



## Uso de coberturas vivas en un sistema de secano para conservar la humedad del suelo e incrementar el rendimiento de la quinua

### Using living cover crops in a rainfed system to preserve soil moisture and increase quinoa yield

Katia Mendoza Dávalos<sup>1</sup>; Samuel Sanabria Quispe<sup>1</sup>; Roberto Cosme De la Cruz<sup>1</sup>; José Quintanilla Rosas<sup>1,\*</sup>; Sandra Duarte Guardia<sup>1</sup>; Gregorio Arone Gaspar<sup>2</sup>

1 Laboratorio Nacional de Suelos, Aguas y Foliarés-LABSAF, Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), Av. La Molina 1981, Lima, Lima 15024, Perú.

2 Universidad Nacional de Barranca, Lima, Perú.

\*Autor corresponsal: [labsafarequipa@inia.gob.pe](mailto:labsafarequipa@inia.gob.pe) (J. Quintanilla Rosas).

ID ORCID de los autores

K. Mendoza Dávalos:  <https://orcid.org/0000-0001-7511-4617>

S. Sanabria Quispe:  <https://orcid.org/0000-0001-5329-1778>

R. C. Cosme De la Cruz:  <https://orcid.org/0000-0002-5774-9325>

J. Quintanilla Rosas:  <https://orcid.org/0000-0001-8463-629X>

S. Duarte Guardia:  <https://orcid.org/0000-0003-4221-2709>

G. Arone Gaspar:  <https://orcid.org/0000-0003-1839-4901>

#### RESUMEN

El uso de coberturas puede traer múltiples ventajas a los sistemas de producción agrícola y a las propiedades de los suelos. El objetivo de este trabajo fue evaluar en un sistema con agricultura de secano, el efecto a corto plazo del trébol (*Medicago hispida* G.) y la arveja (*Pisum sativum* L.) como coberturas vivas en la humedad del suelo y el rendimiento de la quinua, en las localidades de Patasucro, Qaqas, y Ccanis de Ayacucho, Perú. El experimento se condujo bajo un diseño de bloques completos al azar, se empleó como tratamientos al trébol, la arveja y un testigo sin cobertura. La comparación de medias se realizó mediante la prueba de Tukey ( $\alpha$  0,05). Con respecto al rendimiento, solo existieron diferencias significativas en la localidad de Qaqas, donde las coberturas superaron al control por  $0,4 \text{ t ha}^{-1}$  (trébol) y  $0,29 \text{ t ha}^{-1}$  (arveja). La humedad del suelo fue significativamente mayor en el trébol en las localidades de Qaqas y Patasucro, superando al control por 3,97% y 1,02%, respectivamente; la arveja y el control no presentaron diferencias estadísticas. Se sostiene que las mejoras en el rendimiento ocurrieron debido a la conservación de la humedad del suelo generada por el efecto de sombreado de las coberturas.

**Palabras clave:** sistema de secano; cultivos de cobertura; humedad del suelo; quinua.

#### ABSTRACT

The use of cover crops can bring multiple advantages to agricultural production systems and soil properties. The aim of this study was to evaluate the short-term effect of clover (*Medicago hispida* G.) and green peas (*Pisum sativum* L.) as living covers on the soil moisture and yield of quinoa at the localities of Patasucro, Qaqas, and Ccanis in Ayacucho, Peru. We used a randomized complete block design considering clover, pea, and a control without coverage as treatments. Means were compared using Tukey's Test ( $\alpha$  0.05). We observed significant differences in quinoa yield in Qaqas locality, where sites with cover crops exceeded the control by  $0.4 \text{ t ha}^{-1}$  (clover) and  $0.29 \text{ t ha}^{-1}$  (pea). Further, soil moisture was significantly superior under clover in the localities of Qaqas and Patasucro, with values 3.97% and 1.02%, respectively, higher than control. Soil moisture under pea and the control were not statistically different. It is argued that the yield improvements of quinoa occurred due to the conservation of soil moisture caused by the shading effect of the covers

**Keywords:** rainfed system; cover crops; humidity of floor; quinoa.

Recibido: 18-08-2021.

Aceptado: 25-11-2021.



Esta obra está publicada bajo la licencia [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

## INTRODUCCIÓN

El cultivo de la quinua (*Chenopodium quinoa*, Willd) es reconocido como un aliado para la seguridad alimentaria mundial debido a su alto valor nutricional. Perú y Bolivia lideran el 74% de las exportaciones globales, aunque se ha proyectado la pérdida del liderazgo comercial de estos países en los próximos años, ya que la producción de este cereal comenzó a expandirse a otros continentes desde 1990, y no hay indicios de que esta tendencia se detenga (Alandia et al., 2020). Una parte de la quinua en el Perú se produce en la pequeña agricultura de los andes, en condiciones de secano, usando bajos insumos, y con financiamiento limitado (Instituto interamericano de cooperación para la agricultura, 2015). Los productores de quinua en Ayacucho que practican la agricultura familiar se caracterizan por tener parcelas (*Chacras*) que no superan las 5 hectáreas, con un promedio de ¼ de hectárea (Oficina internacional del trabajo, 2015). En la agricultura de secano, la distribución desigual de las lluvias ocasiona periodos de estrés hídrico que afectan el rendimiento de la quinua (Pulvento et al., 2010), especialmente si ocurren durante el llenado de grano (grano lechoso) y la floración (Geerts et al., 2008). Otro ejemplo de las limitaciones de la agricultura de secano se puede encontrar en el trabajo de García et al. (2007), quienes tras analizar los datos climáticos de 4 localidades de la sierra alta del altiplano de Bolivia, señalan que la evapotranspiración del cultivo de referencia es siempre mayor que el aporte de la precipitación, que la corta duración de las lluvias más su distribución errática dificultan el manejo de los cultivos, y que la siembra de la papa y la quinua se atrasa y frecuentemente requiere resiembra debido a los periodos de sequía. En la agricultura de bajos insumos, incluir leguminosas en los sistemas de cultivo puede ser una herramienta de bajo costo que ayude a incrementar los rendimientos y mejore las propiedades del suelo, principalmente por su capacidad de fijar nitrógeno. El aporte de nitrógeno varía según el género de la leguminosa (Dayegamiye et al., 2015) cubriendo una parte del requerimiento de la fertilización nitrogenada (Mahama et al. 2020; Otto et al. 2020), lo que disminuye el uso de fertilizantes sintéticos y la menor incidencia de plagas debido a la diversificación de cultivos (Maitra et al., 2021). Cuando las leguminosas son usadas como abonos verdes o mulch, el mecanismo principal de transferencia de nitrógeno ocurre a través de la descomposición de sus raíces, tallos y hojas, sin embargo, también existe transferencia de nitrógeno de leguminosa a no leguminosa a través de los exudados radiculares, asociaciones

micorrízicas, o cuando existe un contacto estrecho entre las raíces de las plantas (Shao et al., 2020; Thilakarathna et al., 2016). Las coberturas vivas se instalan antes o junto con el cultivo de negocio, y si son perennes pueden mantenerse en campo año tras año sin la necesidad de una resiembra, a diferencia de los cultivos de cobertura anuales (Moore et al., 2019), su implementación tiene efectos sobre el cultivo principal y la fertilidad del suelo, por ejemplo al reducir la emergencia y el desarrollo de malezas (Ciaccia et al., 2017), incrementar el fósforo y el potasio disponible, y aumentar la diversidad de bacterias y su actividad metabólica (Qian et al., 2015). También otorgan servicios ecosistémicos al disminuir la lixiviación de nitrato en el suelo (Ochsner et al., 2010), controlar la erosión hídrica (Nyawade et al., 2019<sup>a</sup>) e incrementar el porcentaje de agregados estables al agua (Romanekas et al., 2018).

Las leguminosas instaladas junto al cultivo principal en los sistemas de secano, proporcionan una mayor cobertura del suelo en comparación al monocultivo, lo que reduce la evaporación del agua y promueve la transpiración, esto se traduce en un incremento de la productividad del agua, y en beneficios económicos para el productor (Nyawade et al., 2019<sup>b</sup>; Gitari et al., 2018; Mao et al., 2012). Sin embargo, las leguminosas como coberturas también pueden reducir los rendimientos si es que el agua se vuelve un factor limitante, como durante una sequía (Duiker & Hartwig, 2004). Existen pocos estudios acerca de los sistemas de cultivo quinua-leguminosas; la revisión bibliográfica de este trabajo solo encontró el estudio de Walters et al. (2016), quienes encontraron que la disponibilidad del agua puede ser más determinante que el efecto de las coberturas en el rendimiento de la quinua. En sus evaluaciones, los tratamientos con riego superaron al sistema de secano, pero no hubo diferencias a nivel de coberturas. Al parecer, el efecto favorable o no de las coberturas que conviven con el cultivo principal en los sistemas de secano depende mucho del patrón de las lluvias.

Dada la importancia del cultivo de quinua para los pequeños agricultores de Ayacucho, existe la necesidad de evaluar si la integración de leguminosas a sus sistemas de producción puede permitirles incrementar sus rendimientos a muy bajo costo.

El objetivo de este estudio fue evaluar en un sistema de agricultura de secano, el efecto a corto plazo del trébol (*Medicago hispida* Gaertn) y la arveja (*Pisum sativum* L.) como coberturas vivas sobre el rendimiento de la quinua y la conservación de la humedad del suelo en tres localidades de Ayacucho.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Ubicación

Los ensayos de campo fueron conducidos en Ayacucho, Perú, cerca de la ciudad de Huanta, en las localidades de Patasucro (coordenadas 12°54'38,43" S; 74°14'5,29" O), Qaqas (coordenadas 12°54'37,44" S; 74°14'17,32" O), y Ccanis

(coordenadas 12°55'1,07" S; 74°14'29,51" O) (Figura 1), desde noviembre del 2017 hasta abril del 2018, entre los 3000 y 3400 msnm. Los campos experimentales estuvieron muy próximos entre sí, y tuvieron características de suelo muy similares (suelos francos arenosos, pH entre 5,53 y 5,97,

materia orgánica entre 1% y 2%, fósforo entre 11 y 17 ppm, y potasio entre 116 y 137 ppm). Por la proximidad de las zonas experimentales, se asumió que todas las localidades recibieron la misma precipitación.

#### Descripción del experimento

El experimento se realizó en las localidades de Patasucro, Ccanis, y Qaqas, utilizando un diseño de bloques completos al azar (DBCA) con tres repeticiones (bloques) y tres tratamientos: trébol y arveja de la variedad INIA 102 Usui como coberturas vivas, más un testigo. En cada localidad se sembró el equivalente a  $12 \text{ kg ha}^{-1}$  de semillas de quinua (variedad roja Pasankalla) en parcelas de  $24 \text{ m}^2$ , las parcelas estuvieron separadas  $1 \text{ m}$  entre sí. El riego ocurrió sólo con agua de las lluvias. Se utilizó guano de islas ( $2,5 \text{ t.ha}^{-1}$ ) y cloruro de potasio ( $0,1 \text{ t.ha}^{-1}$ ) como fuente de nutrientes, ambos aplicados en partes iguales durante el primer y segundo aporque de la quinua. La dosis de fertilización corresponde a lo que los agricultores de la zona acostumbran a utilizar. El trébol y la arveja fueron sembrados al segundo aporque, 55 días después de la siembra (dds) de quinua, a  $450$  y  $75 \text{ kg ha}^{-1}$ , respectivamente. La quinua se sembró a chorro continuo en el camellón, y las coberturas al voleo. Ambas coberturas fueron mantenidas vivas hasta el momento de la evaluación de la humedad del suelo, que fue 4 meses después del segundo aporque. El rendimiento de la quinua se evaluó 20 días antes de evaluar la humedad del suelo.

#### Evaluación del rendimiento

Los granos de la quinua se cosecharon en toda el área de las parcelas. Utilizando una hoz, se hicieron cortes en el tallo de las plantas a una altura de  $30$

cm a partir del suelo. El secado de las panojas se realizó sobre mantas de lona. La trilla se llevó a cabo golpeando las panojas con garrotes y frotándolas contra mantas, luego para separar los granos de las envolturas florales se utilizaron tamices. Se pesaron los granos y el rendimiento se expresó en  $\text{t ha}^{-1}$ .

#### Evaluación de la humedad

En cada parcela experimental se tomaron al azar 5 muestras de suelo a  $20 \text{ cm}$  de profundidad. Las muestras fueron secadas en una estufa por 48 horas a  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  para determinar la humedad gravimétrica. El promedio de los resultados de las 5 muestras se consideró como el valor de humedad del suelo de dicha parcela.

#### Evaluación de los suelos

Con el fin de hacer una comparación general, al finalizar el experimento en cada localidad se tomó una muestra de suelo correspondiente a cada tratamiento a  $20 \text{ cm}$  de profundidad. Se determinó el pH, materia orgánica (M.O), el fósforo y potasio disponible, la CIC, y los cationes cambiabiles.

#### Cálculo de la biomasa y el nitrógeno de las coberturas

La biomasa de las coberturas se evaluó a 110 dds en  $1 \text{ m}^2$  de la parte central de las parcelas, se tomaron 3 repeticiones por parcela y se consideró al promedio como el valor de la biomasa. Las coberturas fueron cortadas utilizando una hoz y puestas a secar a  $72 \text{ }^\circ\text{C}$  en una estufa por 72 horas; la materia seca resultante se empleó para estimar la concentración de nitrógeno empleando el método de Kjeldahl, como indica la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales de México.

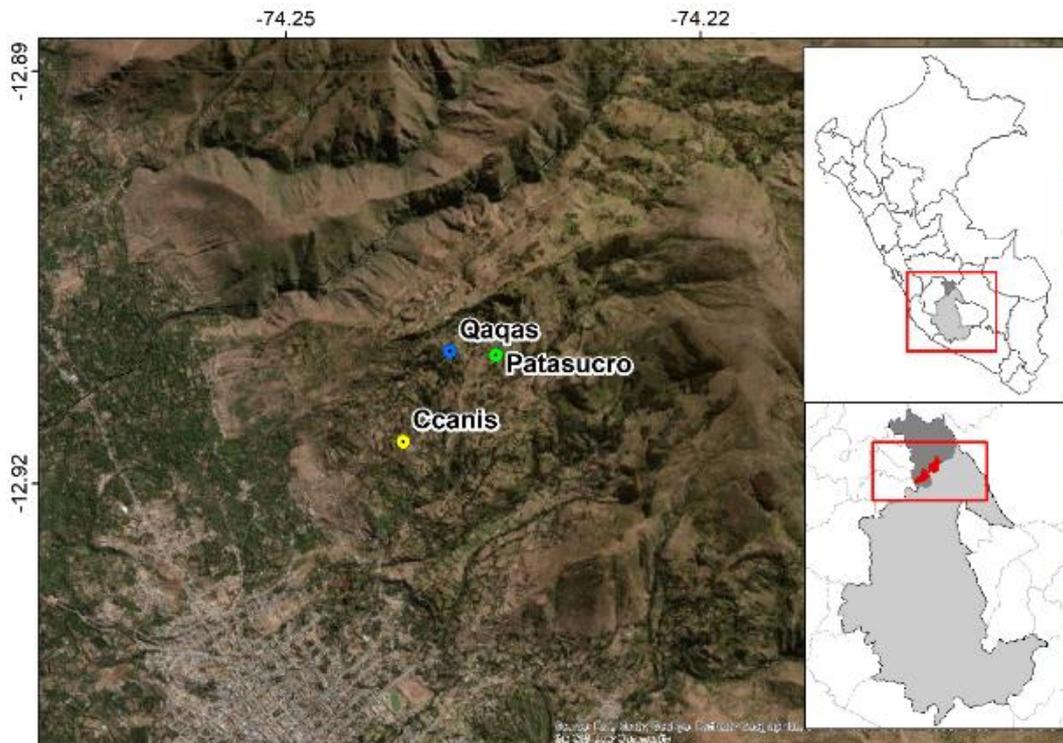


Figura 1. Ubicación de las localidades de Patasucro, Ccanis, y Qaqas.

### Precipitación en la zona de estudio

Debido a la importancia de la lluvia en los sistemas de secano, se utilizó los datos de precipitación registrados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) de la estación La Quinua, en Ayacucho, a 3215 msnm, con coordenadas 13°3'19,7" S; 74°8'29,7" O. La estación La Quinua se halla a 17 km a los campos experimentales. Basándonos en nuestra experiencia y conocimiento de la zona, se eligió esta estación porque se halla en un lugar con

condiciones ambientales muy similares a las de las localidades de Patasucro, Qaqas, y Ccanis.

### Análisis estadístico

Los datos fueron sometidos en cada localidad a un análisis de varianza (ANOVA  $p$ : 0,05) y la comparación de medias se realizó mediante la prueba de Tukey ( $\alpha$ : 0,05) utilizando el software R Studio. Las variables respuesta fueron: rendimiento de la quinua ( $t \cdot ha^{-1}$ ), y humedad gravimétrica del suelo (expresado en %).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Precipitación

Entre noviembre y diciembre del 2017, y desde enero a abril del 2018, se registró una precipitación total del 596,1 mm, con un 68% de las lluvias concentradas entre diciembre, enero y febrero. Las lluvias en noviembre fueron de 48 mm,

aumentaron en diciembre hasta 131,7 mm, y alcanzaron un pico en enero con 157,6 mm, mes a partir del cual comienza la disminución. Los meses de marzo y abril reportaron la menor precipitación de los últimos 3 meses (Figura 2).

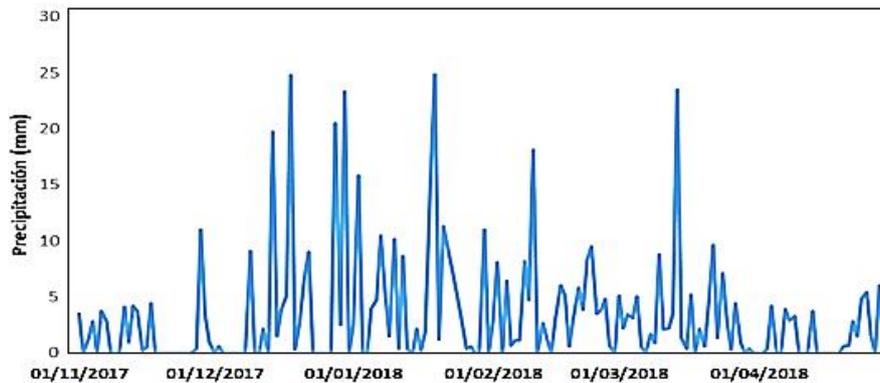


Figura 2. Distribución de la lluvia de noviembre a diciembre del 2017, y de enero a abril del 2018 en Patasucro, Qaqas, y Ccanis (Estación La quinua, SENAMHI, 2021).

### Rendimiento y Humedad

En todas las localidades el uso de coberturas reportó una tendencia al incremento en el rendimiento, aunque con diferencias significativas solo en la localidad de Qaqas ( $p$ -valor 0,01), en donde los tratamientos trébol y arveja superaron al control por una diferencia de 0,4 y 0,29  $t \cdot ha^{-1}$ , respectivamente. Para la humedad del suelo, el tratamiento trébol fue significativamente mayor al control en las localidades de Qaqas ( $p$ -valor <0,01) y Patasucro ( $p$ -valor 0,02), en donde las diferencias en la humedad fueron de 3,97 y 1,02%, respectivamente. El tratamiento arveja y el control no fueron estadísticamente diferentes (Tabla 1).

Dos aspectos pudieron ser la causa de las diferencias no significativas en el rendimiento en Patasucro y Ccanis. Primero, la biomasa del cultivo de cobertura no fue incorporada dentro del suelo o usada como mulch. Para facilitar la transferencia de los nutrientes tomados por las coberturas hacia el cultivo principal, se utilizan podas controladas o se elimina definitivamente la cobertura (Sharma et al. 2010; Bhaskar et al. 2018).

Incorporar o no la cobertura puede traducirse en una diferencia importante en la descomposición de la biomasa y la liberación del nitrógeno, principalmente, porque se expone una mayor superficie de los residuos a disposición de los

microorganismos, y porque se permite el ingreso del aire al suelo, esto explica que después de 12 semanas la materia seca y la concentración de nitrógeno de *Raphanus sativus* L., *Pisum sativum* L., y *Secale cereale* L. fuera mayor cuando estas coberturas se dejaron sobre la superficie del suelo que cuando se incorporaron (Jahanzad et al., 2016).

Tabla 1

Efecto del trébol y la arveja como coberturas vivas sobre el rendimiento de la quinua y la humedad del suelo en tres localidades (3000-3400 msnm) de Ayacucho. Letras diferentes representan diferencias estadísticas significativas según la prueba Tukey de comparación de medias ( $p$ -valor < 0,05)

Localidad	Cobertura	Rendimiento (Mg $ha^{-1}$ )	Humedad gravimétrica (%)
Patasucro	Trébol	1,76 <sup>a</sup>	3,97 <sup>a</sup>
	Arveja	1,67 <sup>a</sup>	3,31 <sup>ab</sup>
	Control	1,43 <sup>a</sup>	2,95 <sup>b</sup>
Qaqas	Trébol	0,98 <sup>a</sup>	8,70 <sup>a</sup>
	Arveja	0,87 <sup>a</sup>	5,69 <sup>b</sup>
	Control	0,58 <sup>b</sup>	4,73 <sup>b</sup>
Ccanis	Trébol	1,37 <sup>a</sup>	2,95 <sup>a</sup>
	Arveja	1,33 <sup>a</sup>	2,93 <sup>a</sup>
	Control	0,99 <sup>a</sup>	2,85 <sup>a</sup>

En el trabajo de Thorsted et al. (2006), se observó que el rendimiento del grano de trigo aumentó solo

cuando la leguminosa de cobertura fue cortada e incorporada, existiendo diferencias según el número de incorporaciones realizadas en distintas épocas del año, además los autores reportaron un incremento significativo de 0,11%-0,39% en la concentración de nitrógeno en el grano, lo que indica que el trigo utilizó directamente el nitrógeno reciclado por la leguminosa. El contenido de nitrógeno del trébol en la biomasa (3,33% en Patasucro, 4,28% en Qaqas, y 4,90% en Ccanis) fue siempre mayor que el de la arveja (2,33% en Patasucro, 3,28% en Qaqas, y 3,9% en Ccanis), de haberse incorporado las coberturas, en promedio el aporte de nitrógeno del trébol hubiera sido de 150 kg.ha<sup>-1</sup>, mientras que el de la arveja solo 56 kg ha<sup>-1</sup>, si se tiene en cuenta la fertilización de 2,5 t.ha<sup>-1</sup> con guano de islas (11% de nitrógeno amoniacal) que realizan los agricultores de la zona, entonces la incorporación del trébol significaría el ahorro del 60% de la fertilización nitrogenada. El menor contenido de nitrógeno foliar del trébol en Patasucro puede atribuirse al pH de suelo más ácido en esta localidad (Tabla 2); el pH de adaptación del trébol esta entre 5,8 y 8 (Ovalle et al., 2001), además a pH 5 la presencia del simbionte *Ensifer medicae* se suprime (Rome et al., 1996) lo que pudo haber afectado el normal proceso de la fijación biológica del nitrógeno (Khosro Mohammadi, 2012)

El segundo aspecto que puede explicar las diferencias no significativas en el rendimiento es la duración del experimento, la mayoría de los experimentos con coberturas tienen un mínimo de dos años de duración; este trabajo se realizó en una sola campaña de 6 meses, difícilmente en un periodo tan corto las propiedades del suelo pueden mejorar hasta convertirse en una ventaja para el cultivo de negocio. Al respecto, Gitari et al. (2019), reportan una mejora en la fertilidad del suelo bajo 3 sistemas de asociación papa-leguminosa con respecto a las condiciones iniciales del suelo después de 2 años de la incorporación de residuos de 4 campañas seguidas, la concentración de fósforo, nitrógeno, y carbono mejoraron un 35%, 26%, y 16%, en ese orden, siendo parte de la explicación de los resultados el reciclaje de nutrientes y el aporte de carbono a través de la biomasa. Asimismo, Qian et al. (2015) encontraron luego de tres años de uso e incorporación de coberturas, con respecto al control, incrementos

significativos en el contenido de carbono del suelo (con diferencias desde 1,3 a 3,5 g kg<sup>-1</sup>, con mayor efecto al usar leguminosas), el nitrógeno total (diferencias desde 0,16 a 0,18 g kg<sup>-1</sup>, con efecto solo en las leguminosas), fósforo (diferencias desde 6,8 a 27,6 mg kg<sup>-1</sup>) y potasio (diferencias desde 94 a 176 mg kg<sup>-1</sup>) disponible. En cambio, Steele et al. (2012) observaron que a pesar de incluir durante 13 años un cereal de cobertura junto al cultivo de maíz en un sistema de rotación de cultivos, no ocurrió un incremento significativo en el contenido de carbono total y lábil del suelo, y que las propiedades físicas como la densidad aparente y la conductividad hidráulica mostraron incrementos y decrementos según la evaluación se haya hecho durante la instalación del maíz o durante la instalación de la cobertura, representando mejoras en comparación al control sin cobertura solo en algunos casos, además, sostienen que no hubo evidencia suficiente para poder afirmar que la implementación de la cobertura pudo resultar en mayores rendimientos del maíz. Los resultados se atañen a sequías que limitaron el aporte de biomasa, a altas concentraciones de carbono originales en el suelo que limitaron un incremento adicional de este elemento, y a las operaciones agrícolas con maquinaria que pudieron afectar a las propiedades físicas; este trabajo demuestra lo difícil que puede ser bajo ciertas condiciones lograr cambiar algunas propiedades del suelo, incluso incorporando biomasa durante muchos años.

Los resultados de los análisis de los suelos en las parcelas experimentales al término del experimento (Tabla 2), ayudan a reforzar la hipótesis de que la instalación de coberturas en este trabajo no influyó sobre las propiedades del suelo. Los resultados de la Tabla 2 señalan que en las 3 localidades las propiedades del suelo de las coberturas y el control fueron bastante similares. Las concentraciones inusualmente altas de fósforo en algunos casos pueden deberse al efecto residual del guano de islas. De forma general, el porcentaje de materia orgánica (M.O) y el potasio disponible estuvieron en concentraciones medias, mientras que la CIC estuvo en un rango de bajo a medio. El pH del suelo en la mayoría de los casos resultó en el rango de muy fuertemente ácido a moderadamente ácido, solo en la localidad de Ccanis, en el tratamiento trébol y el control, se registraron valores ligeramente ácidos.

**Tabla 2**

Propiedades de los suelos en las parcelas experimentales al término del experimento

Localidad	Tratamientos	pH	MO %	P ppm	K ppm	CIC meq 100 <sup>-1</sup> g	Ca <sup>+2</sup> meq 100g <sup>-1</sup>	Mg <sup>+2</sup> meq 100g <sup>-1</sup>	K <sup>+</sup> meq 100g <sup>-1</sup>	Na <sup>+</sup> meq 100g <sup>-1</sup>	Al <sup>+3</sup> +H <sup>+</sup> meq 100g <sup>-1</sup>
Patasucro	Trébol	5,11	1,93	9,7	89	12,32	8,1	0,9	0,17	0,2	0,15
	Alverja	4,90	1,93	16,8	103	11,84	7,49	0,9	0,18	0,21	0,1
	Control	4,73	2	24,3	107	11,68	8,09	0,98	0,21	0,23	0,15
Qaqas	Trébol	5,63	2,97	10	151	16	13,71	1,6	0,34	0,3	0,05
	Alverja	5,58	2,76	9,8	108	16,32	13,3	1,5	0,17	0,28	0,1
	Control	5,41	2,62	20,5	114	16,32	13	1,43	0,21	0,3	0,1
Ccanis	Trébol	6,23	2,26	15	129	17,92	16	1,18	0,25	0,25	0
	Alverja	5,76	2,38	48,3	157	18,88	15,8	1,23	0,31	0,31	0,1
	Control	6,23	2,19	26,8	141	18,08	15,6	1,22	0,29	0,29	0

Sabiendo que la quinua no pudo aprovechar el reciclaje de nutrientes de las coberturas, y descartando alguna importante mejora en las propiedades del suelo, es probable que el efecto significativo en el rendimiento del tratamiento trébol y alverja en la localidad de Qaqas, se explique por el mayor valor de humedad del suelo. De hecho, para todas las localidades parece ser que la tendencia al alza en el rendimiento se relaciona con la conservación de la humedad del suelo en los tratamientos con cobertura (Tabla 1).

Los efectos significativos del trébol en Patasucro y Qaqas sobre la humedad del suelo pueden explicarse por su mayor producción de biomasa (Figura 3), que se tradujo en una mayor cobertura, provocando sombreado y la reducción de la evaporación del agua (Nyawade et al. 2019<sup>b</sup>; Gitari et al., 2018). La biomasa producida por el trébol en Patasucro, Qaqas, y Ccanis fue de 2,87; 3,94; y 3,90 t.ha<sup>-1</sup>, respectivamente; mientras que la biomasa de la arveja fue de 2,37; 1,72; y 1,43 t.ha<sup>-1</sup>, para el mismo orden de localidades (Figura 3). La reducción de la evaporación del agua del suelo por la cobertura de las leguminosas en los sistemas de secano, y como determina esto el rendimiento ha sido estudiado por Nyawade et al. (2019)<sup>b</sup>, quienes indican que la humedad del suelo fue el factor que más influyó en el rendimiento equivalente de la papa. En un escenario de lluvias distribuidas de manera desigual, Gitari et al. (2018) encontraron que establecer leguminosas junto a la papa, ayudó a incrementar el contenido del agua en el suelo, y además la leguminosa *Lablab purpureus* L., por su mayor capacidad de acumular biomasa, redujo considerablemente la evaporación lo que benefició al rendimiento equivalente. Resultados similares han sido encontrados por Fan et al. (2016) en un experimento de policultivos con maíz y papa, donde se argumenta que la disminución de la evaporación significa que queda más agua en el suelo que es transpirada o aprovechada por los cultivos, lo que favorece el rendimiento; este trabajo demuestra que el efecto de las leguminosas como coberturas vivas y conviviendo con el cultivo principal en el aumento de la eficiencia del uso del agua, es parecido a lo que ocurre en los sistemas de policultivos, en donde se utiliza el cociente equivalente de uso del agua, que divide el rendimiento por hectárea producido por mm de agua en un policultivo y en un monocultivo, si el cociente resulta más de 1, significa que se necesita más agua en un monocultivo para producir lo mismo que un policultivo, al respecto, Raza et al. (2021) encontraron que al sumar el cociente equivalente del maíz y la soya durante tres campañas seguidas, este resultó entre 1,33 y 1,49, lo que indicó que el policultivo tuvo una ventaja en el uso del agua en comparación al monocultivo. Además de las coberturas, las lluvias de la temporada pudieron también afectar los resultados obtenidos en este estudio. Es probable que nuestro trabajo hubiera reportado resultados distintos de rendimiento bajo otros patrones de lluvia, por ejemplo, en un año de sequía. En un año seco, las coberturas vivas disminuyeron el rendimiento del algodón; sin embargo, en el año en

que la humedad del suelo no fue limitante, existió una relación directa entre el rendimiento y la biomasa de las coberturas (Bhaskar et al., 2018). La eficiencia del uso del agua en un sistema de cultivos asociados, será diferente según la alta o baja disponibilidad de agua en el suelo (Yin et al., 2020). En un sistema de secano, donde la precipitación fue solo de 48 mm en toda la campaña, la sequía suprimió todos los beneficios que un sistema cereal-leguminosa podría otorgar, siendo el monocultivo el sistema que mostró una ventaja en la producción (Sears et al., 2021). En este trabajo, la precipitación total fue de 596,1 mm, lo que coincide con los requerimientos hídricos para la quinua calculados por otros autores en escenarios similares a la sierra de Ayacucho: En un experimento en la sierra alta del altiplano de Bolivia utilizando un lisímetro de drenaje, García et al. (2003) estimaron los requerimientos hídricos de la quinua en 450 mm, obteniendo un rendimiento de 3,7 t.ha<sup>-1</sup> manteniendo el suelo a capacidad de campo. Igualmente, en dos localidades de la sierra alta del altiplano de Bolivia, Geerts et al. (2008) encontraron rendimientos entre 1,6 y 2,10 t.ha<sup>-1</sup> utilizando entre 423 y 548 mm en tratamientos a quienes se les proporcionó el 100% de la evapotranspiración del cultivo. La precipitación mínima requerida para el cultivo de quinua en el altiplano del Perú se encuentra entre los 300-500 mm (Aguilar & Jacobsen, 2003). Se debe tomar en cuenta que los requerimientos hídricos de la quinua señalados por García et al. (2003); Geerts et al. (2008); y Aguilar & Jacobsen (2003) fueron calculados en un sistema de monocultivo; para nuestro caso será también importante conocer en el futuro el valor combinado de la evapotranspiración de la quinua y su cobertura viva en convivencia durante toda una campaña. Al considerar la distribución de las lluvias en nuestro experimento, resulta que el 68% de estas se concentraron entre diciembre, enero, y febrero (Figura 2), lo que indica una distribución regularmente homogénea que coincidió con la floración y el llenado de grano de la quinua, que son fenologías claves en las que se debe evitar el estrés hídrico para no tener una importante disminución en el rendimiento (Geerts et al., 2008; Malhi et al., 2021; Delgado et al., 2021)

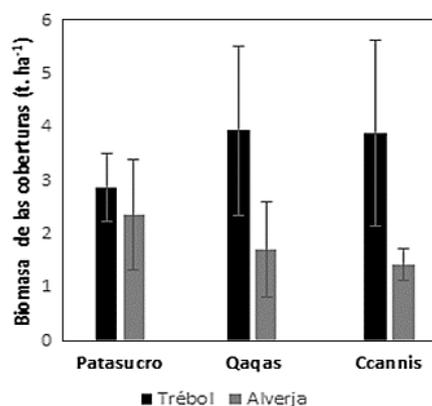


Figura 3. Peso seco de las biomásas de las coberturas (peso medio  $\pm$  desviación estándar) en las localidades de Patasucro, Qaqas, y Ccanis.

Este experimento confirma que existe un potencial de las leguminosas de cobertura como herramientas de bajo costo para contribuir al rendimiento de la quinua en los sistemas de secano de Ayacucho, durante la revisión bibliográfica para la sustentación de este trabajo, no se encontraron experimentos de cultivos asociados o de coberturas vivas que involucren a la quinua y que se hayan realizado en la sierra alta del Perú. En ese sentido, se sugiere que los trabajos venideros se realicen en como mínimo 2 campañas seguidas de quinua, y que consideren la incorporación de las biomásas de las coberturas en el suelo, así se podrá evaluar la mejora gradual de sus propiedades y medir los efectos residuales. Conocer la demanda de agua de la quinua por campaña ayudará a evitar la competencia por este recurso con la cobertura; si bien hay reportes acerca de los requerimientos

hídricos de la quinua en la sierra alta, no se sabe cómo estos van a variar en un sistema con cobertura viva, ya que en este caso existen 2 plantaciones que demandan agua. Además será importante hacer un seguimiento a la fenología de la quinua para analizar la duración de cada etapa del cultivo junto a la distribución semanal o mensual de las lluvias de la temporada, así se podrá identificar si hubo déficit de agua durante alguna etapa fenológica clave para el rendimiento. Algunas otras variables respuesta que pueden agregarse a los experimentos son: humedad de suelo durante toda la campaña y no solo al final de esta, porcentaje de cobertura del suelo, eficiencia de uso del agua, temperatura de suelo, rendimiento equivalente y relación costo beneficio para el productor (Ngoune Liliane et al., 2020; And et al., 2015).

### CONCLUSIONES

Aunque no hubo diferencias significativas en todos los casos, de manera general, el uso de las coberturas demostró efectos positivos a corto plazo para la conservación de la humedad del suelo, producción de biomasa, y la mejora en los rendimientos de la quinua. Sin embargo, parece ser que el éxito de las coberturas en los sistemas de secano es muy dependiente del patrón de lluvias, pudiendo tener efectos negativos para el cultivo

principal si el agua se vuelve un factor limitante. Por tanto, se recomienda siempre conocer los requerimientos hídricos del cultivo principal y evitar la competencia por agua con la cobertura. En los sistemas de secano las lluvias pueden complementarse con riegos, sobre todo en las etapas fenológicas más sensibles al estrés hídrico o cuando se presenta una distribución irregular de las lluvias.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, P. C., & Jacobsen, S. E. (2003). Cultivation of quinoa on the Peruvian altiplano. *Food Reviews International*, 19(1-2), 31-41.
- Alandia, G., Rodriguez, J. P., Jacobsen, S., Bazile, D., & Condori, B. (2020). Global expansion of quinoa and challenges for the Andean region. *Global Food Security*, 26(March), 100429.
- And, F. N., & Watanabe, T. (2015). Influences of rainfall on crop production and suggestions for adaptation. *International Journal of Agricultural Sciences*, 5(1), 2167-2447.
- Bhaskar, V., Bellinder, R. R., DiTommaso, A., & Walter, M. F. (2018). Living mulch performance in a tropical cotton system and impact on yield and weed control. *Agriculture (Switzerland)*, 8(2), 1-17.
- Ciaccia, C., Kristensen, H. L., Campanelli, G., Xie, Y., Testani, E., Leteo, F., & Canali, S. (2017). Living mulch for weed management in organic vegetable cropping systems under Mediterranean and North European conditions. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 32(3), 248-262.
- Dayegamiye, A. N., Whalen, J. K., Tremblay, G., Nyiraneza, J., Grenier, M., Drapeau, A., & Bipfubusa, M. (2015). *The Benefits of Legume Crops on Corn and Wheat Yield, Nitrogen Nutrition, and Soil Properties Improvement*. 1653-1665.
- Delgado, J. A., Barrera Mosquera, V. H., Alwang, J. R., Villacis-Aveiga, A., Cartagena Ayala, Y. E., Neer, D., Monar, C., & Escudero López, L. O. (2021). Potential use of cover crops for soil and water conservation, nutrient management, and climate change adaptation across the tropics. In *Advances in Agronomy* (1st ed., Vol. 165). Elsevier Inc.
- Duiker, S. W., & Hartwig, N. L. (2004). Living mulches of legumes in imidazolinone-resistant corn. *Agronomy Journal*, 96(4), 1021-1028.
- Fan, Z., An, T., Wu, K., Zhou, F., Zi, S., Yang, Y., Xue, G., & Wu, B. (2016). Effects of intercropping of maize and potato on sloping land on the water balance and surface runoff. *Agricultural Water Management*, 166, 9-16.
- García, M., Raes, D., Jacobsen, S. E., & Michel, T. (2007). Agroclimatic constraints for rainfed agriculture in the Bolivian Altiplano. *Journal of Arid Environments*, 71(1), 109-121.
- García, Magalí, Raes, D., & Jacobsen, S. E. (2003). Evapotranspiration analysis and irrigation requirements of quinoa (*Chenopodium quinoa*) in the Bolivian highlands. *Agricultural Water Management*, 60(2), 119-134.
- Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Vacher, J., Mamani, R., Mendoza, J., Huanca, R., Morales, B., Miranda, R., Cusicanqui, J., & Taboada, C. (2008). Introducing deficit irrigation to stabilize yields of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *European Journal of Agronomy*, 28(3), 427-436.
- Gitari, H. I., Gachene, C. K. K., Karanja, N. N., Kamau, S., Nyawade, S., & Schulte-Geldermann, E. (2019). Potato-legume intercropping on a sloping terrain and its effects on soil physico-chemical properties. *Plant and Soil* 438, 447-460.
- Gitari, H. I., Gachene, C. K. K., Karanja, N. N., Kamau, S., Nyawade, S., Sharma, K., & Schulte-Geldermann, E. (2018). Optimizing yield and economic returns of rain-fed potato (*Solanum tuberosum* L.) through water conservation under potato-legume intercropping systems. *Agricultural Water Management*, 208(May), 59-66.
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. (2015). *El Mercado y la Producción de Quinoa en el Perú*. Lima, Perú. 178 pp.
- Jahanzad, E., Barker, A. V., Hashemi, M., Eaton, T., Sadeghpour, A., & Weis, S. A. (2016). Nitrogen release dynamics and decomposition of buried and surface cover crop residues. *Agronomy Journal*, 108(4), 1735-1741.
- Khosro Mohammadi. (2012). Effective factors on biological nitrogen fixation. *African Journal of Agricultural Research*, 7(12), 1782-1788.
- Mahama, G. Y., Prasad, P. V. V., Roozeboom, K. L., Nippert, J. B., & Rice, C. W. (2020). Reduction of nitrogen fertilizer requirements and nitrous oxide emissions using legume cover crops in a No-tillage sorghum production system. *Sustainability (Switzerland)*, 12(11), 1-18.
- Maitra, S., Hossain, A., Brestic, M., Skalicky, M., Ondrisik, P., Gitari, H., Brahmachari, K., Shankar, T., Bhadra, P., Palai, J. B., Jena, J., Bhattacharya, U., Duvvada, S. K., Lalichetti, S., & Sairam, M. (2021). Intercropping—A Low Input Agricultural Strategy for Food and Environmental Security. *Agronomy*, 11(2), 343.
- Malhi, G. S., Kaur, M., & Kaushik, P. (2021). Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review. *Sustainability (Switzerland)*, 13(3), 1-21.
- Mao, L., Zhang, L., Li, W., van der Werf, W., Sun, J., Spiertz, H., & Li,

- L. (2012). Yield advantage and water saving in maize/pea intercrop. *Field Crops Research*, 138, 11–20.
- Moore, K. J., Anex, R. P., Elobeid, A. E., Fei, S., Flora, C. B., Goggi, A. S., Jacobs, K. L., Jha, P., Kaleita, A. L., Karlen, D. L., Laird, D. A., Lenssen, A. W., Lübberstedt, T., McDaniel, M. D., Raman, D. R., & Weyers, S. L. (2019). Regenerating agricultural landscapes with perennial groundcover for intensive crop production. *Agronomy*, 9(8).
- Ngoune Liliane, T., & Shelton Charles, M. (2020). Factors Affecting Yield of Crops. *Agronomy - Climate Change and Food Security*, 1–16.
- Nyawade, S. O., Gachene, C. K. K., Karanja, N. N., Gitari, H. I., Schulte-Geldermann, E., & Parker, M. L. (2019)<sup>a</sup>. Controlling soil erosion in smallholder potato farming systems using legume intercrops. *Geoderma Regional*, 17(2019), e00225.
- Nyawade, S. O., Karanja, N. N., Gachene, C. K. K., Gitari, H. I., Schulte-Geldermann, E., & Parker, M. L. (2019)<sup>b</sup>. Intercropping Optimizes Soil Temperature and Increases Crop Water Productivity and Radiation Use Efficiency of Rainfed Potato. *American Journal of Potato Research*, 96(5), 457–471.
- Ochsner, T. E., Albrecht, K. A., Schumacher, T. W., Baker, J. M., & Berkevich, R. J. (2010). Water balance and nitrate leaching under corn in kura clover living mulch. *Agronomy Journal*, 102(4), 1169–1178.
- Oficina Internacional del Trabajo. (2015). Análisis de la cadena de valor en el sector de la quinua en Perú: aprovechando las ganancias de un mercado creciente a favor de los pobres. Ginebra, Suiza. 82 pp.
- Otto, R., Pereira, G. L., Tenelli, S., Carvalho, J. L. N., Lavres, J., de Castro, S. A. Q., Lisboa, I. P., & Sermarini, R. A. (2020). Planting legume cover crop as a strategy to replace synthetic N fertilizer applied for sugarcane production. *Industrial Crops and Products*, 156(June), 112853.
- Ovalle, C., del Pozo, A., Avendaño, J., Aravena, T., & Elena, M. (2001). Cauquenes-INIA, Nuevo cultivar de Hualputra Chilena (*Medicago polymorpha*) Para Áreas de Secano Mediterráneo. *Agricultura Técnica (Chile)*, 61(1), 89–92.
- Pulvento, C., Riccardi, M., Lavini, A., D'Andria, R., Iafelice, G., & Marconi, E. (2010). Field Trial Evaluation of Two *Chenopodium quinoa* Genotypes Grown Under Rain-Fed Conditions in a Typical Mediterranean Environment in South Italy. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 196(6), 407–411.
- Qian, X., Gu, J., Pan, H. J., Zhang, K. Y., Sun, W., Wang, X. J., & Gao, H. (2015). Effects of living mulches on the soil nutrient contents, enzyme activities, and bacterial community diversities of apple orchard soils. *European Journal of Soil Biology*, 70, 23–30.
- RStudio Team. (2020). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>
- Raza, M. A., Gul, H., Wang, J., Yasin, H. S., Qin, R., Bin Khalid, M. H., Naeem, M., Feng, L. Y., Iqbal, N., Gitari, H., Ahmad, S., Battaglia, M., Ansar, M., Yang, F., & Yang, W. (2021). Land productivity and water use efficiency of maize-soybean strip intercropping systems in semi-arid areas: A case study in Punjab Province, Pakistan. *J. Cleaner Prod.*, 308, 127282.
- Romaneckas, K., Adamavičiene, A., Šaraukis, E., Kriaučiuniene, Z., Marks, M., & Vaitauskiene, K. (2018). Impact of living mulches on the physical properties of Planosol in monocropped maize cultivation. *International Agrophysics*, 32(2), 165–173.
- Rome, S., Fernandez, M. P., Brunel, B., Normand, P., & Cleyet-Marel, J. C. (1996). *Sinorhizobium medicae* sp. nov., isolated from annual *Medicago* spp. *International Journal of Systematic Bacteriology*, 46(4), 972–980.
- Sears, R. R., Shah, A. N., Lehmann, L. M., & Ghaley, B. B. (2021). Comparison of resilience of different plant teams to drought and temperature extremes in Denmark in sole and intercropping systems. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science*, 71(7), 645–655.
- Shao, Z., Wang, X., Gao, Q., Zhang, H., Yu, H., Wang, Y., Zhang, J., Nasar, J., & Gao, Y. (2020). Root contact between maize and alfalfa facilitates nitrogen transfer and uptake using techniques of foliar 15N-labeling. *Agronomy*, 10(3), 1–18.
- Sharma, A. R., Singh, R., Dhyani, S. K., & Dube, R. K. (2010). Moisture conservation and nitrogen recycling through legume mulching in rainfed maize (*Zea mays*)-wheat (*Triticum aestivum*) cropping system. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 87(2), 187–197.
- Steele, M. K., Coale, F. J., & Hill, R. L. (2012). Winter Annual Cover Crop Impacts on No-Till Soil Physical Properties and Organic Matter. *Soil Science Society of America J.*, 76(6), 2164–2173.
- Thilakarathna, M. S., McElroy, M. S., Chapagain, T., Papadopoulos, Y. A., & Raizada, M. N. (2016). Belowground nitrogen transfer from legumes to non-legumes under managed herbaceous cropping systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(4).
- Thorsted, M. D., Olesen, J. E., & Weiner, J. (2006). Mechanical control of clover improves nitrogen supply and growth of wheat in winter wheat/white clover intercropping. *European Journal of Agronomy*, 24(2), 149–155.
- Walters, H., Carpenter-Boggs, L., Desta, K., Yan, L., Matanguihan, J., & Murphy, K. (2016). Effect of irrigation, intercrop, and cultivar on agronomic and nutritional characteristics of quinoa. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 40(8), 783–803.