

Gestión sostenible de la cobertura vegetal como pilar de la plasticidad agronómica del *Solanum tuberosum* en sistemas productivos altoandinos

Sustainable management of vegetation cover as a pillar of the agronomic plasticity of Solanum tuberosum in high-Andean production systems

Richard, Retamozo Ccorahua¹  ; Aubert, Huacho Torres² ; Vilma, Huillcas Ccanto² ; William Blas, Torres Gutierrez¹ ; Genaro Mario, Condori Ramos¹ ; Rene Antonio, Hinojosa Benavides¹ 

(1) Universidad Nacional Autónoma de Huanta. Ayacucho, Perú.

(2) Universidad Nacional de Huancavelica. Huancavelica, Perú.

Resumen

La agricultura de conservación, mediante prácticas como la labranza cero y el uso de cobertura vegetal permanente, se ha consolidado como una estrategia fundamental para proteger el suelo y garantizar la productividad del *Solanum tuberosum* en ecosistemas vulnerables. Este estudio tuvo como objetivo evaluar la influencia de la cobertura vegetal de *Pennisetum clandestinum* (fresca vs. seca) sobre la plasticidad fenotípica y fisiológica del cultivo de papa en sistemas de terrazas andinas en Huanta, Ayacucho, Perú. Bajo un diseño de bloques completos al azar, se compararon dos tratamientos suplementados con microorganismos de montaña y humus de lombriz, monitoreando variables de crecimiento, rendimiento y temperatura foliar. Los resultados demostraron que la cobertura vegetal modifica la dinámica de desarrollo sin comprometer la productividad total. La cobertura fresca favoreció un mayor número de tubérculos por planta, mientras que la cobertura seca optimizó la retención de humedad edáfica y el peso individual de los tubérculos (23,6±1,5 t/ha y 25,4 ±1,2 t/ha, respectivamente). Aunque el rendimiento total no presentó diferencias significativas, la plasticidad fenotípica observada evidencia una respuesta adaptativa del cultivo a las condiciones microclimáticas creadas por el manejo de la biomasa. Se concluye que el uso de cobertura vegetal representa una alternativa agronómica viable y sostenible, proporcionando resiliencia productiva y conservación de suelos en sistemas agrícolas de alta montaña.

Palabras clave: *Solanum tuberosum*, cobertura vegetal, labranza cero, papa andina, plasticidad agronómica, agricultura regenerativa.

Abstract

Conservation agriculture, through practices such as zero tillage and the use of permanent vegetation cover, has established itself as a fundamental strategy to protect soil and ensure the productivity of Solanum tuberosum in vulnerable ecosystems. This study aimed to evaluate the influence of Pennisetum clandestinum vegetation cover (fresh vs. dry) on the phenotypic and physiological plasticity of potato crops in Andean terrace systems in Huanta, Ayacucho, Peru. Using a randomized complete block design, two treatments supplemented with mountain microorganisms and worm humus were compared, monitoring growth, yield, and canopy temperature parameters. Results showed that vegetation cover modifies development dynamics without compromising total productivity. Fresh cover favored a higher number of tubers per plant, while dry cover optimized soil moisture retention and individual tuber weight (23.±1.5 t/ha and 25.4 ± 1.2 t/ha respectively). Although total yield showed no significant differences, the observed phenotypic plasticity demonstrates an adaptive response of the crop to the microclimatic conditions created by biomass management. It is concluded that the use of vegetation cover represents a viable and sustainable agronomic alternative, providing productive resilience and soil conservation in high-mountain agricultural systems.

Keywords: *Solanum tuberosum*, vegetation cover, zero tillage, andean potato, agronomic plasticity, regenerative agriculture.

Recibido/Received	28-04-2026	Aprobado/Approved	17-06-2026	Publicado/Published	18-06-2026
-------------------	------------	-------------------	------------	---------------------	------------

Introducción

La papa (*Solanum tuberosum* L.) se constituye como el eje fundamental de la seguridad alimentaria, la estabilidad económica y la identidad cultural en los Andes peruanos. No obstante, la sostenibilidad de este cultivo en las complejas laderas altoandinas, se encuentra bajo una presión sin precedentes debido a prácticas agronómicas convencionales, caracterizadas por el uso de labranza intensiva y el manejo subóptimo de los recursos edáficos. La preparación tradicional del terreno, basada en la mecanización mediante arado repetido, no solo compromete la estructura física del suelo de montaña, sino que acelera procesos de erosión hídrica y degrada sistemáticamente el contenido de materia orgánica, amenazando la productividad a largo plazo (Ahmad et al., 2024; Briceño, 2024). En este contexto, surge la necesidad apremiante de transitar hacia modelos de agricultura regenerativa que repliquen los procesos naturales del ecosistema andino. La implementación de coberturas vegetales representa una estrategia disruptiva capaz de mitigar la escorrentía, reducir la pérdida de suelo y mejorar el ciclo de nutrientes, potenciando sinergias biológicas mediante el uso de consorcios nativos, como los microorganismos de montaña, que actúan como catalizadores de la fertilidad edáfica (Castro et al., 2018; Bordallo et al., 2023).

La adopción de paradigmas de "labranza cero" mediante el establecimiento de coberturas vivas o muertas genera un microambiente edafoclimático diferenciado. Este entorno permite que la planta de papa despliegue mecanismos intrínsecos de plasticidad, una propiedad fundamental que permite a un organismo modificar su fenotipo (forma, función o comportamiento) en respuesta a las variaciones del entorno (Scavo et al., 2023). La plasticidad agronómica, entendida como la capacidad de ajuste fenotípico, se manifiesta en la arquitectura de la planta (altura y ramificación) y en la partición eficiente de la biomasa hacia los órganos de reserva, mientras que la plasticidad fisiológica involucra cambios metabólicos y funcionales, tales como la regulación de la tasa transpiratoria, la eficiencia fotosintética y la optimización de la arquitectura radicular (Marchiori et al., 2017; Scavo et al., 2022). Esta capacidad de aclimatación es crítica en un contexto de variabilidad climática donde el acceso al agua y a los nutrientes es altamente inestable (Filippi & Ciarlo, 2024).

El impacto de las coberturas leguminosas sobre el rendimiento del cultivo es notable; diversos estudios sugieren incrementos en la producción que oscilan entre el 12% y el 38%, respaldados por una mejora sustancial en la retención hídrica y la disponibilidad de carbono en el perfil del suelo (Zhang et al., 2023; Xaba et al., 2025). La agricultura sustentable, por definición, integra el manejo técnico con una visión de equidad intergeneracional, asegurando que la satisfacción de las necesidades humanas actuales no comprometa el patrimonio natural (Hurtado et al., 2022). Bajo este enfoque, la innovación en la extensión agraria y el cambio de paradigma productivo hacia sistemas ambientalmente apropiados, económicamente viables y socialmente aceptables se vuelven imperativos para los pequeños productores en zonas de alta vulnerabilidad (Vergara et al., 2023).

La conservación de la tríada suelo-agua-planta es un desafío significativo para la agronomía contemporánea, dado que los cambios en la cubierta vegetal alteran de manera determinante la erosión superficial, el balance hidrológico y la dinámica de nutrientes a escala de microcuenca, aunque se debe tener en cuenta que, el desafío actual es cómo producir suficientes alimentos para nueve mil millones de personas al año 2050 (García & López, 2025; Yzarra et al., 2021). Ante el crecimiento demográfico proyectado hacia 2050, el imperativo es alcanzar sistemas de alta eficiencia con mínimos insumos externos (Pszczółkowski et al., 2025; Li et al., 2025). La comprensión detallada de cómo la gestión de una cobertura, ya sea a través de su composición química, su densidad o su estado (fresco versus seco), modula la temperatura del suelo y la disponibilidad hídrica, resulta crucial para predecir el comportamiento del cultivo ante el estrés abiótico (Curi, 2021; Eshel et al., 2015). Esta gestión circular, además, permite integrar desechos de la cadena de valor de la papa en el ciclo productivo, cerrando brechas que anteriormente se consideraban pérdidas inevitables (Schmidt & Miller, 2023).

En la región de Ayacucho, la necesidad de validar estas prácticas en condiciones reales es evidente. Las experiencias previas demuestran que las variables morfofenológicas y el rendimiento del cultivo varían drásticamente bajo condiciones agroclimáticas altoandinas cuando se prescindie de coberturas (Quispe & Pari, 2025). Asimismo, factores técnicos como la densidad de siembra interactúan con el manejo de la fertilidad potásica y la protección del suelo, definiendo el techo productivo de variedades locales (Palomino, 2024). A pesar de esta evidencia, persiste una brecha de conocimiento sobre la comparación específica entre la cobertura vegetal fresca frente a la seca y su influencia directa en la plasticidad del *Solanum tuberosum*. Este estudio no solo busca cuantificar estas diferencias, sino también discutir las implicaciones de estas prácticas en la resiliencia de los sistemas agrícolas de pequeña escala, proporcionando evidencia robusta para el fortalecimiento de la agricultura de conservación en el ámbito altoandino. Por lo tanto, el presente trabajo se justifica en la necesidad de generar nuevo conocimiento que permita a los agricultores andinos integrar técnicas de manejo sostenible que, lejos de ser puramente empíricas, se cimenten en la capacidad biológica del cultivo para adaptarse a los entornos desafiantes que caracterizan nuestras terrazas andinas.

Materiales y métodos

Ubicación y condiciones experimentales

La investigación se desarrolló en el distrito de Huanta, región Ayacucho, entre 2024-2025. El sitio experimental se caracterizó por condiciones edáficas iniciales de $21 \pm 2\%$ VMC (volumetric moisture content) y una densidad aparente de $1,20 \text{ g/cm}^3$, sin registrar diferencias significativas entre los bloques experimentales, lo que permitió establecer un punto de partida homogéneo.

Diseño experimental

Se utilizó un diseño en bloques completos al azar (DBCA). El experimento evaluó el efecto de dos tipos de cobertura vegetal sobre el cultivo de papa (*Solanum tuberosum*, var. Amarillis):

- **T1 (Cobertura fresca):** Aplicación de biomasa de *Pennisetum clandestinum* en estado fresco (70% de humedad).
- **T2 (Cobertura seca):** Aplicación de biomasa de *Pennisetum clandestinum* en estado pre-secado (10% de humedad).

En ambos tratamientos se mantuvo una equivalencia de 4,5 t/ha de materia seca. El sistema se gestionó bajo el esquema de "labranza cero", realizando siembras directas mediante pequeñas aperturas en la cobertura para la colocación de los tubérculos.

Manejo agronómico y bio-inoculación

La variedad Amarillis, de ciclo intermedio (aprox. 120 días), fue sometida a un protocolo de desinfección preventiva mediante inmersión en una solución de ceniza y caldo sulfocálcico. La fertilización se realizó de manera localizada, aplicando 1 kg de humus de lombriz (60% de humedad) por golpe.

Para optimizar la dinámica biológica en la rizosfera, se utilizó un consorcio de microorganismos nativos (MM) activados. El preparado consistió en hojarasca de bosque montano fermentada con melaza y salvado de arroz durante 15 días. El lixiviado resultante se diluyó en agua (proporción 1:20) y se aplicó por aspersión a razón de 20 litros por parcela, simulando una lámina de riego de 25 mm para asegurar la penetración sin inducir escorrentía superficial. Este tipo de manejo no degrada al medio ambiente y es técnicamente apropiado, económicamente viable y socialmente aceptable (Hinojosa et al., 2019).

Dinámica del microclima y cobertura

Se realizó un seguimiento de la persistencia de los materiales de cobertura durante los primeros 60 días después de la siembra (DDS). Se documentó el proceso de marchitez acelerada en el T1, en

contraste con la estabilidad estructural observada en el T2, donde el 80% de la cobertura permaneció visible, aunque decolorada, al finalizar el periodo de monitoreo. Midiendo las variables de respuesta. Para caracterizar la plasticidad agronómica y fisiológica de la variedad Amarillis, se evaluaron las siguientes variables:

- **Crecimiento:** Porcentaje de emergencia (%) y altura de planta (cm).
- **Rendimiento:** Número de tubérculos por planta, peso promedio del tubérculo (g) y rendimiento total (t/ha).
- **Fisiología:** Índice de verdor (SPAD) y temperatura foliar del dosel, los cuales fueron monitoreados periódicamente como indicadores de la respuesta metabólica al microclima generado por los tratamientos.

Análisis estadístico

Los datos fueron procesados mediante un análisis de varianza (ANOVA). La normalidad y homogeneidad de varianzas se verificaron mediante las pruebas de Shapiro-Wilk y la prueba de Levene, respectivamente. En los casos donde se detectaron diferencias significativas entre los tratamientos, se aplicó la prueba de comparación de medias de Tukey ($p < 0,05$).

Resultados

Crecimiento y desarrollo fenológico

Los resultados obtenidos durante entre 2024-2025 revelan diferencias significativas en la respuesta fenotípica del *Solanum tuberosum* var. Amarillis ante las distintas calidades de cobertura vegetal. Como se observa en la Tabla 1, la emergencia a los 30 días después de la siembra (DDS) no mostró diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, alcanzando valores superiores al 90% en ambos casos ($95,2 \pm 2,8\%$ para T1 y $90,5 \pm 4,1\%$ para T2). Esto sugiere que la condición de "labranza cero" permitió un establecimiento uniforme del cultivo independientemente del estado de la biomasa de *Pennisetum clandestinum*.

No obstante, se observó una plasticidad morfológica marcada a los 60 DDS. La altura de planta fue superior en el T1 (cobertura fresca), registrando un promedio de $60,5 \pm 2,3$ cm, frente a los $55,8 \pm 3,1$ cm del T2 ($p < 0,05$). Esta diferencia podría atribuirse a una mayor tasa de mineralización inicial de la cobertura fresca, que facilitó una disponibilidad más inmediata de nutrientes durante las etapas críticas de desarrollo vegetativo.

Tabla 1. Componentes de crecimiento y rendimiento de papa bajo tratamientos de cobertura fresca vs. cobertura seca

Parámetro	Cobertura fresca (T1)	Cobertura seca (T2)
Emergencia a 30 DDS (%)	$95,2 \pm 2,8$ a	$90,5 \pm 4,1$ a
Altura de planta a 60 DDS (cm)	$60,5 \pm 2,3$ a	$55,8 \pm 3,1$ b
Número de tubérculos/planta	$8,2 \pm 1,1$ a	$7,4 \pm 1,0$ b
Peso de tubérculos (g)	78 ± 5 b	85 ± 6 a
Rendimiento de tubérculos (t/ha)	$25,4 \pm 1,2$ a	$23,6 \pm 1,5$ a
Temperatura foliar de dosel (°C, mediodía)	$28,7 \pm 0,8$ a	$27,5 \pm 1,1$

Nota. letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$)

Componentes del rendimiento y plasticidad agronómica

La morfología de la planta mostró una respuesta compensatoria interesante. El T1 presentó un mayor número de tubérculos por planta ($8,2 \pm 1,1$), superando significativamente al T2 ($7,4 \pm 1,0$). Sin embargo, la estrategia de asignación de biomasa varió inversamente: el T2, aunque produjo menos tubérculos, permitió obtener un peso promedio de tubérculo mayor (85 ± 6 g) en comparación con el T1

(78±5 g). Este fenómeno de compensación es indicativo de la plasticidad agronómica de la variedad, donde la planta ajusta el tamaño de sus órganos de reserva en función de las condiciones microclimáticas moduladas por la persistencia de la cobertura seca.

A pesar de estas variaciones en los componentes individuales, el rendimiento total estimado no presentó diferencias significativas ($p > 0,05$), alcanzando 25,4 t/ha en T1 y 23,6 t/ha en T2. Estos valores demuestran que ambos sistemas de cobertura son viables para mantener niveles productivos competitivos en sistemas altoandinos.

Respuesta fisiológica y microclima del dosel

Las mediciones fisiológicas realizadas al mediodía indicaron un efecto diferencial en la termorregulación del dosel. La temperatura foliar fue menor en el T2 $27,5 \pm 1,1$ °C en comparación con el T1 ($28,7 \pm 0,8$ °C), lo cual sugiere que la cobertura seca, al mantener una estructura física más persistente, ofrece una mayor capacidad de aislamiento térmico, reduciendo el estrés térmico en el dosel bajo condiciones de radiación intensa propias de la altitud. Este menor estrés térmico en T2 explica, en parte, la mayor acumulación de masa por tubérculo observada.

Discusión

La implementación de sistemas de "labranza cero" asistidos por coberturas vegetales en las terrazas andinas de Huanta ha revelado una capacidad de adaptación fenotípica del *Solanum tuberosum* var. Amarillis que desafía los paradigmas de la agricultura convencional de ladera. Los resultados obtenidos sobre la emergencia y el crecimiento inicial (entre 86,4% y 98% a 30 DDS) subrayan la eficacia de la protección superficial en el microclima edáfico. Este hallazgo se alinea con las observaciones de Briceño (2024), quien sostiene que el uso de *mulch* (o acolchado) no solo mejora la tasa de establecimiento, sino que actúa como un catalizador de rendimiento al mitigar las fluctuaciones térmicas extremas, logrando incrementos de hasta un 20% en comparación con suelos desnudos. Esta mejora en la emergencia se debe a que la cobertura actúa como un regulador higratérmico que protege al tubérculo semilla de la radiación directa, una condición crítica en los Andes, respaldando lo expuesto por García-García y López (2025) sobre la reducción de la huella hídrica y la estabilidad térmica en la zona de rizogénesis.

La notable diferencia en el vigor de crecimiento aéreo (altura de planta) observada en el T1 (cobertura fresca) frente al T2 (cobertura seca) permite corroborar la teoría de la fertilización biológica de rápida acción. La descomposición acelerada del *Pennisetum clandestinum* en estado fresco facilita la liberación de nitrógeno mineral, especialmente en formas de nitrato, disponible para la absorción inmediata por parte de la planta, un proceso que, según Castro et al. (2018), es análogo a la dinámica de las leguminosas en los sistemas tropicales, donde la alta tasa de mineralización impulsa un desarrollo vegetativo vigoroso. Esta dinámica se ve potenciada por la inoculación de microorganismos de montaña (MM), los cuales, al ser integrados en un entorno de alta humedad, aceleran los ciclos biogeoquímicos, fenómeno discutido por Filippi y Ciarlo (2024) respecto a la eficiencia del uso de nitrógeno bajo estrés biótico y abiótico.

Un aspecto central de esta investigación es la plasticidad agronómica manifestada en la partición de la biomasa hacia los órganos de reserva. El T1 favoreció una mayor ramificación subterránea y un número elevado de tubérculos, mientras que el T2 incentivó el engrosamiento individual de los mismos. Esta estrategia reproductiva, donde la planta compensa el número de tubérculos por el peso de los mismos, sugiere una respuesta homeostática ante la disponibilidad de recursos. Mientras que la cobertura fresca proporciona un "pulso" de nutrientes inicial, la cobertura seca, con su mayor relación C:N, actúa como una reserva de carbono persistente que, al descomponerse lentamente, favorece un balance hídrico prolongado. Este comportamiento coincide con las observaciones de Xaba et al. (2025) y Scavo et al. (2022), quienes explican que la resiliencia fisiológica de la papa permite reconfigurar su arquitectura productiva basándose en la estabilidad del suministro de agua y nutrientes. La capacidad

del T2 para mantener una temperatura foliar menor (27,5 °C) y una humedad edáfica superior (18,1%) refuerza la idea de que la persistencia física de la cobertura es, a largo plazo, una estrategia superior para la gestión del estrés hídrico, validando los estudios de Curi (2021) y Zhang et al. (2023).

En cuanto a la productividad, el rendimiento obtenido (24-25 t/ha) se sitúa en el umbral superior para las condiciones altoandinas, distanciándose del promedio nacional peruano reportado por Quispe y Pari (2025), el cual ronda las 17,2 t/ha. Esta diferencia evidencia que la integración de tecnología conservacionista, que combina la labranza cero con la fertilización orgánica mediante humus de lombriz, permite alcanzar potenciales productivos competitivos, tal como sugieren las rutas de innovación hacia una agricultura de bajos insumos señaladas por Li et al. (2025). Estos hallazgos son consistentes con la premisa de Eshel et al. (2015) de que los cultivos de cobertura no penalizan el rendimiento, y por el contrario, lo estabilizan. La paridad en el rendimiento final entre T1 y T2 es un indicador de la flexibilidad del sistema; independientemente de la estrategia de cobertura, el sistema logra satisfacer la demanda nutricional del cultivo, siempre que exista un manejo orgánico complementario (Chávez, 2022).

Es imperativo considerar también el impacto económico y la circularidad de estos sistemas. Schmidt y Miller (2023) destacan que la gestión de los residuos en la producción de papa no solo tiene un beneficio ecológico, sino que genera una ventaja competitiva en los mercados locales. En este sentido, la propuesta de usar *Pennisetum clandestinum* no es solo agronómica, sino socialmente aceptable y económicamente viable, aspectos fundamentales para el desarrollo rural según Vergara et al. (2023). La posibilidad de utilizar la biomasa local (fresca o seca) reduce los costos de producción al minimizar el uso de fertilizantes sintéticos, los cuales, como señalan Ahmad et al. (2024), comprometen la salud del suelo a largo plazo en regiones de alta montaña.

El análisis de la plasticidad fisiológica también debe considerar el papel del genotipo en la interacción con el ambiente. Bordallo et al. (2023) y Scavo et al. (2023) subrayan que el rendimiento del tubérculo es el resultado de una interacción G×E (Genotipo × Ambiente) donde la plasticidad actúa como un filtro. En nuestro caso, la variedad Amarillis demostró ser altamente plástica. Mientras el T1 optimizó la captura de nutrientes precoces, el T2 optimizó la eficiencia del uso del agua. Esta dualidad de resultados tiene implicaciones directas para las recomendaciones técnicas a los agricultores de Ayacucho: en campañas con alta probabilidad de sequías estacionales, la cobertura seca debe ser la práctica recomendada para maximizar la resiliencia hídrica; en cambio, en años con regímenes pluviométricos abundantes o con suelos degradados que requieren una rápida recuperación de nitrógeno, la cobertura fresca (con su rápida tasa de mineralización) resulta más eficiente para estimular la biomasa. Ciertamente, la conservación de suelos y agua es crítica para la sostenibilidad agrícola, siendo conocido que los cambios en la cubierta vegetal afectan directamente a la erosión del suelo, al ciclo hidrológico, a la pérdida de biodiversidad, así como al movimiento de nutrientes (Castro et al., 2023).

La investigación de Pszczółkowski et al. (2025) sobre los determinantes agroecológicos en Polonia ofrece un paralelismo útil: la diversidad de estrategias de manejo de suelo bajo distintas condiciones climáticas es la clave para la estabilidad del rendimiento. De igual modo, los trabajos de Hurtado et al. (2022) en los páramos colombianos subrayan que la sostenibilidad de la papa de altura no depende únicamente de la variedad, sino de la integración del sistema en un modelo donde la conservación del suelo (a través de coberturas y labranza mínima) sea la norma y no la excepción. Finalmente, la comparación realizada con el trabajo de Marchiori et al. (2017) sobre la plasticidad fisiológica en gramíneas bajo déficit hídrico permite extrapolar que las plantas, mediante el ajuste de su arquitectura radicular y la conductancia estomática, pueden mitigar los efectos negativos de la variabilidad climática. En nuestros resultados, aunque el riego fue controlado, el efecto amortiguador de la cobertura seca sugiere que, bajo condiciones de campo abierto con mayor variabilidad, las diferencias entre T1 y T2 se harían mucho más evidentes en favor de la cobertura seca.

Las implicaciones para la sostenibilidad andina son claras: el abandono del arado tradicional es una medida necesaria para frenar la erosión galopante en las laderas. Al adoptar la labranza cero, no

solo se protege el recurso suelo, sino que se fomenta la biodiversidad microbiana del edafón (Filippi & Ciarlo, 2024). Este modelo productivo es, en esencia, un pilar fundamental para la seguridad alimentaria de las futuras generaciones (Chávez, 2022). La elección entre cobertura fresca y seca dependerá de la logística de los pequeños productores, pero ambos caminos llevan a una agricultura regenerativa que conserva el agua, el recurso máspreciado en los ecosistemas de alta montaña.

Este estudio demuestra que la plasticidad agronómica del *Solanum tuberosum* permite una respuesta adaptativa eficiente a diferentes modalidades de cobertura. La equivalencia en el rendimiento final, a pesar de las rutas divergentes en el desarrollo morfológico (número vs. peso de tubérculos), valida que la sostenibilidad agrícola en los Andes no exige sacrificar productividad en favor de la conservación, sino entender la ecología del cultivo para optimizar sus capacidades intrínsecas de aclimatación. Los sistemas propuestos no solo mejoran la salud del suelo, sino que ofrecen un marco robusto de resiliencia frente a los retos climáticos del siglo XXI. Se recomienda continuar con estudios a largo plazo que evalúen la acumulación de carbono orgánico y la sostenibilidad financiera de estas prácticas para asegurar su adopción a gran escala en las comunidades altoandinas.

Consideraciones finales

La transición hacia sistemas de producción de papa basados en la "labranza cero" y el uso estratégico de coberturas vegetales representa mucho más que una innovación técnica; constituye un cambio de paradigma hacia la soberanía tecnológica en los Andes. Los resultados obtenidos ratifican que es posible alcanzar rendimientos competitivos sin recurrir a la perturbación mecánica intensiva del suelo, ofreciendo a los productores altoandinos una ruta efectiva para restaurar la integridad de sus terrenos. Esta práctica permite mitigar la erosión hídrica, el principal desafío físico en laderas, y fomentar una reactivación biológica del suelo que, apoyada por la inoculación de microorganismos de montaña, reduce la dependencia de insumos externos, alinea los ciclos productivos con los ritmos naturales y disminuye el impacto ambiental asociado a las técnicas convencionales.

Desde una perspectiva social, la adopción de estas estrategias de conservación tiene el potencial de fortalecer la resiliencia de las comunidades rurales. Al optimizar el uso de recursos disponibles *in situ*, como el pasto *Pennisetum clandestinum*, se fomenta una economía circular de pequeña escala que no solo reduce los costos de producción, sino que también empodera a los agricultores mediante el conocimiento técnico adaptado a su realidad. La gestión sostenible de la cobertura, ya sea fresca para una recuperación rápida de nutrientes o seca para una protección hídrica prolongada, permite a los productores tomar decisiones informadas según el comportamiento climático de cada campaña. Esto incrementa la estabilidad de sus ingresos y contribuye directamente a la seguridad alimentaria regional, al garantizar una producción más estable frente a la creciente incertidumbre climática que hoy amenaza a los sistemas de cultivo de montaña.

En última instancia, el éxito de estos sistemas de producción no radica únicamente en las toneladas de papa obtenidas por hectárea, sino en la construcción de un modelo de desarrollo que integra la sabiduría ancestral con el rigor científico contemporáneo. La plasticidad agronómica que manifiesta el *Solanum tuberosum* bajo este manejo es un reflejo de la resiliencia que las comunidades andinas han practicado durante siglos. Promover esta modalidad de agricultura regenerativa en las terrazas de Ayacucho y otras regiones altoandinas es un paso fundamental para asegurar que las futuras generaciones de productores posean un suelo fértil, un recurso hídrico gestionado con eficiencia y, sobre todo, una identidad agrícola capaz de adaptarse, innovar y prosperar en uno de los entornos más desafiantes y valiosos del planeta.

Agradecimientos

A nuestras casas de estudio.

Conflicto de intereses

No se reporta conflicto de intereses.

Referencias

- Ahmad, I., Khan, M. U., & Ali, S. (2024). Climate-resilient potato production: Integrating sustainable nutrient management and soil health strategies in high-altitude regions. *Journal of Cleaner Production*, 450, 141-155. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141920>
- Bordallo, P., Silva, M., & Ribeiro, A. (2023). Regenerative agriculture practices and their impact on potato (*Solanum tuberosum*) yield and carbon sequestration. *Sustainability*, 15(12), 9452. <https://doi.org/10.3390/su15129452>
- Briceño, P. (2024). *Agricultura regenerativa en el cultivo de papa: efecto en el rendimiento, rentabilidad y huella de carbono en la variedad INIA 325-poderosa* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca]. Repositorio Institucional. <https://acortar.link/0IlihN>
- Castro, J., Hinojosa, L., Roncal, F., Gave, J., Yzarra, A., Hinojosa, R., Rodríguez, J. (2023). Change in the vegetation cover of wetlands in Pueblo Libre, Huancavelica, period 2016-2018. *Remittances Review*, 8 (4), 2143-2151. <https://doi.org/10.33182/rr.v8i4.149>
- Castro, E., Mojica, E., Carulla, J., & Lascano, C. (2018). Abonos verdes de leguminosas: integración en sistemas agrícolas y ganaderas del trópico. *Agronomía Mesoamericana*, 29(3), 711-729. <https://doi.org/10.15517/ma.v29i3.31612>
- Chávez, L. (2022). *Sostenibilidad de la producción de papa (Solanum tuberosum) de Huasahuasi – Tarma* [Tesis doctoral, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio Institucional UNCP. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/7789>
- Curi, A. (2021). *Efecto de las coberturas vegetales en la humedad del suelo y el rendimiento de (Lactuca sativa) en Acobamba – Huancavelica* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Huancavelica]. Repositorio Institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.14597/5443>
- Eshel, G., Egozi, R., & Goldwasser, Y. (2015). Benefits of growing potatoes under cover crops in a Mediterranean climate. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 211, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.05.002>
- Filippi, A., & Ciarlo, E. (2024). Microbial inoculants as a sustainable tool to improve potato nitrogen use efficiency under drought stress. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1367092. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1367092>
- García A., & López, J. (2025). Soil mulching and its effect on water footprint in potato production: A meta-analysis. *Agricultural Water Management*, 305, 109-120. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109123>
- Hinojosa, R., Vitor, R., Gonzales, J., Quispe, Y., Molina, R., Ricra, J., Sánchez, E., Quispe, J. (2019). Sustentabilidad de los sistemas de producción agropecuaria. *PURIQ*, 1 (2): 164-173. <https://doi.org/10.37073/puriq.1.02.31>
- Hurtado, C. A. S., Totaitive, I. A. S., & Cuervo, R. E. S. (2022). Evaluación de la sostenibilidad de cultivos de papa (páramo de Gámeza, Boyacá, sector Daita, Colombia). *Revista Mutis*, 12(1). <https://doi.org/10.21789/22561498.1769>
- Li, Y., Wang, X., & Zhang, H. (2025). Genomic approaches to improve biotic stress resistance in potato: A path to low-input agriculture. *Theoretical and Applied Genetics*, 138(3), 55-72. <https://doi.org/10.1007/s00122-025-04780-w>

- Retamozo Ccorahua, R., Huacho Torres, A., Huilcas Ccanto, V., Torres Gutierrez, W. B., Condori Ramos, G. M., & Hinojosa Benavides, R. A. (2026). Gestión sostenible de la cobertura vegetal como pilar de la plasticidad agronómica del *Solanum tuberosum* en sistemas productivos altoandinos. *E-Revista Multidisciplinaria Del Saber*, 4, e-RMS08062026. <https://doi.org/10.61286/e-rms.v4i.434>
- Marchiori, P., Machado, E., Sales, C., Espinoza, E., Magalhães, J., Souza, G., Pires, R., & Ribeiro, R. (2017). Physiological Plasticity Is Important for Maintaining Sugarcane Growth under Water Deficit. *Frontiers in Plant Science*, 8 backstage, 2148. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02148>
- Palomino, M. (2024). *Densidad de siembra y dosis de potasio en el rendimiento de papa (Solanum tuberosum) var, Única. Canaán 2750 msnm – Ayacucho* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.unsch.edu.pe/handle/20.500.14612/7145>
- Pszczółkowski, P., Sawicka, B., Niazi, P., Barbaś, P., & Krochmal-Marczak, B. (2025). Agroecological determinants of yield performance in mid-early potato varieties: Evidence from multi-location trials in Poland. *Land*, 14(9), 1777. <https://doi.org/10.3390/land14091777>
- Quispe, D., & Pari, J. (2025). Evaluación del rendimiento y variables morfofenológicas en el cultivo de papa orgánica (*Solanum tuberosum*) bajo condiciones agroclimáticas altoandinas. *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, 6(2), 48-58. <https://doi.org/10.25127/agrops.20252.1087>
- Scavo, A., Fontanazza, S., Restuccia, A., Pesce, G. R., Abbate, C., & Mauromicale, G. (2022). The role of cover crops in improving soil fertility and plant nutritional status in temperate climates. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 42(5). <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00825-0>
- Scavo, A., Mauromicale, G., & Ierna, A. (2023). Dissecting the Genotype × Environment Interaction for Potato Tuber Yield and Components. *Agronomy*, 13(1), 101. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010101>
- Schmidt, T., & Miller, K. (2023). The economic and ecological nexus of circular economy in potato processing waste management. *Resources, Conservation and Recycling*, 194, 107021. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107021>
- Vergara, A., Gómez, R., Espinoza, C., Vilcas, S., & Hinojosa, R. (2023). Cadenas agro-productivas para el desarrollo agrícola sostenible en Huancavelica. *Revista Alfa*, 7(19), 117–129. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v7i19.202>
- Xaba, S., Bello, Z., Rapiya, M., & Ngobese, N. Z. (2025). Sustainable Nutrient Management Strategies for Enhancing Potato Production: The Role of Cover Crops—A Systematic Review. *Horticulturae*, 11(9), 1051. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11091051>
- Yzarra, A., Jaime, J., Bejarano, J. & Hinojosa, R. (2021). Agricultura Tradicional Campesina: Aporte a la Soberanía Alimentaria en el Perú. *Scientific Research Journal CIDI*. 1(1), 15-24. <https://doi.org/10.53942/srjci.v1i1.42>
- Zhang, H., Ghahramani, A., Ali, A., & Erbacher, A. (2023). Cover cropping impacts on soil water and carbon in dryland cropping system. *PLoS ONE*, 18(6), e0286748. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0286748>