


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

Enmiendas orgánicas y su efecto en las propiedades de suelos alto andinos cultivados con papa nativa (*Solanum goniocalyx* Juz.et Buk.)

Organic amendments and their effect on the properties of high Andean soils cultivated with native potato (*Solanum goniocalyx* Juz.et Buk.)

Katia Mendoza-Dávalos^{1,2}; Samuel Sanabria-Quispe^{1,2}; Wendy Pérez-Porras¹;
Roberto Cosme-DeLaCruz^{1,2,*}

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

² Programa Presupuestal PP0089 "Reducción de la Degradación de los Suelos Agrarios" del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), Av. La Molina 1981, Lima, Lima 15024, Perú.

ORCID de los autores

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

W. Pérez Porras: <https://orcid.org/0000-0002-0755-0502>

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

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

RESUMEN

Las papas nativas tienen creciente aceptación en el mercado nacional e internacional; sin embargo, ante un bajo rendimiento es común la utilización de agroquímicos, lo que acarrea contaminación ambiental, riesgos para la salud e incremento de los costos de producción; ante ello, el uso de enmiendas orgánicas constituye una relevante alternativa. El estudio se realizó en el distrito de Uchuraccay (Ayacucho, Perú), en tres pisos altitudinales: zona alta (4150 msnm.), media (4050 msnm.) y baja (4002 msnm.). Tres enmiendas orgánicas fueron aplicadas (guano de islas, compost y estiércol de ovino) utilizando dos variedades de papa nativa (Amarilla Tumbay y Peruanita). Se encontró que las enmiendas orgánicas incrementaron la humedad gravimétrica, en un 42%, 67% y 55%, en las zonas alta, media y baja, respectivamente; las poblaciones de bacterias, hongos y actinomicetos aumentaron en un 14%, 11% y 10%, respectivamente. Además, la capacidad de intercambio catiónico (CIC), se elevó en un 88%, 100% y 60%, en las zonas alta, media y baja, respectivamente. Estos alcances resaltan la importancia de realizar mayores estudios, en el efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas, para la mejora de la fertilidad de los suelos en zonas andinas.

Palabras clave: compost; guano de islas; estiércol de ovino; Amarilla Tumbay; Peruanita.

ABSTRACT

Native potatoes have rising acceptance in the national and international market. However, the use of agrochemicals is common due to a low yield, which entails environmental contamination, health risks and an increase in production costs. In response, the use of organic amendments is a relevant alternative. This study was carried out in the district of Uchuraccay (Ayacucho, Peru), in three different altitudes: high (4150 masl.), medium (4050 masl.) and low (4002 masl.). We applied three organic amendments (guano islands, compost and sheep manure) in two varieties of native potato (Amarilla Tumbay and Peruanita). The organic amendments increased the gravimetric humidity, up to 76%, 205% and 149%, in the high, medium and low sites, respectively; likewise, the populations of bacteria, fungi and actinomycetes reported an increase, up to 14%, 12% and 10 %, respectively. Further, the amendments increased the cation exchange capacity (CEC), up to 88%, 100% and 60%, in the high, medium and low sites, respectively. These scopes realize the importance of further studies on the effect of applying organic amendments to improve soil fertility in the Andean highlands.

Keywords: compost; guano islands; sheep manure; Amarilla Tumbay; Peruanita.

1. Introducción

La papa es uno de los cultivos alimenticios más importantes del mundo, después del trigo y arroz, por su aporte en calorías, alta producción y fácil manejo (MINAM, 2019). Es un cultivo valioso para el Perú, puesto que la siembra nacional de agosto 2019 a julio 2020 representó 338857,88 ha y un rendimiento de 16,47 t ha⁻¹, lo cual involucró a 711313 productores (MIDAGRI, 2021a).

El cultivo se habría originado en los alrededores del lago Titicaca, y se destacan algunas regiones de los andes peruanos, como Ayacucho, que poseen una importante diversidad genética conservada por los agricultores, siendo este cultivo un componente estratégico de la agrobiodiversidad andina (MINAM, 2019; Spooner et al. 2005; Hawkes, 1990). Särkinen et al. (2015), presentaron una lista de 276 especies para el Perú, de las cuales 253 son nativas, mientras que 23 son introducidas o cultivadas.

En la actualidad, las papas nativas tienen buena aceptación en mercados nacionales e internacionales, por su sabor, color, textura y calidad culinaria (Arcos, 2017). *S. goniocalyx* presenta una diversidad de variedades nativas entre las que se encuentran Amarilla Tumbay y Peruanita, variedades comerciales de característico color amarillo, pero con susceptibilidad a la Mancha y las heladas (CIP, 2006).

La diversidad del cultivo se está perdiendo debido a la presencia de variedades mejoradas, el uso excesivo de agroquímicos y el cambio climático (Gamboa & Rojas, 2018). Las variedades nativas presentan rendimientos bajos por el ataque de enfermedades, plagas y rotaciones intensivas en parcelas pequeñas y de baja fertilidad del suelo, entre otros factores. Ante ello, los agricultores hacen uso de fertilizantes y pesticidas químicos, con la consecuente contaminación, riesgo de toxicidad para la salud humana e incremento de los costos de producción (Arcos, 2017). Esto afecta principalmente a la agricultura familiar, la cual comprende la inmensa mayoría de las unidades productivas agropecuarias existentes en el Perú (Maletta, 2017).

Por otra parte, las enmiendas orgánicas son productos procedentes de materiales carbonados de origen vegetal o animal, a las que se les atribuye mantener o aumentar el contenido de materia orgánica y mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas, logrando tener un uso sustituto o complementario a los fertilizantes (Durán & Henríquez, 2010; Delgado-Londoño, 2017). Entre sus beneficios se encuentran la formación de agregados y la mejora de estabilidad

estructural, donde la unión a las arcillas y el formar parte del complejo de cambio, incrementaría la reserva de nutrientes y su capacidad tampón; además de propiciar los procesos de mineralización (Julca-Otiniano et al., 2006). Al mismo tiempo, para su producción se utilizan materiales de desecho que de otra manera se convertirían en un peligro ambiental, generando un valor agregado para estos residuos (Medina et al., 2015).

Entre los tipos de enmiendas orgánicas, el compost y estiércol pueden aumentar la concentración de materia orgánica estable y lábil del suelo, la concentración de nitrógeno, CEC, retención de agua y agregación del suelo; reducirían la densidad aparente, así como, mejorarían la actividad y diversidad de las poblaciones microbianas. La estimulación de la actividad radicular incrementaría la absorción de nutrientes y con ello la longitud y densidad de raíz en papa (Gallandt et al., 1998; Opena & Porter, 1999). Por su parte, el guano de islas es un recurso natural renovable, producido por las aves guaneras de las islas, islotes y puntas del litoral peruano; por el contenido de materia orgánica, nutrientes esenciales y microorganismos benéficos que aporta al suelo, permitirían obtener buenos rendimientos de los cultivos, siendo de especial interés por su inocuidad, sinergismo con otras enmiendas (p. ej., estiércol) y uso en la producción orgánica (AGRO RURAL, 2018).

En este marco, el objetivo de la investigación se enfocó en determinar el efecto de enmiendas orgánicas, simples y poco costosas, en las propiedades del suelo para la producción agrícola de papa nativa en zonas altoandinas del Perú.

2. Material y métodos

2.1 Zona de Estudio

Los experimentos se instalaron en el distrito de Uchuraccay, provincia de Huanta, región Ayacucho, Perú, en tres pisos altitudinales: "Zona alta" a 4150 msnm (12° 48' 52, 47" S, 74° 06' 58, 95" W), "zona media" a 4050 msnm (12° 48' 51, 15" S, 74° 06' 43, 51" W) y "zona baja" a 4002 msnm (12° 50' 01, 81" S, 74° 06' 41, 81" W).

2.2 Enmiendas orgánicas

Se utilizaron guano de islas, compost y estiércol de ovino. El primero se comercializa por el Programa de Desarrollo Productivo Agrario Rural (AGRO RURAL) como "Guano de las Islas Natural", cuya etiqueta indica las siguientes características nutricionales: 10-14% N, 10-12% P₂O₅ y 2-3% K₂O (Bolo-Valladares et al., 2020); el compost y estiércol de ovino se adquirieron de composteras y criadores de ovino de la localidad.

2.3 Material vegetal

Las semillas de papa nativa (*Solanum goniocalyx* Juz. et Buk.), variedades Amarilla Tumbay y Peruanita, fueron proporcionadas por el Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA).

2.4 Tratamiento agronómico

La densidad de siembra, en base a una hectárea, fue de 2500 kg ha⁻¹ de tubérculos semilla, con una dosis de abonamiento de 250-250-120 de NPK por hectárea. Se usaron 3 formulaciones: Primera 2500 kg ha⁻¹ de guano de islas + 100 kg de cloruro de potasio (KCl); segunda 4500 kg ha⁻¹ de compost + 100 kg de KCl; tercera 9000 kg ha⁻¹ de estiércol de ovino + 100 kg de KCl. La aplicación de la dosis de abonamiento se realizó en dos partes iguales, a la siembra y al aporque.

Los tratamientos resultaron de la combinación de dos variedades de papa nativa (Amarilla Tumbay y Peruanita) y la aplicación de tres enmiendas orgánicas: guano de islas (T1), compost (T2) y estiércol de ovino (T3).

2.5 Evaluaciones edafológicas

Para fines del experimento se evaluaron las siguientes propiedades del suelo: humedad gravimétrica, pH, poblaciones de bacterias, actinomicetos y hongos. Así también, pre y post aplicación de los tratamientos, se realizaron análisis de clase textural, reacción del suelo, conductividad eléctrica, materia orgánica, fósforo disponible, potasio disponible, CIC y porcentaje de saturación de bases. Para estos análisis, las muestras se enviaron al Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes (LASPAF) de la Facultad de Agronomía, Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), Lima, Perú.

2.6 Características fisicoquímicas iniciales del suelo

Antes de la instalación del experimento, se tomaron al azar submuestras de la capa arable del suelo, con las cuales se formó una muestra compuesta. Los resultados del análisis fisicoquímicos indicaron que era un suelo de textura franco arenoso arcilloso, con pH muy ácido (5,23), no salino (C.E. de 0,13 dS.m⁻¹), materia orgánica muy alta (10,3%), fósforo disponible en nivel medio (13 ppm), potasio disponible en nivel bajo (123,5 ppm) y CIC baja (13,8 meq.100 g⁻¹ de suelo) (Andrades & Martínez, 2014; Garrido, 1993).

2.7 Análisis estadístico

Se empleó el Diseño de Bloques Completamente al Azar (DBCA) con tres tratamientos y un testigo; tres bloques con tres repeticiones por tratamiento,

en tres pisos altitudinales distintos (zonas), haciendo un total de 36 unidades experimentales; cada una de estas unidades estuvo constituida por parcelas de cuatro surcos de 4 m de ancho y 6 m de largo y una separación entre surcos de 1 m, siendo el área de la unidad experimental 24 m². Los resultados obtenidos fueron sometidos a un análisis combinatorio, donde se realizó un Análisis de Varianza Simple para cada zona (ambiente), y para la comparación de medias se utilizó la prueba de Duncan. Se evaluó la normalidad con el Test de Shapiro-Wilk y la homogeneidad de varianza con el Test de Levene, ambas con un nivel de significancia del 5%. Luego de comprobar la homogeneidad de varianza entre las zonas se procedió a realizar el análisis combinatorio, el análisis de estabilidad AMMI (Análisis de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa). Los datos obtenidos fueron procesados mediante el paquete estadístico R (R Core Team, 2018).

3. Resultados y discusión

3.1 Humedad gravimétrica

Con la aplicación de enmiendas orgánicas, la humedad gravimétrica aumentó hasta en un 42%, 67% y 55% en las zonas alta, media y baja, respectivamente. Se detectaron diferencias significativas entre tratamientos y entre zonas; y, significancia en la interacción entre tratamientos y zonas, indicando una influencia de los diferentes pisos altitudinales en los tratamientos aplicados. En la zona baja, el compost generó un incremento significativo de la humedad gravimétrica en comparación con el estiércol y guano (Tabla 1 y 2).

La disminución del contenido de humedad del suelo repercute en la cantidad de agua disponible para la planta para realización de sus funciones metabólicas, así también, las relaciones entre la retención de humedad, la estructura del suelo y estabilidad de agregados modifica las propiedades hidráulicas del suelo (Ojeda et al., 2004; Rodríguez-Martínez, 2016).

En este estudio se observó que la aplicación de las tres enmiendas aumentó significativamente la humedad gravimétrica. Esta mayor retención de humedad estaría relacionada con la porosidad y granulometría de la enmienda, otorgando mejoras estructurales al suelo; al respecto, Whalen et al. (2003) hallaron que aplicaciones de compost incrementaron la agregación en los suelos que evaluaron, y Aoyama et al. (1999) señalaron que con la aplicación de estiércol se obtenía un mayor número de agregados estables en agua en comparación con otros tipos de fertilizantes.

Tabla 1

Evaluaciones fisicoquímicas y biológicas de los suelos según tratamiento y zona de evaluación

Zona*	Trat.	HG** %	pH	Ln (UFC. g ⁻¹ suelo seco)		
				Bacterias	Hongos	Actinomicetos
Alta	T1	18,74 ± 0,59 a	4,77 ± 0,14 b	16,24 ± 0,23 a	11,90 ± 0,24 a	14,72 ± 0,20 ab
	T2	19,90 ± 0,22 a	4,90 ± 0,08 a	15,44 ± 0,68 ab	12,20 ± 0,13 a	14,72 ± 0,82 ab
	T3	19,79 ± 0,51 a	4,98 ± 0,12 a	15,73 ± 0,30 ab	11,50 ± 0,15 b	14,87 ± 0,21 a
	Testigo	11,28 ± 0,74 b	4,98 ± 0,20 a	15,04 ± 0,30 b	11,45 ± 0,16 b	13,79 ± 0,31 b
CV %		3,38	1,02	2,99	1,68	3,51
Media	T1	35,54 ± 0,98 a	4,64 ± 0,08 b	15,82 ± 0,18 b	11,99 ± 0,25 a	14,10 ± 0,23 b
	T2	35,94 ± 0,74 a	4,68 ± 0,27 ab	15,26 ± 0,74 bc	11,31 ± 0,37 ab	14,64 ± 0,18 a
	T3	35,87 ± 0,42 a	4,56 ± 0,06 b	16,96 ± 0,30 a	10,73 ± 0,56 b	14,91 ± 0,14 a
	Testigo	11,77 ± 0,38 b	4,85 ± 0,10 a	14,86 ± 0,13 c	10,73 ± 0,11 b	13,59 ± 0,06 c
CV %		2,51	2,06	2,42	3,39	1,21
Baja	T1	23,18 ± 0,29 c	4,26 ± 0,08 b	15,14 ± 0,78 ab	12,08 ± 0,40 a	15,07 ± 0,12 a
	T2	28,51 ± 0,42 a	4,04 ± 0,06 d	16,40 ± 0,27 a	12,58 ± 0,30 a	15,42 ± 0,08 a
	T3	25,50 ± 0,43 b	4,14 ± 0,06 c	14,90 ± 0,82 b	12,28 ± 0,07 a	14,35 ± 0,30 b
	Testigo	11,46 ± 0,38 d	4,52 ± 0,02 a	14,49 ± 0,21 b	11,19 ± 0,35 b	14,28 ± 0,39 b
CV %		1,65	1,05	4,35	2,78	1,42

Medias de los tratamientos (± desviación estándar) dentro de la misma columna seguidos de la misma letra no son significativamente diferentes ($p < 0,05$), para la prueba de Duncan. *Zona: Alta: 4150 msnm, media: 4050 msnm, baja: 4002 msnm. **HG: Humedad gravimétrica.

Tabla 2

Resumen del análisis de varianza combinado para las evaluaciones edafológicas

	GL	CM				
		HG	pH	Bacterias	Hongos	Actinomicetos
Zona	2	465,96***	1,38397***	0,80214*	2,21556***	0,66472*
Bloque (Zona)	6	0,17	0,04867***	0,12038	0,04219	0,07091
Tratamiento	3	547,77***	0,12087***	2,1737**	1,669***	1,83828***
Zona: Tratamiento	6	51,35***	0,04114***	1,56386**	0,43231**	0,42555*
Residuo	18	0,35	0,00459	0,26728	0,09849	0,11129

Para el análisis de varianza los niveles de significación son: no significativo (.), significativo (* $p < 0,05$), altamente significativo (** $p < 0,01$) y muy significativo (***) $p < 0,001$.

3.2 Acidez del suelo (pH)

La interacción significativa entre zona y tratamiento indica que estos últimos no se comportaron igual en todas las zonas, por lo cual se realiza la interpretación por cada una. Con la aplicación de los tratamientos, el pH disminuyó de forma significativa con el guano para la zona alta; con guano y estiércol en la zona media; y con la aplicación de todas las enmiendas en la zona baja. El tratamiento más estable en comportamiento entre las zonas fue el guano (Tabla 1 y 2). La reducción observada en el pH luego de la aplicación de las enmiendas podría deberse a procesos de descomposición, que puede conducir a la producción de ácidos orgánicos, por contener formas de nitrógeno no reducidas; así también, a largo plazo su mineralización y oxidación produce iones de H⁺ y acidez. Los efectos de la reducción de pH, y con ello de la composición química del suelo, con la aplicación de guano de islas han sido mencionados anteriormente por Wait et al. (2005). El pH actúa sobre la disponibilidad o fijación de nutrientes, además, para su óptimo desarrollo, el cultivo de papa requiere un pH entre 5 y 7 en el suelo (MIDAGRI, 2021b). Sin embargo, los valores de pH antes de la aplicación de los

tratamientos fueron menores a 5 en todas las zonas evaluadas, dando cuenta de su naturaleza ácida; por ello, la incorporación de enmiendas orgánicas es una útil estrategia para el control de la acidez a corto plazo, dado que, la materia orgánica se comporta como un tampón a través de la protonación reversible de ácidos orgánicos, además de reducir la concentración de aluminio en el suelo por procesos de adsorción (Naramabuye & Haynes, 2006; Janick, 2007). Para el largo plazo y a fin de reducir su efecto acidificante, una aplicación de enmienda caliza sería el complemento ideal para el tratamiento del suelo (Mejía, 1941).

3.3 Poblaciones de microorganismos

3.3.1 Bacterias

El análisis de varianza combinado mostró diferencias significativas en la interacción de los tratamientos y las zonas. Ante esto, se hizo la comparación por zonas, obteniéndose en la zona media, incrementos significativos sobre el testigo, de los tratamientos con estiércol y guano, en un 14% y 6%, respectivamente (Tabla 1 y 2). Estas poblaciones fueron 16,96 y 15,82 Ln (UFC g⁻¹), las que equivalen a poblaciones de $2,4 \times 10^7$ y $7,5 \times$

10^6 UFC.g⁻¹ de suelo, mayores a las halladas por Paco-Pérez et al. (2019), para el cultivo de quinua en el Altiplano Sur Boliviano ante la aplicación de estiércol de camélido ($1,44 - 1,43 \times 10^6$ UFC.g⁻¹ de suelo). Francioli et al. (2016) hallaron mayor diversidad bacteriana e incrementos en estimadores de riqueza, en aquellos suelos fertilizados con estiércol de corral comparados con suelos que recibieron fertilización mineral. Los compostos fácilmente degradables contenidos en las enmiendas orgánicas, lo cual estimularía la actividad microbiana presente e incorporaría otros microorganismos (Perucci, 1992). Las bacterias se presentan con mayor población en comparación con los actinomicetos y hongos, lo cual puede ser debido a su rápido crecimiento y habilidad de utilizar un amplio rango de sustratos como fuente de nutrientes (Paco-Pérez-Guzmán-Vega, 2019).

Cabe resaltar que, en la rizósfera de papa en zonas andinas peruanas, tales como Puno y Huancavelica, se ha encontrado la presencia significativa de *Bacillus* spp., especies formadoras de esporas y buen crecimiento, a temperaturas bajas y pH ácidos; y mostrando una efectiva sinergia con el cultivo de papa, mediante la producción de metabolitos secundarios (Calvo et al., 2010); por lo que este género debería recibir mayores estudios en zonas altoandinas.

3.3.2 Hongos

La población de hongos en las zonas alta, media y baja, nos indica que después de la aplicación de los tratamientos hay un aumento significativo de hasta un 11%. En el análisis de varianza combinado se observó significancia de la interacción entre zona y tratamiento, por lo cual se realiza un análisis por cada zona. En la zona alta se observan incrementos significativos ante la aplicación de compost y guano, en la zona media con la aplicación de guano y en la zona baja con la aplicación de todas las enmiendas (Tabla 1 y 2). El mayor recuento en población de hongos ($12,58 \text{ Ln (UFC g}^{-1}\text{)}$), se dio en la zona baja ante la aplicación de compost, siendo un 11% mayor respecto al testigo, esto equivale a una población de $3,0 \times 10^5$ UFC g⁻¹ de suelo, mayor a la reportada para el cultivo de quinua en el Altiplano Sur Boliviano con estiércol de camélido ($1,07-1,06 \times 10^4$ UFC g⁻¹ de suelo) (Paco-Pérez et al., 2019). Ciertos géneros de hongos son comunes en ambientes ácidos, no porque un pH bajo sea óptimo, sino derivado de la ausencia de la competencia microbiana por las reservas de carbono orgánico y la tolerancia natural a la

elevada concentración de H⁺, en comparación con las poblaciones de bacterias y actinomicetos. Sin embargo, esta población podría incluir hongos fitopatógenos, que se originan en el suelo, y son más virulentos en una condición ambiental ácida, que en una neutra o alcalina (Sánchez-Yáñez et al., 2007).

3.3.3 Actinomicetos

Se observó significancia de la interacción entre zona y tratamiento (ANVA), realizándose luego un análisis por cada zona. En la zona media se observan incrementos significativos ante la aplicación de estiércol y compost; y en la zona baja con la aplicación de compost y guano (Tabla 1 y 2). El mayor recuento en población de actinomicetos se dio en la zona baja ante la aplicación de compost ($15,42 \text{ Ln (UFC g}^{-1}\text{)}$), siendo un 8% mayor respecto al testigo, equivalente a una población de $5,0 \times 10^6$ UFC/g de suelo, la cual es mayor a la hallada por Paco-Pérez et al. (2019) para el cultivo de quinua en el Altiplano Sur Boliviano con estiércol de camélido ($1,23 - 1,20 \times 10^5$ UFC/g de suelo).

El estudio de Francioli et al. (2016) señala la abundancia de géneros del phylum Actinobacteria seguido de Proteobacteria en muestras de suelo. Los actinomicetos son saprofitos, por lo que serían incorporados a través de las enmiendas orgánicas, y su presencia se incrementaría al asociarse con un cultivo (Crawford et al., 1993). Sin embargo, su incorporación es variable dependiendo del tipo de enmienda, dado que los materiales con menor cantidad de actinomicetos son frescos o no están compostados totalmente (Pérez & Morales, 2008). En este sentido, se esperaría una mayor población a través de las enmiendas más estables (Arslan et al., 2008); esto lo refiere Pérez et al. (2008), que encontró poblaciones de actinomicetos 3,8 veces mayor en compost, respecto a la hallada en estiércol de ovino. Es de resaltar que los actinomicetos prefieren valores de pH cercanos al neutro; sin embargo, la presencia en regiones andinas peruanas de pH ácido indicaría adaptación a estas condiciones y una relación con el cultivo a nivel de rizósfera; es decir, estos microorganismos podrían beneficiarse a través de un sinergismo con el cultivo, y a su vez promover el crecimiento vegetal (Calvo et al. 2008; Pérez-Porras, 2012, Camacho & La Torre, 2015).

Por otra parte, el cultivo de papa es afectado por varias enfermedades, causadas por hongos, bacterias, nemátodos y virus (García-Ávila et al., 2018), ante esto, los actinomicetos se caracte-

rizan por producir compuestos bioactivos, capaces de inhibir el desarrollo de microorganismos fitopatógenos (Caro-Castro et al. 2019; Park et al., 2002; Crawford et al., 1993). En tal sentido, actinomicetos presentes en las enmiendas orgánicas, son promisorios para ser utilizados en programas de control biológico ante fitopatógenos fúngicos y bacterianos de papa (Pérez-Rojas et al., 2015).

3.3.4 Las poblaciones microbianas, su relación con otros parámetros edafológicos y las enmiendas orgánicas

El comportamiento general registra una mayor población de bacterias que estuvieron entre 10^6 y 10^7 UFC g^{-1} de suelo, seguido de la de actinomicetos, entre 10^5 y 10^6 UFC g^{-1} de suelo, y la población de hongos que estuvo entre 10^4 y 10^5 UFC g^{-1} de suelo; concorda en parte con lo hallado en rizósfera de papa por Calvo et al. (2008), reportan una población de bacterias totales entre 10^6 y 10^8 UFC g^{-1} de suelo y una población de hongos entre 10^4 y 10^5 UFC g^{-1} de suelo.

Paco-Pérez et al. (2019), señalan que la comunidad microbiana en la rizósfera puede variar según las características propias del suelo y de su contenido de materia orgánica, humedad, pH, temperatura, el tipo de fertilización y el estado de la especie vegetal; en su estudio los tres grupos microbianos incrementaron sus poblaciones a medida que mejoró la temperatura y la humedad en el suelo. Aquí, las poblaciones microbianas tienden a aumentar con el incremento en el porcentaje de humedad gravimétrica (Tabla 1), lo cual también fue registrado por Ramos & Zuñiga et al. (2008), en sus recuentos de microorganismos aerobios mesófilos viables, mohos y levaduras.

El pH se encuentra entre los factores abióticos más relevantes para los microorganismos del suelo, y las modificaciones de éste pueden activar o inactivar las enzimas microbianas. Un pH de 5,6 sería el ideal para la mayoría de los microorganismos benéficos (Calvo et al., 2008). Sin embargo, la presencia de poblaciones microbianas en regiones andinas y de pH más ácidos, indicaría una efectiva adaptación a estas condiciones (Pérez-Porras, 2012; Nishijima et al., 2005; Calvo et al., 2008; Santos & Samudio, 2020).

Los resultados obtenidos en el presente estudio indicaron que las enmiendas orgánicas, provocaron un aumento en las poblaciones de microorganismos, lo cual significaría un incremento en biomasa y actividad microbiana (Ros et al., 2003), así mismo, serían fuente de nutrientes minerales para las plantas en un sistema ecológico equilibrado (Bonanomi et al., 2014).

La actividad biológica del suelo se daría en diferentes niveles dependiendo de la naturaleza de la enmienda, esto estaría ligado a la composición química de la enmienda, dada la alta sensibilidad enzimática a la cantidad de sustrato, productos finales de reacción, cofactores e inhibidores. Al respecto, Albiach et al. (2000) encontraron en su estudio, que la actividad enzimática fue más alta con la aplicación de compost, seguida de la aplicación de estiércol ovino. Por su parte, Hernández et al. (2006), encontraron que el compost producido a partir de estiércol de ovino fue la enmienda más estimulante para las poblaciones de microorganismos y la actividad enzimática, por su contenido de fracciones lábiles. En contraparte, el guano de islas poseería una acción selectiva al concentrar más nutrientes que materia orgánica, favoreciendo la adaptación de la comunidad mesófila (Cárdenas-Moscol et al., 2017).

La importancia del estudio de parámetros biológicos se da por ser indicadores del estrés ecológico y recuperación de un suelo, por tener una influencia directa en la estabilidad y fertilidad de los ecosistemas, brindando información inmediata sobre pequeños cambios en el suelo (Dick & Tabatabai, 1993; Smith & Papendick, 1993).

3.4 Caracterización fisicoquímica de los suelos

Los suelos donde se llevó el experimento son de naturaleza ácida, esto suele ser desfavorable para el desarrollo radicular, además, contienen pocas bases de cambio, poseen escasa actividad microbiana y asimilación del fósforo, el cual precipita dando formas insolubles con manganeso, aluminio y hierro (Andrades & Martínez, 2014).

El fósforo es importante para el cultivo de papa porque promueve la rápida formación de tubérculos, crecimiento de las raíces, mejora la resistencia a bajas temperaturas, incrementa la eficiencia del uso de agua, contribuye a la resistencia a enfermedades y acelera la madurez (Campos, 2014). La baja concentración encontrada en este estudio (Tabla 3), lo convertiría en un elemento crítico durante el periodo inicial de desarrollo de la planta y de tuberización, su deficiencia estaría relacionada a un bajo rendimiento en la cosecha por el retardo en el crecimiento apical y reducción en la formación de almidón en los tubérculos (Oyarzún et al., 2002). Por ello, el enriquecimiento de las enmiendas orgánicas con este nutriente es un aspecto a mejorar como parte del manejo integral de la fertilidad del suelo para la producción de papa en la zona andina.

Tabla 3

Análisis de suelos posterior a la aplicación de las enmiendas en cada zona de evaluación

Zona	Trat.	pH (1:1)	P ppm	K ppm	CIC	Cationes Cambiables					Sat. de bases %
						Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ⁺³ + H ⁺	
						meq/100g					
Alta	Guano	4,77	5,6	282	25,92	13,2	0,83	0,51	0,17	0,10	56,75
	Compost	4,9	5,0	248	25,60	13,5	0,78	0,44	0,19	0,10	58,24
	Estiércol	4,98	5,3	237	25,28	14,6	0,92	0,49	0,17	0,10	64,00
Media	Guano	4,56	2,7	121	26,40	8,77	0,55	0,18	0,17	0,50	36,63
	Compost	4,68	2,6	114	25,92	9,06	0,60	0,17	0,16	0,25	38,54
	Estiércol	4,64	2,8	103	27,68	8,71	0,53	0,14	0,17	0,40	34,50
Baja	Guano	4,04	3,3	105	19,84	1,76	0,30	0,15	0,22	2,00	12,25
	Compost	4,26	3,1	121	19,52	1,97	1,33	0,20	0,21	1,50	19,01
	Estiércol	4,04	3,2	146	22,08	1,66	0,30	0,23	0,22	2,10	10,91

En cambio, la aplicación de enmiendas incrementó el potasio disponible, pasando de un nivel medio a uno alto (Tabla 3). Éste es uno de los nutrientes más extraídos por la papa (Westermann, 2005), es catalizador de muchas reacciones en la fotosíntesis, especialmente en la síntesis de proteínas y de carbohidratos (Sierra et al., 2002). Su adición incrementa el calibre de los tubérculos (Panique et al., 1997); sin embargo, la deficiencia incrementa la actividad de la enzima polifenol oxidasa, resultando en manchas negras en los tubérculos que afectan la calidad para industria (McNabney et al., 1999).

Así también, es de resaltar que la aplicación de enmiendas aumentó la CIC, pasando de un nivel bajo a un nivel medio en todas las zonas; en las alta y media en más de un 80 %, y en la baja en más del 40 % (Tabla 3). Estudios previos de Alegre (1977) señalan que la incorporación de enmiendas como el compost y estiércol, superan a la de abonos verdes, produciendo incrementos en la CIC de hasta 130% del valor inicial.

La CIC de las enmiendas orgánicas estaría asociada con las fracciones orgánicas más estables, por lo cual se esperaría que la CIC producto de la acción del compost persista en el suelo.

Por otro lado, se encontró toxicidad por aluminio en la zona baja, al presentar valores superiores a 2 meq de aluminio intercambiable (Instituto Colombiano Agropecuario, 1992); sus consecuencias serían un retraso en el crecimiento de la raíz y abundancia de raíces laterales cortas, que se tomarían gruesas y frágiles debido a la alta afinidad del aluminio con elementos y grupos funcionales, que constituyen pared celular, membranas y ácidos nucleicos (MacKinnon et al., 2004; Chang et al., 1999, Matsumoto et al., 1976).

A fin de reducir este efecto perjudicial, el uso en enmiendas calizas en conjunto con las orgánicas debe ser tomado en cuenta.

4. Conclusiones

Las interpretaciones de las evaluaciones edafológicas se realizaron por cada piso altitudinal, la interacción significativa se debería a su heterogeneidad intrínseca. Se destaca que la aplicación de enmiendas orgánicas aumentó la humedad gravimétrica, las poblaciones microbianas y la CIC. Si bien la estrategia de aplicación de enmiendas orgánicas permitiría mejoras en las propiedades del suelo, y con ello una optimizada producción de papa nativa en la zona andina, estudios posteriores deberían considerar la evaluación de un mayor número de indicadores de la calidad del suelo, a lo largo de varias campañas agrícolas, a fin de ampliar el análisis del impacto de la aplicación de las enmiendas orgánicas en la dinámica del suelo.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) y al proyecto Pro Suelos y Aguas CUI: 2487112 por el apoyo.

Referencias bibliográficas

- AGRO RURAL (Programa de Desarrollo Productivo Agrario Rural) (2018). Plan Anual de Comercialización 2018 [28 de junio de 2021]. Recuperado de <https://www.agrorural.gob.pe/wp-content/uploads/transparencia/documentos/rde/RDE-124-2018-AG-AGRORURAL-DE.PDF>.
- Albiach, R., Canet, R., Pomares, F., & Ingelmo, F. (2000). Microbial biomass content and enzymatic activities after the application of organic amendments to a horticultural soil. *Bioresource Technology*, 75(1), 43-48.
- Andrades, M., & Martínez, ME. (2014). *Fertilidad del suelo y parámetros que la definen*. Logroño, España. Universidad de La Rioja, Servicio de Publicaciones, 29 pp.
- Aoyama, M., Angers, D. A., & N'Dayegamiye, A. (1999). Particulate and mineral-associated organic matter in water-stable aggregates as affected by mineral fertilizer and manure applications. *Canadian Journal of Soil Science*, 79(2), 295-302.
- Arcos, J. (2017). *Rizobacterias promotoras de crecimiento de plantas para mejorar la productividad en papa*. [Tesis de doctorado]. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú. 166 p.
- Arslan, El., Obek, E., Kirbag, S., Ipek, U., & Topal, M. (2008). Determination of the Effect of Compost on Soil Microorganisms. *International Journal of Science & Technology*, 3(2), 151-159.
- Bolo-Valladares, J.D., Reynoso-Zárate, A., Cosme-De la Cruz, RC. Arone-Gaspar, G., & Calderón-Mendoza, C. (2020). La aplica-

- ción combinada de abonos orgánicos mejora las propiedades físicas del suelo asociado al cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Scientia Agropecuaria*, 11(3), 401-408.
- Bonanomi, G., Capodilupo, M., Incerti, G., Gaglione, S. A., & Scala, F. (2014). Fungal diversity increases soil fungistasis and resistance to microbial invasion by a non resident species. *Biological Control*, 72, 38-45.
- Calvo, P., Reymundo, L., & Zúñiga, D. (2008). Estudio de las poblaciones microbianas de la rizósfera del cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) en zonas altoandinas. *Ecología Aplicada*, 7(1-2), 141-148.
- Calvo, P., & Zúñiga, D. (2010). Caracterización fisiológica de cepas de *Bacillus* spp. aisladas de la rizósfera de papa (*Solanum tuberosum*). *Ecología Aplicada*, 9(1), 31-39.
- Caro-Castro, J., Mateo-Tuesta, C., Cisneros-Moscol, J., Galindo-Cabello, N., & León-Quipe, J. (2019). Aislamiento y selección de actinomicetos rizosféricos con actividad antagonista a fitopatógenos de la papa (*Solanum tuberosum* spp. andigena). *Ecología Aplicada*, 18(2), 101-109.
- Camacho, M., & La Torre, M. I. (2017). Efecto promotor de bacterias ppgr sobre cultivo de papa bajo diferentes sustratos a nivel de invernadero. *The Biologist (Lima)*, 13(1).
- Campos, R. (2014). *Efecto de la fertilización en el rendimiento y características biométricas del cultivo de papa variedad Huayro en la comunidad de Aramachay (Valle del Mantaro)* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú. 88 p.
- Chang, Y., Yamamoto, Y., & Matsumoto, H. (1999). Accumulation of aluminium in the cell wall pectin in culture tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) cells treated with a combination of aluminium and iron. *Plant Cell Environment*, 22, 1009-1017.
- CIP (Centro Internacional de la Papa) (2006). *Catálogo de variedades de papa nativa de Huancavelica-Perú. De la agricultura a la cultura*. Lima, Perú. Metrocolor. 208 p.
- Crawford, D. L., Lynch, J. M., Whipps, J. M., & Ousley, M. A. (1993). Isolation and characterization of actinomycete antagonists of a fungal root pathogen. *Applied and environmental microbiology*, 59(11), 3899-3905.
- Delgado-Londoño, D. (2017). Aplicación de enmiendas orgánicas para la recuperación de propiedades físicas del suelo asociadas a la erosión hídrica. *Lámpsakos*, 1(17), 77-83.
- Dick, W. A., & Tabatabai, M. A. (1993). Significance and potential uses of soil enzymes. En: Blain, F.J., (Ed.), *Soil Microbial Ecology Application in Agricultural and Environmental Management*, Marcel Dekker, Nueva York, EEUU. pp. 95-127.
- Durán-Umaña, L., & Henríquez-Henríquez, C. (2010). El vermicompost: su efecto en algunas propiedades del suelo y la respuesta en planta. *Agronomía Mesoamericana*, 21(1), 85-93.
- Francioli, D., Schulz, E., Lentendu, G., Wubet, T., Buscot, F., & Reitz, T. (2016). Mineral vs. organic amendments: Microbial community structure, activity and abundance of agriculturally relevant microbes are driven by long-term fertilization strategies. *Frontiers in Microbiology*, 7, 1446.
- Gallandt, E., Mallory, E., Alford, AR., Drummond, F., Groden, E., Liebman, M., Marra, M., Mcburnie, J., & Porter, G. A. (1998). Comparison of alternative pest and soil management strategies for Maine potato production systems. *American Journal of Alternative Agriculture*, 13, 146-161.
- Gamboa, Y. K. R., & Rojas, G. P. (2018). Genetic diversity of native potatoes (*Solanum* spp.) from Vilcashuaman district, Ayacucho-Peru, using AFLP. *Revista Peruana de Biología*, 25(3), 259-266.
- García-Ávila, C. J., Valenzuela-Tirado, G. A., Florencio-Anastasio, J. G., Ruiz-Galván, I., Moreno-Velázquez, M., et al. (2018). Organismos asociados a daños en tubérculos de papa en postcosecha. *Revista mexicana de fitopatología*, 36(2), 308-320.
- Garrido, MS. (1993). *Interpretación de análisis de suelos*. Hojas Divulgadoras. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid, España. 40 p.
- Hawkes, J. (1990). The Potato: Evolution, Biodiversity and Genetic Resources. *American Potato Journal*, 67, 733-735.
- Instituto Colombiano Agropecuario (1992). *Fertilización en diversos cultivos*. Quinta aproximación. Manual de asistencia técnica No. 25. Produmedios. Bogotá, Colombia. 64 p.
- Janick, J. (2007). *Plant Breeding Reviews*. ISBN: 978-0-471-99798-6. John Wiley & Sons, Inc. 352 p.
- Julca-Otiniano, A., Meneses-Florián, L., Blas, R., & Bello-Amez, S. (2006). La materia orgánica, importancia y experiencias de su uso en la agricultura organic matter, importance, experiences and it role in agricultura. *Idesia*, 24(1), 49-61.
- Mackinnon, N., Crowell, K., Udit, A., & Macdonald, P. (2004). Aluminum binding to phosphatidylcholine lipid bilayer membranes: 27Al and 31P NMR spectroscopic studies. *Chemistry and Physics of Lipids*, 132, 23-36.
- Maletta, H. (2017). La pequeña agricultura familiar en el Perú. Una tipología microrregionalizada. En *IV Censo Nacional Agropecuario 2012: Investigaciones para la toma de decisiones en políticas públicas*. Libro V. Lima, Perú, FAO.
- Matsumoto, H., Hirasawa, F., Torikai, H., & Takahashi, E. (1976). Localization of absorbed aluminium in pea root and its binding to nucleic acid. *Plant and Cell Physiology*, 17, 127-137.
- McNabney, M., Dean, B. B., Bajema, R. W., & Hyde, G. M. (1999). The effect of potassium deficiency on chemical, biochemical and physical factors commonly associated with blackspot development in potato tubers. *American Journal of Potato Research*, 76, 53-60.
- Medina, V. A., Quipuzco, U. L., & Juscamaita, M. J. (2015). Evaluación de la calidad de biol de segunda generación de estiércol de ovino producido a través de biodigestores. *Anales Científicos*, 76(1), 116-124.
- Mejía, P. N. (1941). Enmiendas Calcáreas. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 4(10), 989-1008.
- MIDAGRI. (2021a). Perfil Productivo y Regional. Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. Recuperado de: https://siea.midagri.gov.pe/portal/siea_bi/index.html.
- MIDAGRI (2021b). Ficha Técnica: Papa [28 de junio de 2021]. Recuperado de: <https://www.minagri.gov.pe/portal/especial-iv-cenagro/25-sector-agrario/papa/207-papa>
- MINAM (Ministerio del Ambiente) (2019). *Línea de base de la diversidad genética de la papa peruana con fines de bioseguridad*. ISBN N.º 978-612-4174-34-6. Lima, Perú. 128 p.
- Naramabuye, F. X., & Haynes, R. J. (2006). Short-term effects of three animal manures on soil pH and Al solubility. *Australian Journal of Soil Research*, 44(5), 515-521.
- Ojeda, G., Perfect E., Le Bissonnais, Y., & Alcañiz, J. M. (2004). Efectos del uso de lodo de depuradora en las propiedades físicas de un suelo franco: erodabilidad, estabilidad de agregados y retención de humedad. Centro de Información de Recursos Naturales CIREN. Chile.
- Nishijima T., Toyota K., & Mochizuki M. (2005). Predominant culturable *Bacillus* species in Japanese Arable soils and their potencial as biocontrol agents. *Microbes and Environment*, 20, 61-68.
- Opena, G. B., & Porter, G. A. (1999). Soil management and supplemental irrigation effects on potato: Root growth. *Agronomy Journal*, 91, 426-431.
- Oyarzún, P., Chamorro, F., Córdova, J., Merino, F., Valverde, F., & Velásquez, J. (2002). Manejo Agronómico. En: Pumisacho, M. y Sherwood, S. Eds. *El Cultivo de la papa en Ecuador*. pp. 51-83. Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) y Centro Internacional de la Papa (CIP). Quito, Ecuador.
- Paco-Pérez, V., & Guzmán-Vega, G.-D. (2019). Effect of organic amendments on the microbial populations of the rhizosphere of quinoa cultivation (*Chenopodium quinoa* Willd.) in the South Altiplano of Bolivia. *J. Selva Andina Biosph.*, 7(1), 32-43.
- Panique, E., Kelling, K. A., Schulte, E. E., Hero, D. E., Stevenson, W. R., & James, R. V. (1997). Potassium rate and source effects on potato yield, quality, and disease interaction. *American Potato Journal*, 74, 379 - 398.
- Park, J. O., El-Tarabily, K. A., Ghisalberti, E. L., & Sivasithamparam, K. (2002). Pathogenesis of *Streptovorticillium albireticuli* on *Caenorhabditis elegans* and its antagonism to soil-borne fungal pathogens. *Letters in Applied Microbiology*, 35(5), 361-365.
- Perucci, P. (1992). Enzyme activity and microbial biomass in a field soil amended with municipal refuse. *Biology and Fertility of Soils*, 14, 54-60.
- Pérez, A., & Morales, J. (2008). Aspectos técnicos en el desarrollo y control del proceso de compostaje. En: Casco, J., Herrero, R. (Ed.), *Compostaje*. Ediciones Mundi-Prensa. 141-164.

- Pérez-Porras, W. (2012). Caracterización y evaluación de actinomicetos aislados de campos de cultivo de maca (*Lepidium meyenii* Walpers) como promotores del crecimiento vegetal (Tesis de pregrado). UNALM, Lima, Perú. 183 p.
- Pérez-Rojas, F., León-Quispe, J., & Galindo-Cabello, N. (2015). Actinomicetos aislados del compost y su actividad antagonista a fitopatógenos de la papa (*Solanum tuberosum* spp. andigena Hawkes). *Revista mexicana de fitopatología*, 33(2), 116-139.
- R Core Team (2018). R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>
- Ramos, E., & Zúñiga, D. (2008). Efecto de la humedad, temperatura y pH del suelo en la actividad microbiana a nivel de laboratorio. *Ecología Aplicada*, 7(1-2), 123-130.
- Rodríguez-Martínez, N., Lucas-Ciriaco, D. J., Noguez-Estrada, J., & Sánchez-Herrera, S. G. (2016). Evaluación del sustrato de olote en la retención de humedad en el suelo para el cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill). *Revista de Ciencias Naturales y Agropecuarias*, 3(7), 25-34.
- Ros, M., Hernandez, M. T., & García, C. (2003). Soil microbial activity after restoration of a semiarid soil by organic amendments. *Soil Biology and Biochemistry*, 35(3), 463-469.
- Sánchez-Yañez, J., Marquez-Benavides, L., Lozano, L., & Fernandez-Pavia, S. (2007). *Los hongos fundamentales en la productividad del suelo*. Monografía. Universidad Microbiana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Mich. México.
- Santos, A., & Samudio, A. (2020). Evaluación del efecto de la inoculación de *Bacillus subtilis* en el pH, aluminio intercambiable y disponibilidad de fósforo en un Ultisol. *Revista Investigaciones Agropecuarias*, 2(2), 15-30.
- Särkinen, T., Baden, M., Gonzáles, P., Cueva, M., Giacomini, L., Spooner, D. M., Reinhard, S., Juárez, H., Nina, P., Molina, J., & Knapp, S. (2015). Listado anotado de *Solanum* L. (Solanaceae) en el Perú. *Revista peruana de biología*, 22(1), 3-62.
- Sierra, B. C., Santos, R. J., & Kalazich, B. J. (2002). *Manual de fertilización del cultivo de la papa en la zona sur de Chile*. Boletín INIA N° 76. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. 104 p.
- Smith, L. J., & Papendick, R. I. (1993). Soil organic matter dynamics and crop residue management. En: Blaine Meeting, F.J., (Ed.), *Soil Microbial Ecology Applications in Agricultural and Environmental Management*, Marcel Dekker, Nueva York, EEUU. pp. 65-94.
- Spooner, D., & Hettterscheid, W. L. (2005). Origins, evolution, and Group classification of cultivated potatoes. Recuperado de: <https://vcru.wisc.edu/spoonerlab/pdf/>
- Wait, D. A., Aubrey, D. P., Anderson, W. B. (2005). Seabird guano influences on desert islands: soil chemistry and herbaceous species richness and productivity. *Journal of Arid Environments*, 60(4), 681-695.
- Westermann, D. T. (2005). Nutritional requirements of potatoes. *American Journal of Potato Research*, 82, 301-307.
- Whalen, J. K., Hu, Q., Liu, A. (2003). Compost Applications Increase Water-Stable Aggregates in Conventional and No-Tillage Systems. *Soil Science Society of America*, 67, 1842-1847.

