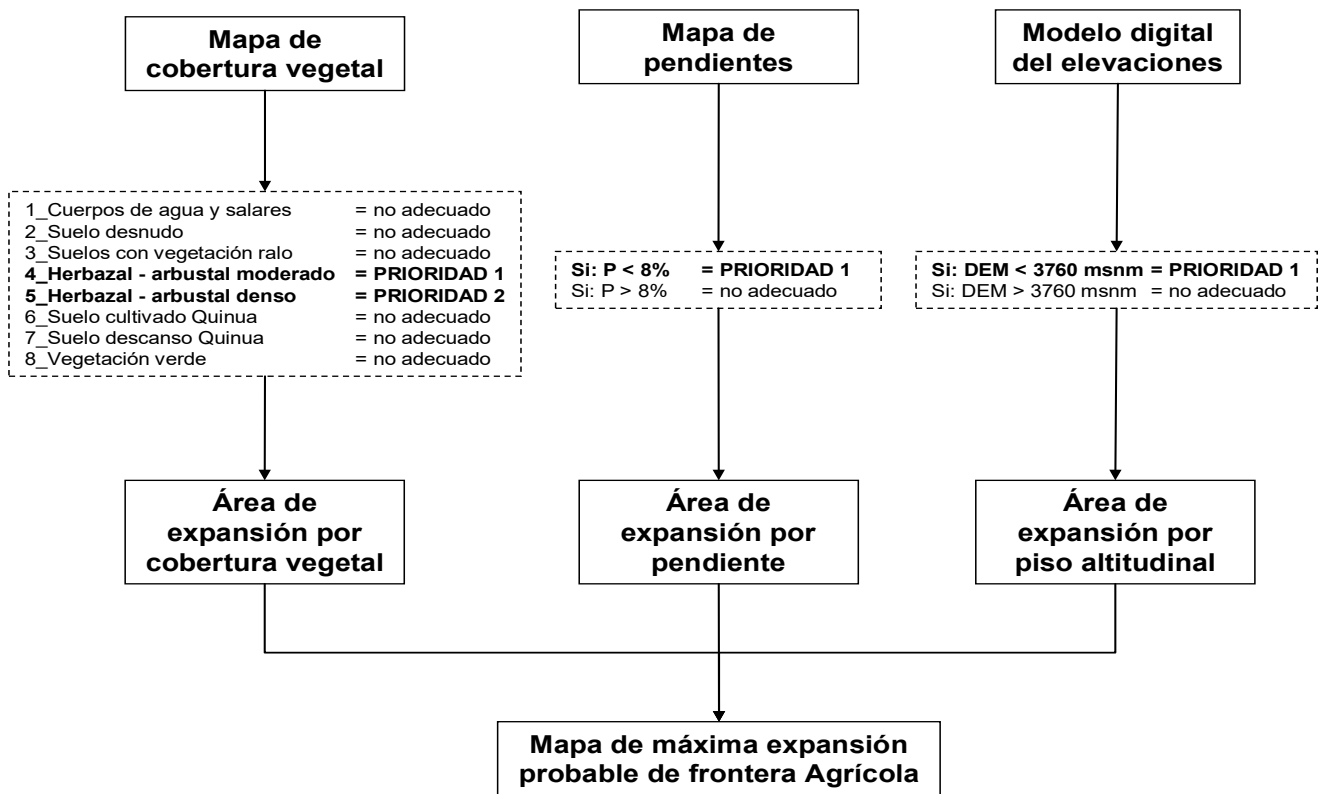
### Evaluación de la máxima superficie de expansión de la frontera agrícola

Varios parámetros fueron considerados para definir las mejores condiciones para producción de quinua. En el estudio multitemporal de la expansión de frontera agrícola y el levantamiento de información GPS, se encontró que las unidades con cobertura vegetal del tipo asociación herbazal – arbustal moderado presentaron tendencias prioritarias como nuevas zonas productoras de quinua, seguido de las unidades de asociación herbazal – arbustal denso (Alandia et al., 2020; Andreotti et al., 2022).

La pendiente también fue un factor importante cuando se utilizó maquinaria agrícola, en este sentido las superficies con pendientes menores al 8% fueron consideradas las más recomendadas. Referente a los pisos altitudinales, se encontró que las mayores áreas productoras de quinua se ubicaban por debajo de los 3760 msnm. Con base a estas consideraciones, se definieron criterios para establecer las zonas más probables de expansión de frontera agrícola, en la figura 2 se observa las condiciones y la metodología propuesta para el mismo.

**Figura 2**

*Propuesta metodológica para la determinación de la máxima superficie de expansión de frontera agrícola*



### Muestreo y análisis de suelos

Se obtuvieron un total de 18 muestras de suelo del municipio de Pampa Aullagas, todas provenientes de la capa superficial (0 a 25 cm). De estas 10 correspondieron a suelos con quinua, 5 a suelos con tholares y pastos, y 3 a suelos con otras actividades agrícolas (cultivos de papa). Todos los puntos de muestreo fueron georreferenciados con un GPS.

De cada punto se extrajeron 3 submuestras, los cuales fueron mezcladas y cuarteadas para obtener de las muestras compuestas. Estas se enviaron al laboratorio de análisis de suelos y aguas de la UMSS – Cochabamba. Los parámetros analizados fueron: Textura, Densidad aparente pH, CE, Materia Orgánica, Capacidad de Intercambio Catiónico, Nitrógeno Total, Fósforo disponible y Potasio intercambiable.

### Valoración de la fertilidad de suelos

Según el Departamento Agrológico del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Colombia 1996, menciona que la valoración de la fertilidad de suelos se pudo realizar siguiendo dos caminos: Uno siguiendo las características que se asocian con la fertilidad de los suelos (pH, CE, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, porcentaje de saturación de bases, porcentaje de carbonato de calcio, relación de absorción de sodio, porcentaje de sodio intercambiable, acidez y aluminio intercambiable), la tabla 2 detalla los parámetros de clasificación de la fertilidad de los suelos asociado a estas características.

Tabla 2

Criterios para la valoración de la fertilidad de suelos

	Determinado	4.0 a 5.0	5.1 a 5.5	5.6 a 6.5	6.6 a 7.5	> 7.6
<b>pH</b>	Apreciación	Muy acido	Acido	Lig. Acido	Casi neutro	<b>Alcalino</b>
	Puntos	-5 a 0	1 a 5	5 a 15	15	<b>15 a 5</b>
<b>CIC (meq/100g)</b>	Determinado	0.0 a 6.0	6.1 a 12.0	12.1 a 25.0	25.1 a 40.0	<b>&gt; 40.1</b>
	Apreciación	Muy bajo	Baja	Media	Alta	<b>Muy alta</b>
	Puntos	-5 a 1	1 a 5	5 a 10	10 a 20	<b>20</b>
<b>MO (%)</b>	Determinado	0.0 a 1.7	1.8 a 2.5	2.6 a 4.3	4.4 a 7.5	<b>&gt; 7.5</b>
	Apreciación	Muy pobre	Pobre	Normal	Alto	<b>Muy alto</b>
	Puntos	-3 a 1	1 a 3	3 a 5	5	<b>5 a 1</b>
<b>Nt (%)</b>	Determinado	0.0 a 0.1	0.1 a 0.15	0.15 a 0.25	0.25 a 0.30	<b>&gt; 0.30</b>
	Apreciación	Muy pobre	Pobre	Normal	Alto	<b>Muy alto</b>
	Puntos	-3 a 1	1 a 3	3 a 5	5	<b>5 a 3</b>
<b>P. disponible (ppm)</b>	Determinado	0.0 a 3.0	3.1 a 7.0	7.1 a 15.0	15.1 a 25.0	<b>&gt; 25.1</b>
	Apreciación	Muy pobre	Pobre	Normal	Alto	<b>Muy alto</b>
	Puntos	-5 a 1	1 a 5	5 a 15	15	<b>15 a 5</b>
<b>Fertilidad <math>\Sigma</math> pts/10</b>	Puntaje	-5 a 2	3 a 5	6 a 8	9	<b>10</b>
	<b>Apreciación</b>	<b>Muy baja</b>	<b>Baja</b>	<b>Moderada</b>	<b>Md. a Alta</b>	<b>Alta</b>

Nota. Fuente Depto. Agrológico del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Colombia, 1996.

La segunda clasificación se basó en el índice de disponibilidad de nutrientes, el cual incluye fracciones solubles, intercambiables, extraíbles, fijadas o mineralizable. Ejemplos de estas fracciones fueron: N-nítrico, P soluble o extraíble, y las concentraciones solubles o intercambiables de K, Ca, Mg, Na, así como los elementos Fe, Mn, Zn, Cu y Mo, además del boro soluble en agua.

En el presente estudio se recurrió a la valoración de la fertilidad utilizando los parámetros de pH, capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica, nitrógeno total y fósforo disponible, principalmente por limitaciones de tiempo y recursos económicos.

### 3. Resultados

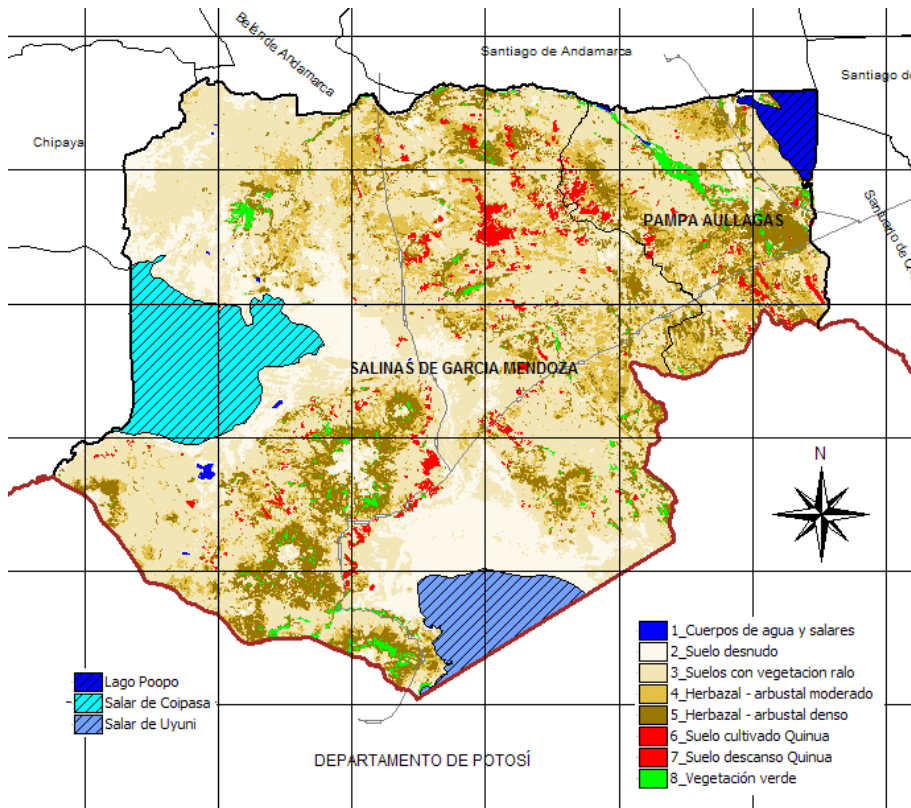
#### Procesamiento digital de imágenes

##### *Cobertura vegetal en la provincia Ladislao Cabrera*

En base al Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), se identificaron los tipos de cobertura vegetal en la provincia Ladislao Cabrera. A este análisis se integraron las áreas de cultivo de quinua identificadas hasta el año 2010. La figura 3 muestra la distribución espacial de los tipos de cobertura vegetal, resaltando las áreas bajo actividad quinuera identificadas hasta el año 2010.

**Figura 3**

*Cobertura vegetal en la Provincia Ladislao Cabrera (2010)*



Se encontró que el 3,47 % (271,72 km<sup>2</sup>) de la superficie de la provincia está ocupado por cuerpos de agua y salares; el 18,32 % (1330,36 km<sup>2</sup>) corresponde a suelos desnudos; el 48,42 % (3515,64 km<sup>2</sup>) está clasificado como suelos con vegetación rala (tholas, añawayas, lampayas y algo de pajonal); el 13,55 % (987,72 km<sup>2</sup>) corresponde a asociación herbazal–arbustal moderado; el 12,24 % (888,62 km<sup>2</sup>) se clasifica como herbazal–arbustal denso; la superficie con cultivos de quinua alcanza 2,37 % (172,16 km<sup>2</sup>); y solo 1,36 % (95,56 km<sup>2</sup>) corresponde a vegetación verde (bofedales, chilliwares y otros vegetales tupidos).

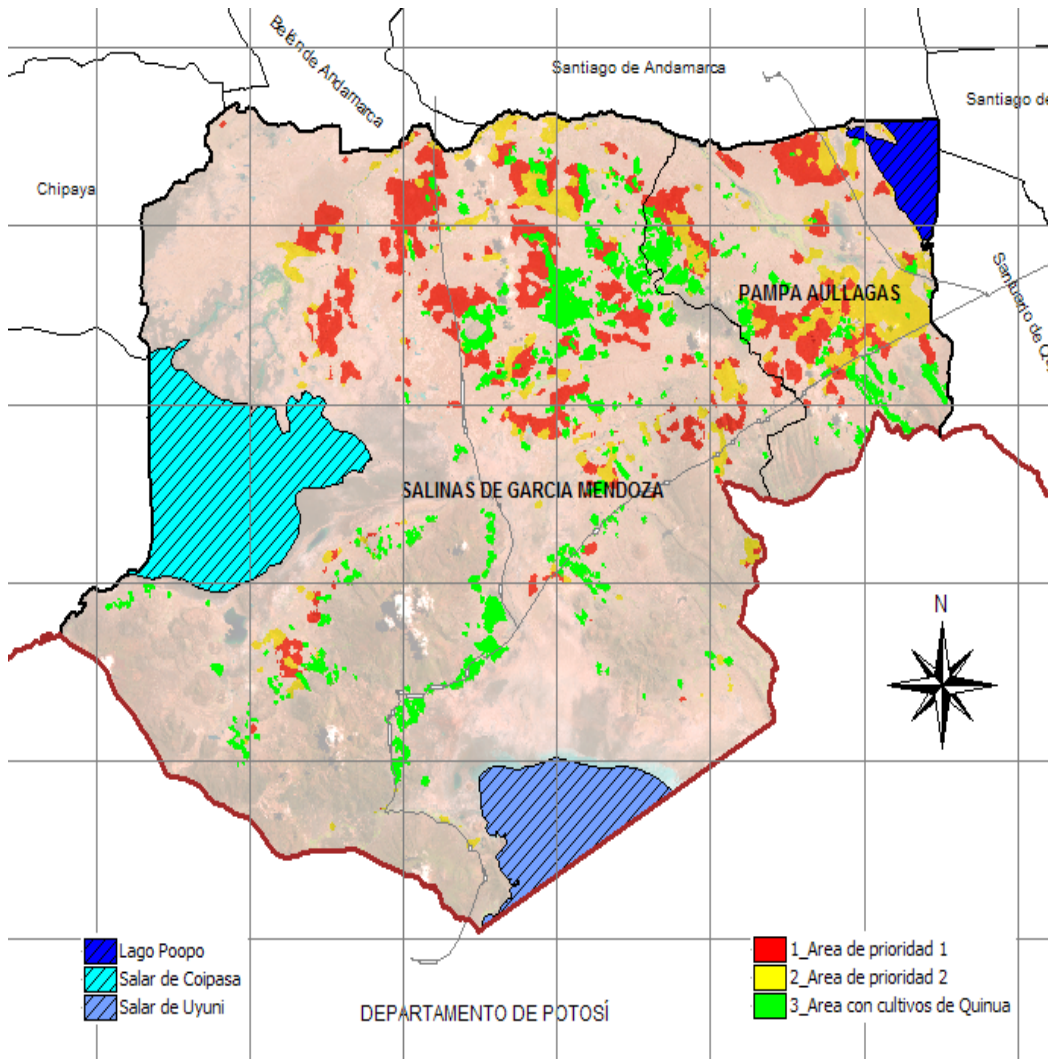
En el levantamiento de información realizado en el trabajo de campo, se identificó que los suelos con cobertura vegetal tipo herbazal–arbustal moderado son los de primera prioridad para nuevas zonas de producción de quinua, seguidos por las zonas con vegetación herbazal–arbustal denso.

**Máxima superficie probable de expansión de la frontera agrícola**

El tipo de cobertura vegetal, la pendiente del terreno y el modelo digital de elevaciones fueron los criterios con mayor peso para definir la tendencia actual de expansión de la frontera agrícola en la provincia Ladislao Cabrera. Con base en esta tendencia, se encontró que la superficie con prioridad uno para expansión asciende a 469,72 km<sup>2</sup> (46.972 ha), mientras que las zonas con prioridad dos alcanzan 312,88 km<sup>2</sup> (31.288 ha). Actualmente, la provincia cuenta con 172,16 km<sup>2</sup> (17.216 ha) de áreas destinadas al cultivo de quinua. En general, 782,6 km<sup>2</sup> (78.260 ha) presentan condiciones fisiográficas y de cobertura vegetal adecuadas para la producción de quinua en la provincia. La figura 4 muestra las zonas probables de expansión de la frontera agrícola.

**Figura 4**

Áreas probables de expansión de frontera agrícola para quinua en la Provincia Ladislao Cabrera



**Interpretación de reportes de laboratorio**

**Textura**

La textura del suelo está relacionada con el tamaño de las partículas, su clasificación se refiere a la proporción relativa de arena, limo y arcilla. La textura influye en el abastecimiento de agua, nutrientes y aire, de ahí su importancia en los suelos. La tabla 2 muestra las clases texturales encontrados en 18 muestras de suelo levantados en el municipio de Pampa Aullagas.

Se ha encontrado que la textura predominante en los suelos del municipio de Pampa Aullagas son Arenoso Franco (50% de las muestras) y Arenoso (22,22 %). Los suelos arenoso-franco se caracterizan por presentar contenidos moderados de arcilla entre 3,1% a 10,9%; limo de 7,6% a 28,1% y arenas de 67,5% a 88,6%, normalmente se caracterizan por tener contenidos moderados de materia orgánica, moderada capacidad de retención de humedad y baja capacidad de intercambio catiónico. Por su parte los suelos arenosos presentan contenidos de arcilla entre 1,4% a 5,1%; limo de 1,7% a 11,5% y arena de 85,7% a 96,6%, se caracterizan por presentar baja capacidad de captación de humedad al igual que bajos contenidos de materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico.

**Tabla 2***Clasificación textural de muestras de suelo – Municipio de Pampa Aullagas*

Escala de Clarificación	N.º de muestras	%
Arenosos franco	9	50,00
Arenoso	4	22,22
Arcilloso	2	11,11
franco arcillo arenoso	1	5,56
franco arenoso	2	11,11
<b>Total muestras</b>	<b>18</b>	<b>100</b>

**Reacción del suelo**

La reacción del suelo es una propiedad fundamental, ya que influye en las características físicas, químicas y biológicas del suelo. En el municipio de Pampa Aullagas, de las 18 muestras analizadas, 6 presentaron pH moderadamente alcalino, 5 neutro, 3 suavemente alcalino y 3 fuertemente alcalino; solo una muestra presentó pH suavemente ácido.

En general se ha encontrado que 12 de las 18 muestras de suelo presentan un pH dentro el rango alcalino, condiciones características de la zona de estudio como clima subárido, caracterizado por lluvias escasas y distribuidas en pocos meses, vientos intensos durante con direcciones predominantes de Noroeste a Sureste y de Sur a Norte asociado a las fuertes irradiaciones y altas temperaturas durante el verano, son considerados como los principales causante para que las sales situadas en las napas freáticas asciendan a las capas superficiales del suelo, y se sitúen en estas principalmente en los meses de alta evapotranspiración ocasionando que los suelos tengan pH alcalinos (mayores a 7). La tabla 3 muestra la frecuencia de muestras según rangos de pH de un total de 18 muestras de suelo levantados en el municipio de pampa Aullagas.

**Tabla 3***Frecuencia de muestras según rangos de pH – municipio de Pampa Aullagas*

Grado	pH	N.º de muestras	%
Muy fuertemente ácido	< 4.5	0	0,00
Fuertemente ácido	4.5 a 5.2	0	0,00
Moderadamente ácido	5.3 a 5.9	0	0,00
Suavemente ácido	6.0 a 6.5	1	5,56
Neutro	6.6 a 7.0	5	27,78
Suavemente alcalino	7.1 a 7.5	3	16,67
Moderadamente alcalino	7.6 a 8.0	6	33,33
Fuertemente alcalino	> 8.1	3	16,67
<b>Total</b>		<b>18</b>	<b>100</b>

**Conductividad eléctrica (C.E.)**

Según los reportes de laboratorio, del total de 18 muestras, se ha encontrado que 12 reportaron ser muestras no salinas, en tanto que 4 reportaron presentar ligera salinidad, solo uno se clasificó como suelo moderadamente salino y uno como suelo muy fuertemente salino. La tabla 4 muestra la frecuencia de muestras según clases de salinidad de un total de 18 muestras de suelo levantados en el municipio de Pampa Aullagas.

**Tabla 4**

*Frecuencia de muestras según clases de salinidad – municipio de Pampa Aullagas*

Clase	C. E (uS/cm)	N.º de muestras	%
No salino	< 200	12	66,67
Ligeramente salino	200 – 400	4	22,22
Moderadamente salino	400 – 800	1	5,56
Fuertemente salino	800 – 1600	0	0,00
Muy fuertemente salino	> 1600	1	5,56
<b>Total</b>		<b>18</b>	<b>100</b>

**Materia Orgánica**

Se ha encontrado que, del total de 18 muestras, 17 reportaron contenidos muy bajos de materia orgánica (M.O.) y solo una se clasificó como suelo con contenido moderado. No se reportaron muestras de suelo con concentraciones bajas, altas o muy altas de M.O. Las adversas condiciones climáticas, caracterizadas por las bajas precipitaciones y las temperaturas medias de la zona, hacen que exista una baja producción de biomasa y que, además, los procesos de descomposición de la M.O. sean reducidos. Estas condiciones, asociadas a las prácticas de monocultivo de quinua, la escasa reposición de nutrientes y los inadecuados sistemas de manejo y conservación de suelos, explican los bajos niveles de M.O. en la zona. La Tabla 5 muestra la frecuencia de muestras según rangos de M.O., de un total de 18 muestras levantadas en el municipio de Pampa Aullagas.

**Tabla 5**

*Grado y frecuencia de muestras según rangos de M.O. – municipio de Pampa Aullagas*

Grado	M.O. (%)	N.º de muestras	%
Muy baja	< 2,8	17	94,44
Baja	2,9 - 4,0	0	0,00
Moderada	4,1 - 7,5	1	5,56
Alta	7,6 - 10,0	0	0,00
Muy Alta	> 10,1	0	0,00
<b>Total</b>		<b>18</b>	<b>100</b>

### **Nitrógeno total**

El contenido y las formas de nitrógeno en el suelo no presentan una naturaleza estática sino dinámica, la cantidad de este está controlada por las condiciones climáticas y la vegetación, la textura también juega un rol importante. Se ha encontrado que en suelos arcillosos la cantidad de nitrógeno es mayor en suelos arcillosos que en suelos limosos y arenosos. El pH también ejerce una influencia importante sobre la actividad microbiana del suelo ya que son estos los responsables de los procesos de mineralización y descomposición de la materia orgánica y por tanto del nitrógeno total en el suelo, las prácticas agrícolas también influyen en las cantidades de nitrógeno en el suelo.

Del total de 18 muestras de suelo levantados en el municipio de Pampa Aullagas, 17 mostraron muy bajas concentraciones de nitrógeno total y solo uno se reportó como moderado, ninguno de las muestras de suelo presento bajas, altas ni muy altas concentraciones de Nitrógeno total. La tabla 6 muestra la frecuencia de muestras según rangos de Nt (%), de un total de 18 muestras de suelo levantados en el municipio de Pampa Aullagas.

**Tabla 6**

*Grado y frecuencia de muestras según rangos de N.t. – municipio de Pampa Aullagas*

<b>Grado</b>	<b>Nt (%)</b>	<b>N.º de muestras</b>	<b>%</b>
Muy baja	< 0,20	17	94,44
Baja	0,21 - 0,30	0	0,00
Moderada	0,31 - 0,40	1	5,56
Alta	0,41 - 0,50	0	0,00
Muy Alta	> 0,51	0	0,00
<b>Total</b>		<b>18</b>	<b>100</b>

Según Fassbender & Bornemisza (1987), el nitrógeno total está compuesto por a) Nitrógeno Orgánico (85% a 95%) y b) Nitrógeno Inorgánico (5% a 15%), indica, además, que el porcentaje de nitrógeno inorgánico es más alto en regiones áridas y semiáridas y que el nitrógeno intercambiable (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) no supera el 2% del nitrógeno total y que el nitrógeno mineralizado (N-NH<sub>3</sub>, N-NO<sub>2</sub>, N-NO<sub>3</sub><sup>+</sup>) tampoco supera el 2%.

### **Fósforo**

A diferencia del nitrógeno, el fósforo es más estable en los suelos, lo que no ocurre con los compuestos nitrogenados que pueden ser volatilizados y lixiviados, esta alta estabilidad resulta de su baja solubilidad que a veces causa deficiencias de disponibilidad de P para las plantas. El fósforo se presenta en el suelo exclusivamente como ortofosfato y en su mayoría son derivados del ácido fosfórico. En base a la hipótesis de que el fósforo también es derivado de la Materia Orgánica, se debería esperar que en los suelos del área del proyecto las concentraciones del fósforo también sean bajas, pero debido a que estos suelos son de origen volcánico las concentraciones de fósforo están en el orden de moderados a altos.

En el área del proyecto, de un total de 18 muestras de suelo levantados en el municipio de Pampa Aullagas, 6 presentaron bajas y moderadas concentración de fósforo disponible, 4 se clasifican con alta

concentración y solo 2 presentaron muy bajas concentraciones, no se reportaron muestras con muy altas concentraciones de fósforo. Fassbender & Bornemisza (1987), menciona que los suelos jóvenes y de origen volcánico tienen altos contenidos de fosfatos inorgánicos principalmente de fosfatos de calcio, así mismo indica que en suelos neutros y alcalinos predominan los fosfatos de calcio similar que en suelos arenosos. La tabla 7 muestra la frecuencia de muestras de suelos según rangos de concentración de fósforo disponible en un total de 18 muestras de suelos levantados en el municipio de Pampa Aullagas.

**Tabla 7**

*Grado y frecuencia de muestras según rangos de P. disponible – Municipio de Pampa Aullagas*

<b>Grado</b>	<b>P. disponible</b>	<b>N.º de muestras</b>	<b>%</b>
Muy baja	< 3,0	2	11,11
Baja	3,1 - 7,0	6	33,33
Moderada	7,1 - 15,0	6	33,33
Alta	15,1 – 25,0	4	22,22
Muy Alta	> 25,0	0	0,00
<b>Total</b>		<b>18</b>	<b>100</b>

**Potasio**

Parra (1960), afirma que los suelos derivados de arenas y cenizas volcánicas presentan niveles altos de potasio intercambiable, en la zona de estudio, se ha encontrado que, de un total de 18 muestras, 8 presentaron moderadas concentraciones de potasio, 6 presentaron altas concentraciones de potasio, solo uno se reportó con baja concertación igual que solo uno presento muy baja concentración de potasio. La tabla 8 muestra la frecuencia de muestras a diferentes rangos de concentraciones de potasio de un total de 18 muestras de suelo.

**Tabla 8**

*Frecuencia de muestras según rangos de K intercambiable – Municipio de Pampa Aullagas*

<b>Grado</b>	<b>K (meq/100g)</b>	<b>Nº de muestras</b>	<b>%</b>
Muy baja	< 0,10	1	5,56
Baja	0,11 - 0,30	2	11,11
Moderada	0,31 - 0,70	8	44,44
Alta	0,71 - 1,20	6	33,33
Muy Alta	> 1,21	1	5,56
<b>Total</b>		<b>18</b>	<b>100</b>

**Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)**

El intercambio catiónico es una de las propiedades más importantes del suelo, los cationes cambiables influyen en muchas de las propiedades del suelo, son ocho los cationes intercambiables más importantes:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  e  $\text{H}^+$ , ellos componen el conjunto de cationes del complejo coloidal. La CIC está estrechamente relacionado con el contenido de materia orgánica y arcilla del suelo. Cepeda (1991), menciona que el 99% de los cationes se hallan absorbidos en las superficies coloidales y menos del 1% se hallan en solución. Esto explica que los nutrientes liberados en los suelos del Inter Salar no son retenidos o absorbidos por las plantas y coloides debido a su bajo contenido de materia orgánica y arcilla.

En el área del proyecto se ha encontrado que, de un total de 18 muestras de suelo, 13 presentaron muy bajas concentraciones de CIC, 4 presentaron bajas concentraciones y solo uno se reportó con alta concentración. La tabla 9 muestra las frecuencias de muestras a diferentes rangos de CIC de suelos muestreados del municipio de Pampa Aullagas.

**Tabla 9**

*Frecuencia de muestras según rangos de CIC – Municipio de Pampa Aullagas*

<b>Grado</b>	<b>CIC (meq/100g)</b>	<b>Nº de muestras</b>	<b>%</b>
Muy baja	< 6,0	13	72,22
Baja	6,1 - 12,0	4	22,22
Moderada	12,1 - 25,0	0	0,00
Alta	25,1 - 40,0	1	5,56
Muy Alta	> 40,1	0	0,00
<b>Total</b>		<b>18</b>	<b>100</b>

**Valoración de la fertilidad de suelos**

Al establecer el grado de fertilidad de suelos, es importante aclarar que los datos reportados por el laboratorio no es lo que realmente la planta puede utilizar, sino que estas son cantidades que se relacionan de una manera definida con el aporte disponible en el suelo y al cual la planta puede tener acceso (Chavez & Kwarteng, 1989; Centro Internacional de la Quinoa, 2018).

En base a la valoración de fertilidad de suelos considerando los parámetros de pH, CIC, Materia Orgánica, Nitrógeno Total y Fósforo disponible, se ha encontrado que de las 18 muestras levantadas en el municipio de Pampa Aullagas, 13 se clasifican como suelos con muy baja fertilidad, 4 se clasifican como suelos con fertilidad baja y solo uno se clasifica como suelo con fertilidad moderada. La tabla 10 muestra la frecuencia de muestras según grados de fertilidad de suelos del Municipio de Pampa Aullagas.

**Tabla 10**

Frecuencia de muestras según rangos de P. disponible – Municipio de Pampa Aullagas

Escala de Clasificación	N.º de muestras	%
Muy baja	13	72,22
Baja	4	22,22
Moderada	1	5,56
Moderada a alta	0	0,00
Alta	0	0,00
<b>Total</b>	<b>18</b>	<b>100</b>

#### 4. Conclusiones

El estudio realizado sobre imágenes satélite Landsat 5-TM y validado en campo mediante levantamiento de datos GPS revela que en la provincia la superficie actual de quinua asciende a 17.216 ha (2,37% del área de la provincia) y que, de acuerdo a la dinámica actual de expansión de frontera agrícola, las áreas con pendientes menores al 5%, elevaciones menores a los 3760 msnm y suelos con vegetación de asociación herbazal–arbustal (*tholas, añawayas, chiiales, pajonales*) son los más favorables para ser nuevas zonas productoras de quinua.

Se estima que la máxima superficie probable con condiciones para producción de quinua en la provincia Ladislao Cabrera sería de 78.200 ha y que según la tendencia de expansión de frontera agrícola que se viene presentando en la zona, las áreas con cobertura vegetal herbazal–arbustal moderado son las zonas con prioridad uno para cultivos de quinua (46.972 ha), seguido de las áreas con vegetación arbustal herbazal denso (31288 ha).

Los suelos presentan texturas arenosos francos y arenosos, cuyos pH se clasifican como moderadamente alcalinos y neutros, de acuerdo a su salinidad son suelos no salinos y ligeramente salinos, con relación a la materia orgánica y el nitrógeno total, ambos se encuentran en los niveles muy bajos, mientras que la concentración de fósforo y potasio se encuentran en los niveles de moderado a alto lo cual es característico de suelos volcánicos, con referencia a la capacidad de intercambio catiónico estos suelos se clasifican como muy bajos a bajos. En general los suelos del municipio de Pampa Aullagas se clasifican como muy bajos en fertilidad, lo cual despierta una serie de interrogantes como: ¿Por qué esta área del departamento pese a tener suelos con baja fertilidad, es una de las zonas con los más altos rendimientos de quinua?, ¿Qué otras propiedades son fuertemente influyentes para que se tengan estos altos rendimientos?

## Referencias

- Alandia, G., Rodriguez, J., Jacobsen, S., Bazile, D., & Condori, B. (2020). Global expansion of quinoa and challenges for the Andean region. *Global Food Security*, 26, 100429. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100429>
- Alonso-Fradejas, A., Borrás, S., Holmes, T., Holt-Giménez, E., & Robbins, M. (2015). Food sovereignty: convergence and contradictions, conditions and challenges. *Third World Quarterly*, 36(3), 431-448. <https://doi.org/10.1080/01436597.2015.1023567>
- Andersen, M. (2007). An introductory note on the environmental economics of the circular economy. *Sustainability Science*, 2(1), 133-140. <https://doi.org/10.1007/s11625-006-0013-6>
- Andreotti, F., Bazile, D., Biaggi, C., Callo-Concha, D., Jacquet, J., Jemal, O., King, O., Mboosso, C., Padulosi, S., Speelman, E., & van Noordwijk, M. (2022). When neglected species gain global interest: Lessons learned from quinoa's boom and bust for teff and minor millet. *Global Food Security*, 32, 100613. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2022.100613>
- Ataucusi, Y., Mercado, W., Ponce, R., Orihuela, C., Luna, H., Ortiz, H., & Mogollon, R. (2023). La Eficiencia de la producción de quinua en zonas altoandinas: el caso de Puno-Perú. *Revista Iberoamericana de Estudios Municipales*, 27, 1-21. Internet Archive. <https://doi.org/10.32457/riem27.2047>
- Ballón, E. 1975. Informe Anual del programa de Quinoa. *Instituto Boliviano de Tecnología Agropecuaria*. La Paz, Bolivia.
- Bazile, D., & Baudron, F. (2015). The dynamics of the global expansion of quinoa growing in view of its high biodiversity. En D. Bazile, H. D. Bertero, & C. Nieto (Eds.), *State of the art report on quinoa around the world in 2013* (pp. 42-55). FAO. <https://agritrop.cirad.fr/575493/>
- Cepeda, J. (1991). *Química de suelos* (2.ª ed.). Trillas. <https://is.gd/6R3gIT>
- Centro Internacional de la Quinoa. (2018). *Reporte estadístico de la quinua CIQ*. Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras. <https://is.gd/5c1r7d>
- Chavez, P. & Kwarteng, A. (1989). Extracting Spectral Contrast in Landsat Thematic Mapper Image Data Using Selective Principal Component Analysis. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 55 (1), 339-348. <https://is.gd/OLYBYv>
- Chuvieco, E. (2002). Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio. *Ariel*. <https://is.gd/4n4Xc2>
- Crossman, N., Burkhard, B., Nedkov, S., Willemen, L., Petz, K., Palomo, I., Drakou, E., et al. (2013). A blueprint for mapping and modelling ecosystem services. *Ecosystem Services*, 4, 4-14. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.02.001>
- Fassbender, H., & Bornemisza, E. (1987). *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina* (2.ª ed.). IICA. <https://is.gd/XGOQwF>
- González, J., Eisa, S., Hussin, S., & Prado, F. (2015). Quinoa: An Incan crop to face global changes in agriculture. En K. Murphy & J. Matanguihan (Eds.), *Quinoa: Improvement and sustainable production* (Cap. 1, pp. 1-18). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118628041.ch1>
- Gobierno de Bolivia, Ministerio de Desarrollo Sostenible y Planificación. (1997). *Programa de acción nacional de lucha contra la desertificación y la sequía (PAN-LCD)*. <https://is.gd/nkS0nN>

- Laguna, P., Cáceres, Z., & Carimetrando, A. (2006). Del Altiplano Sur boliviano hasta el mercado global: Coordinación y estructuras de gobernanza de la cadena de valor de la quinua orgánica y del comercio justo. *Agroalimentaria*, 11(22), 65-76. <https://is.gd/TWQBLL>
- Nelson, G., Rosegrant, M., Koo, J., Robertson, R., Sulser, T., Zhu, T., ... & Lee, D. (2009). *Climate change: Impact on agriculture and costs of adaptation*. International Food Policy Research Institute. <https://doi.org/10.2499/0896295354>
- Parra, A. (1960). *Estudio sobre el potasio intercambiable en Andisoles de la zona cafetera*. Instituto Colombiano Agropecuario (ICA).
- Quintanilla, J. (2010). *Producción de Quinua Oruro y Potosí*. Programa de Investigación Estratégica en Bolivia. PIEB, Bolivia. <https://is.gd/kqrYFz>
- Tapia, G. (1979). La Quinua un cultivo de los Andes altos. *Academia Nacional de Ciencias de Bolivia. La Paz: Academia Nacional de Ciencias*. <https://n9.cl/h14r8>

## 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 financió completamente la investigación.

### Contribución de autoría

Pedro Román Vallejos Mamani: 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 contribuye activamente en el análisis de los resultados, revisión y aprobación del manuscrito final.