

Waste valorization in winery and distillery industry by producing biofertilizers and organic amendments

K. Mendoza^{1,*}, V. Linares², B. Hatta³, Y. Tinoco⁴, J. Alvarado⁵, and A. Di Laura⁶

¹Instituto de la Pequeña Producción Sustentable, Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), Campus Av. La Molina s/n Postal 12056, La Molina, Lima, Perú

²Departamento Académico de Ordenamiento Territorial y Construcción, Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), Campus Av. La Molina s/n Postal 12056, La Molina, Lima, Perú

³Departamento de Tecnología de Alimentos y Productos Agropecuarios, Facultad de Industrias Alimentarias, Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), Campus Av. La Molina s/n Postal 12056, La Molina, Lima, Perú

⁴Fundo El Viejo Pancho, Ocucaje (Ica), Perú

⁵Viña Los Reyes, Lunahuaná (Cañete), Perú

⁶Bodega Don Amadeo, Quilmaná (Cañete), Perú

Resumen. La industria vitivinícola y de destilación de bebidas espirituosas generan una notable cantidad de subproductos y residuos, cuya gestión inadecuada puede generar problemas socioeconómicos y riesgos ambientales debido a algunas características de disponibilidad estacional y elementos contaminantes. Tradicionalmente, las estrategias de valorización se han enfocado en el compostaje, para uso directo como mejorador de suelos en el viñedo. Sin embargo, este proceso requiere un tiempo prolongado y gran disposición de espacio libre (aeróbico), pudiendo causar fitotoxicidad y un efecto antimicrobiano. Una estrategia alternativa de tratamiento de estos residuos orgánicos es la digestión anaeróbica, después de la cual, en un periodo menor a 25 días y en una reducida área de trabajo, se obtienen dos digestatos: un líquido y un sólido, aptos para el uso agrícola en el viñedo. El objetivo del presente estudio fue evaluar la factibilidad de aprovechar las lías de vinificación y las vinazas de destilación para la elaboración de biofertilizantes y enmiendas orgánicas mediante digestión anaeróbica usando consorcios microbianos y estimar su valorización económica a mediana escala para una bodega vitivinícola del valle de Cañete (Perú). Se monitoreó la evolución del proceso de digestión (pH, Conductividad Eléctrica y Temperatura) para finalmente realizar una caracterización fisicoquímica y microbiológica de los digestatos obtenidos. Los resultados muestran que los productos elaborados presentan una significativa concentración de materia orgánica y fitonutrientes (Nitrógeno, Fósforo, Potasio, etc.) en un medio ligeramente ácido (pH entre 3.8 y 5.8), debido a la presencia de algunas especies de bacterias ácido-lácticas y *Bacillus*, lo que podría conferirles propiedades como bioestimulantes y agentes de biocontrol. La estabilidad de los productos (pH, color y olor) fue evaluada durante 30 días más, mostrando excelentes condiciones higiénicas, debido a la ausencia de microorganismos patógenos, posibilitando su incorporación junto a otras enmiendas durante la mitad de la temporada vitícola. Por lo tanto, la valorización de estos subproductos y residuos vitivinícolas en la producción de biofertilizantes y enmiendas orgánicas para uso agrícola, podría suplir en gran parte el uso de fertilización sintética y recuperar la fertilidad del suelo. Los beneficios socio-económicos y ambientales serían múltiples, dentro de un enfoque de transición agroecológica y de economía circular.

Abstract. The winery and distilling spirits industry generate a remarkable amount of by-products and wasted, that are not properly managed, posing socioeconomic problems and environmental risks, due to their seasonal availability and polluting elements. Traditionally, valorization strategies have focused on composting, for direct use as a soil conditioner in the vineyard. However, this process requires a long period and a large free surface (aerobic), and could cause phytotoxicity and an antimicrobial effect. An alternative treatment strategy for these organic wasted is anaerobic digestion, which period less than 25 days and in a reduced work area, two digestates are obtained: liquid and solid, suitable for agricultural use as organic amendments in the vineyard. This work aims at evaluating the feasibility of using winemaking lees and distillation vinasses in the obtaining of biofertilizers and organic amendments by anaerobic digestion using a microbial consortium and estimating their economic valorization on a medium scale for a winery in the Cañete Valley (Peru). The evolution of the digestion process (pH, Electrical Conductivity and Temperature) was monitored, and then to characterize the digestates with a physicochemical and microbiological analysis. The results of both products obtained show a

*Corresponding author: kmendoza@lamolina.edu.pe

significant concentration of organic matter and phytonutrients (nitrogen, phosphorus, potassium, etc.) in a slightly acidic medium (pH value of between 3.8 and 5.8), due to the presence of some lactic acid bacteria and *Bacillus* species, which could confer properties as biostimulators and biocontrol agents. Their stability (pH, color and odor) was evaluated for an additional 30 days, showing excellent hygienic conditions, due to the absence of pathogenic microorganisms, making it possible to incorporate them together with others amendments during halfpart of the viticultural season. Therefore, the valorization of winemaking and wasted by-products by producing biofertilizers and organic amendments for agricultural use could largely replace the use of synthetic fertilization and recover soil fertility. The socioeconomic and environmental benefits would be multiple, within an agroecological transition and circular economy approach.

1 Introducción

La producción vitivinícola peruana data de la época colonial, desarrollándose en la costa central y sur debido a sus óptimas condiciones agroecológicas donde la producción de vinos locales competía con los importados de España; convirtiéndose posteriormente en la mayor área de elaboración del *aguardiente de Pisco* [1]. Según estimaciones oficiales, actualmente la superficie de vid cultivada a nivel nacional ronda las 30 mil hectáreas, siendo el 30% orientada hacia la vinificación y destilación de bebidas espirituosas, con volúmenes de producción cercanos a los 20 millones de litros. Ica es la principal zona de producción, seguido del valle de Cañete en la región Lima. Ambas regiones representan aproximadamente el 75% del área de cultivo y procesamiento vitivinícola en Perú.

Cabe resaltar que esta industria genera grandes cantidades de subproductos y residuos tales como orujos, escobajos, lías de vinificación, vinazas de destilación y aguas residuales [2], cuya gestión inadecuada puede generar problemas socioeconómicos y riesgos ambientales debido a su generación estacional, altos niveles de Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), sólidos suspendidos y elementos contaminantes [3,4,5]. Las lías de vinificación (LV) se producen durante el proceso de fermentación y reposo del vino, representando del 2 al 6% del volumen total producido, conteniendo microorganismos (levaduras y bacterias), carbohidratos insolubles, compuestos fenólicos, ligninas, proteínas, sales minerales y orgánicas, etanol y ácidos orgánicos como el láctico y el acético [6]. La vinaza de destilación (VD) o “mosto cocido” es el subproducto líquido generado en la elaboración de bebidas espirituosas vónicas, entre ellas el Pisco [7]. Este residuo se deposita en el fondo del alambique representando aproximadamente el 70-75% del volumen de carga a destilar. Físicamente es un líquido turbio (café rojizo), con un olor alcohol-caramelo y T° cercana a los 100 °C. La vinaza presenta un gran contenido de materia orgánica y nutrientes (nitrógeno, azufre, fósforo y potasio) proveniente de los residuos de la levadura, sales, restos de la materia prima, residuos de alcohol, azúcares y ácidos orgánicos [8]. Sin embargo, este residuo también contiene compuestos fitotóxicos, antibacterianos y peligrosos para el ambiente como fenoles y metales pesados [3].

Hoy en día, el impulso de la agricultura sustentable con un enfoque de economía circular estimula procesos

de recuperación y valorización de residuos agroindustriales para minimizar la producción de desechos, aumentar la eficiencia de los procesos y del uso de recursos naturales otorgándoles valor a los subproductos. En el sector energético, los residuos semisólidos como las lías y las vinazas son tratados a menudo en reactores anaerobios de tipo agitado para recuperación de energía en forma de metano [9,10]. Dentro de la producción agrícola, el proceso de valorización de este tipo de materiales se ha enfocado en el compostaje para uso directo como mejorador de suelos, además de la lombricultura y como fuente de sustratos [6,11], estando documentado desde tiempos ancestrales el uso de orujos para el abonamiento de las viñas, siempre mezclado con estiércol para su descomposición y estabilización [12,13]. Ya en trabajos anteriores se ha estudiado el efecto de la aplicación directa del orujo al suelo [14], previo tratamiento de estabilización antes de su aplicación debido a su potencial fitotóxico y antimicrobiano [15,16]. También se ha compostado orujo de uva hidrolizado con lías de vinificación evaluando algunas variables fisicoquímicas para uso en sustratos para plantas [17], demostrando que el aprovechamiento de sus nutrientes y materia orgánica en los propios viñedos como complemento a la fertilización sintética es conveniente y con beneficio económico [11], aunque este proceso requiere un tiempo prolongado y gran disposición de espacio libre (aeróbico). Con respecto a la vinaza, generalmente se almacena en pozas de evaporación o concentrada para reducir su volumen. Además, se han aplicado métodos como el tratamiento biológico aeróbico, fermentación aeróbica para producir proteína unicelular y tratamiento alcalino de mezclas de orujo de uva, vinaza y paja de trigo para alimento de rumiantes. El inconveniente es que la mayoría de los métodos de tratamiento son muy caros y no aportan una solución integral por la necesidad de disponer de lodos u otros subproductos derivados del proceso [18].

Una estrategia alternativa de tratamiento de subproductos y residuos agroindustriales es la digestión anaeróbica utilizando consorcios microbianos [19,20], después de la cual, se obtienen dos digestatos: un líquido (Biol) y un sólido (Biosol), con potencial valor como enmiendas orgánicas para uso agrícola [21,22,23]. Ya varias cepas de *Lactobacillus*, *Bacillus*, *Paenibacillus* y *Trichoderma* se han utilizado en el mejoramiento de los procesos de compostaje, biodigestión y obtención de sustancias de interés como ácido láctico, enzimas, sustratos para plantas, biosurfactantes y agentes de biocontrol [4,24,25]. Dentro de las especies más

representativas del género *Bacillus* se consideran: *B. subtilis*, *B. brevis*, *B. cereus*, *B. pumilus*, *B. licheniformis* y *B. amyloliquefaciens*, los cuales ofrecen una importante alternativa como agentes de control biológico (BCAs) y solubilización de fósforo, gracias a su ubicuidad en el suelo, a la producción de esporas resistentes a la desecación, calor, irradiación UV y solventes orgánicos; por ser promotor de crecimiento en plantas (PGPR); a su sistema de resistencia inducida (ISR), además de la producción de sustancias de tipo enzimático (Quitinasa, β -1,3 glucanasa, xilanasa) y antibióticos como Iturinas, surfactinas y fengicinas [26]. Caso particular, con el género *Lactobacillus* que, a través de una fermentación láctica, se generan ácidos orgánicos (ácido láctico en mayor proporción) y otras sustancias orgánicas que tienen un poder antimicrobiano de amplio espectro sobre bacterias enteropatógenas [27]. Algunas cepas de *Lactobacillus rhamnosus* se han empleado para la obtención de ácido láctico a partir de lías de vinificación y vinazas de destilación [28,29]. Esta alternativa de aprovechamiento y transformación de materia orgánica, cada vez va ganando mayor interés por su versatilidad, corto tiempo (menor a 25 días), reducida área de trabajo, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y la presencia de patógenos. También, ha sido usada con distintos residuos agropecuarios y agroindustriales como estiércol vacuno, bagazo de cebada, suero de uisería y residuos vegetales [30,31,32].

El objetivo del presente estudio fue evaluar la factibilidad de aprovechar las lías de vinificación y las vinazas de destilación para la elaboración de biofertilizantes y enmiendas orgánicas mediante digestión anaeróbica usando consorcios microbianos y estimar su valorización económica a mediana escala para una bodega vitivinícola del valle de Cañete (Perú).

2 Materiales y métodos

2.1 Diseño experimental y colección de muestras

2.1.1 Colección de muestras de subproductos vitivinícolas

Se seleccionaron muestras de lías de vinificación (LV) y vinazas de destilación (VD), procedentes de los valles de Ica (Región Ica) y Cañete (Región Lima) durante las campañas 2020-2021 y 2021-2022 (Tabla 1). Las LV se obtuvieron después de los trasiegos del vino y las VD al finalizar la destilación de aguardiente, elaborados de variedades blancas, rojas, tintas y tintoreras. Todos los subproductos vitivinícolas usados en el estudio fueron enfriados y luego almacenados a 10 °C.

2.1.2 Diseño experimental y ubicación del ensayo

La investigación se desarrolló considerando dos fases. La primera fase correspondió a la instalación de los biodigestores artesanales, la elaboración de las enmiendas

orgánicas y el monitoreo de parámetros fisicoquímicos del proceso (abril 2022 – julio 2022), mientras que la segunda fase consistió en la realización de los análisis físicos, químicos y microbiológicos efectuados una vez finalizado el proceso de elaboración (agosto 2022– febrero 2023). Los ensayos se llevaron a cabo en un predio anexo a la Bodega Viña Los Reyes (Lunahuaná, Cañete), ubicado en la costa central del país, la cual presenta un clima subtropical, con una precipitación anual de 26.6 mm. Tiene una temperatura promedio de 19.7 °C, en verano es de 28 °C y en invierno oscila entre los 14 y 20 °C.

Tabla 1. Tipo de subproductos colectados y su procedencia.

Tipo de subproducto	Ubicación	Proveedor /Vitivinicultor
Vinazas de destilación de Listán Prieto (a.k.a. Negra Criolla)	Quilmaná, Cañete	Alberto Di Laura Viccina
Vinazas de destilación de Moscatel de Alejandria (a.k.a. Italia)	San Vicente, Cañete	Humberto Huapaya Solano
Vinazas de destilación de Quebranta	Lunahuaná, Cañete	Miguel Faustino Calderón
Lías de vinificación de Niagara (a.k.a. Borgoña Blanca)	Santa Cruz de Flores, Cañete	Humberto Luján Huapaya
Lías de vinificación de Isabella (a.k.a. Borgoña Negra)	Lunahuaná, Cañete	Orlando Candela Sánchez
Lías de vinificación de Cabernet Sauvignon	Lunahuaná, Cañete	Juan Carlos Alvarado Gonzales del Valle
Vinazas de destilación de Jacquez (a.k.a. Uvina)	Pacarán, Cañete	Ernesto Rivas Santos
Vinazas de destilación de Moscatel Negro del Perú	Santiago, Ica	Matías Grados Mora
Lías de vinificación de Torontel	Ocucaje, Ica	Yolanda Tinoco Rojas

Para la realización de los ensayos experimentales, se construyeron biodigestores artesanales tipo batch utilizando bidones plásticos de 50 L de capacidad, una manguera de ¼” y una botella con agua como trampa de aire (Fig. 1). Considerando las características de los subproductos vitivinícolas usados (alta acidez, carga orgánica y sólidos suspendidos) se propuso la siguiente formulación: 25% v/v de vinazas, 5% p/v de lías, 10% v/v de melaza de caña, 2.5% p/v de guano de isla (fuente de nutrientes), 1.5% p/v de dolomita agrícola (fuente de calcio y magnesio para neutralizar la acidez vínica), 1% de roca fosfórica (fuente de fósforo), 20% v/v de suero de quesería, 10% v/v de inóculo microbiano activado y 25% v/v de agua dulce. En la Tabla 2 se presentan las características de algunos insumos utilizados en el proceso. Para lograr una fermentación eficaz y consistente se recomienda el uso de melaza como fuente de carbono; igualmente el suero de quesería resulta apropiado por su aporte de bacterias ácido-lácticas [32].

2.1.3 Preparación y acondicionamiento de subproductos e insumos

Una vez culminada la recolección de los subproductos vitivinícolas frescos (LV y VD), las muestras fueron almacenadas durante 1 semana en condiciones controladas (10 °C y bajo sombra) y enviadas al Laboratorio de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes (LASPAF-UNALM) para su caracterización físico-química inicial. Luego fueron homogeneizadas por agitación y mezcladas en proporciones iguales, tomando datos de pH y conductividad eléctrica (CE en dS/m). Seguidamente a la VD se le añadió la dolomita agrícola (de acuerdo a la formulación mencionada anteriormente) para neutralizar parte de la acidez agresiva que contiene, dejando reposar durante 2 días para finalmente añadir al biodigestor. Paralelamente, en otro envase se fueron mezclando el guano de isla, la roca fosfórica, la melaza de caña, las LV, el suero de quesería y agua dulce hasta obtener una solución homogénea.



Figura 1. Biodigestor tipo batch de 50 L.

Tabla 2. Características de algunos subproductos agroindustriales y enmiendas minerales usadas.

Tipo de subproducto o enmienda	Características	Proveedor/ Fuente
Guano de Isla	Es un biofertilizante a base de deyecciones de aves marinas estabilizada con una alta concentración de macronutrientes (12% N, 11% P ₂ O ₅ , 2.5% K ₂ O) y micronutrientes como Mn, Fe, B, Cu, Zn en pequeñas proporciones.	AGRORURAL
Dolomita Agrícola	Es una enmienda mineral (29.5% CaO y 21.5% MgO) usada para subir el pH del suelo	FOSYEIKI S.A.C.

	a niveles favorables para los cultivos	
Roca Fosfórica	Es un depósito mineral compuesto de apatita (fosfato de calcio), que contiene 21% - 23% P ₂ O ₅ y 32% - 42%CaO, además de S, Si y microelementos (Fe, Zn, Mn, Cu, B, Mo).	FOSYEIKI S.A.C.
Suero de quesería	Es el subproducto de la elaboración del queso. Generalmente está compuesto por 93,1% de agua, 4,9% de lactosa, 0,9% de proteína cruda, 0,6% de cenizas, 0,3% de grasa, 0,2% de ácido láctico, vitaminas hidrosolubles y Lactobacillus [30].	Lácteos Piamonte S.A.C.
Melaza de caña	Es un subproducto de la industria azucarera, siendo una fuente de carbohidrato soluble, macro y micronutrientes, factores de crecimiento [33]. Posee 2% N, 5% K ₂ O y una Relación C/N = 13,57	EL RANCHO E.I.R.L.

El consorcio microbiano utilizado estuvo conformado por una mezcla de: 50% de GARLAC (de la empresa QOLLKA FER SAC), el cual contiene bacterias ácido-lácticas (BAL) como Lactobacillus, Streptococcus y Bifidobacterium con una concentración mayor a 5x10⁷ UFC·ml⁻¹; y 50% de BIODIGEST (de la empresa CONAGRA SAC), que contiene un consorcio de hongos, actinomicetos, bacterias mesófilas y termófilas (Bacillus thuringiensis, Bacillus subtilis, Pseudomona aeruginosa, Pseudomona putida, Pseudomona fluorescens, Enterobacter cloacea, etc.) con una concentración mayor a 5x10⁷ UFC·ml⁻¹, los cuales fueron disueltos en agua con una porción de melaza de caña.

Finalmente, se procedió a mezclar todos los insumos en el biodigestor, tomando como datos iniciales de proceso el pH, la conductividad eléctrica (CE) y la temperatura (°C), sellando el envase y verificando su hermeticidad. Para estas mediciones en campo se utilizó el Medidor pH/CE/T° Hanna HI 98130. El equipo previamente fue calibrado usando las soluciones tampón de pH 4 y 7 y con el tampón de solución salina patrón de 12.8 dSm⁻¹.

2.2 Caracterización de los productos obtenidos

2.2.1 Parámetros físico-químicos

Se evaluó el pH, CE, sólidos totales (ST), materia orgánica (MO), relación C/N, la concentración de macroelementos (N, P, K), elementos secundarios (Ca, Mg, S, Na) y microelementos (Fe, Cu, Zn, Mn, B) en el Laboratorio de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes (LASPAF-UNALM). Para la determinación del contenido de materia orgánica se utilizó el método Walkley y Black, para los sólidos totales la gravimetría, el pH por potenciometría, la conductividad eléctrica por conductimetría. Para la concentración de N, P y B se emplearon los métodos estandarizados de Kjeldahl, Amarillo de Vanadato y Curmina, respectivamente; mientras que la determinación del contenido de K, Ca, Mg, Na, Fe, Cu, Zn y Mn se realizó mediante

espectrometría de absorción atómica y el S por turbidimetría. El contenido de carbono orgánico (C org) para estimar la relación C/N se calculó según la expresión $C_{org} = MO/1.84$ [34].

La medición del porcentaje de acidez titulable se determinó mediante la cuantificación indirecta del ácido láctico titulable según la metodología de la AOAC [35], en el Laboratorio de Biotecnología Ambiental y Biorremediación de la Facultad de Ciencias de la UNALM.

2.2.2 Población microbiana

Para evaluar la inocuidad del proceso se determinó la población de *E. coli*, (como indicador de contaminación fecal) en el Laboratorio de Ecología Microbiana y Biotecnología “Marino Tabusso” de la UNALM con el método del Número más Probable (NMP) establecido por la ICMSF [36]. También se determinó la población de *Lactobacillus* (encargados de producir ácido láctico a partir de la materia orgánica) mediante la técnica de conteo en placa de Unidades Formadoras de Colonias (UFC) propuesta por la ICMSF [36]. El recuento de *Bacillus* como potenciales agentes de biocontrol y solubilización de fósforo, se determinó mediante la técnica de conteo con el método del Número más Probable (NMP) usando Agar MYP (Manitol-Yema de huevo y Polimixina) según APHA [37].

2.2.3 Cosecha, evaluación del rendimiento del proceso y estabilidad de los productos

Al finalizar el proceso de biodigestión, se evaluó el rendimiento del proceso, cuantificando los volúmenes obtenidos. El digestato líquido (Biol) fue cernido utilizando una coladera metálica, para posteriormente ser envasado en bidones plásticos de 10 L y conservado en un ambiente fresco; mientras que el digestato sólido o lodo remanente (Biosol) fue retirado del biodigestor, para su secado (deshidratación) al sol durante 10 días, siendo tamizado y pesado finalmente. La estabilidad de los productos obtenidos fue evaluada mediante la evolución del pH. Adicionalmente se tomaron datos de color y olor durante 30 días después de finalizado el proceso de biodigestión.

Con la información nutricional obtenida (% NPK), se estimó su valorización económica a mediana escala para su aplicación junto con otras enmiendas en un viñedo perteneciente a la bodega vitivinícola Viña Los Reyes, ubicada en Lunahuaná, del valle de Cañete (Perú).

3 Resultados y Discusión

3.1 Caracterización de los subproductos vitivinícolas utilizados

Las características físico-químicas iniciales de las lías de vinificación (LV) y vinazas de destilación (VD) fueron

determinadas mediante el análisis de pH, CE, ST, MO, la concentración de macroelementos (N, P, K), elementos secundarios (Ca, Mg, S, Na) y microelementos (Fe, Cu, Zn, Mn, B), las cuales se presentan en la Tabla 3. Los resultados muestran que ambos subproductos (LV y VD) tienen una alta acidez ($pH < 4$) proveniente principalmente de los ácidos orgánicos de las uvas o de origen fermentativo (entre ellos el tartárico, málico, cítrico, láctico, succínico y acético), siendo el tartárico el menos atacado y descompuesto por las bacterias [38, 39]. El valor de la conductividad eléctrica (4.89 y 9.59 dS.m-1) de ambos subproductos los definen como materiales salinos. Asimismo, las LV presentan un alto contenido de materia orgánica (61.54%) superior a las VD (3.1% de materia orgánica disuelta). Las LV presentan relaciones C/N entre 14 y 23 [40,41], mientras que las VD entre 4.7 a 45 [40,42]. Cabe resaltar que las VD presentan una alta Demanda Bioquímica de Oxígeno superior a 15700 mg/L [43]. En el caso de las LV, la materia orgánica es rica en N (2.33%) proveniente principalmente de los microorganismos muertos (levaduras y bacterias muertas), carbohidratos insolubles y proteínas [6], además de presentar una alta concentración de K (9.40% K_2O) y Ca (0.42% CaO) provenientes de las sales tartáricas del vino. Con respecto a las VD, los niveles de K fueron importantes (3100 ppm), también provenientes de su liberación desde las sales tartáricas del vino, tomando en cuenta las características de los mostos de uva de las zonas de producción muestreadas (alta concentración de azúcares y potasio), que generalmente tienen pH cercano a 4 (uvas sobremaduras). Los contenidos de Mg observados en las LV y VD pueden provenir de sales de magnesio soluble también provenientes del mosto de uva utilizado. Comparando ambos subproductos, las concentraciones de micronutrientes fueron mayores en las muestras LV. Se destaca el Fe (561 ppm), en especial los provenientes de uvas tintas. La mayor parte del Fe está en forma de complejos con los ácidos orgánicos que contiene el mosto, es decir, junto al ácido málico, tartárico y cítrico. Las concentraciones de Fe encontradas en el vino varían de 0,7 a 23,0 mg/L y que debido a los procesos de estabilización precipitan dentro de las lías [44]. También se observa una importante concentración de boro (B), el cual proviene del mosto (uva), ya que interviene en numerosas funciones en el cultivo de la vid, favoreciendo la fecundación y cuajado de los frutos e interviniendo en sistemas enzimáticos y en el transporte y metabolismos de azúcares. En las VD, la concentración de Cu fue una de las más destacadas debido principalmente al pH ácido de estos subproductos líquidos, que favorece la solubilización de este elemento a partir del material metálico del equipo de destilación (cobre) y del contenido de S y ácido acético del vino que favorece su corrosión. El cobre es un metal pesado conocido por su toxicidad para la microbiota del suelo [45], pero en bajas concentraciones (como micronutriente) actúa como activador de la fotosíntesis, respiración y el metabolismo de carbohidratos y proteínas [46,47].

Tabla 3. Características físico-químicas iniciales de los subproductos vitivinícolas utilizados.

Parámetro	Lías de vinificación (LV)	Vinaza de destilación (VD)
pH	3.92	3.47
C.E. (dS.m-1)	4.89	9.59
Humedad (%)	66.91	--
Sólidos totales (ST)	--	45.13 g/L
Materia Orgánica (M.O.)	61.54%	31.36 g/L
N	2.33% N	525 ppm
P	0.49% P ₂ O ₅	275.32 ppm
K	9.40% K ₂ O	3100 ppm
Ca	0.42% CaO	140 ppm
Mg	0.11% MgO	160 ppm
S	0.15%	115 ppm
Na	0.03%	56.25 ppm
Fe	561 ppm	5.20 ppm
Cu	32 ppm	5.50 ppm
Zn	9 ppm	0.88 ppm
Mn	16 ppm	1.34 ppm
B	45 ppm	20.95 ppm

Estos resultados de interés agronómico nos permitieron evaluar el potencial de los subproductos vitivinícolas como insumos para la elaboración de enmiendas orgánicas y biofertilizantes. Asimismo, ambos subproductos presentaron alta turbidez, color rosado a marrón y olor a fermentación alcohólica (Fig. 2).



Figura 2. Subproductos vitivinícolas generados en la elaboración de vinos y destilados.

3.2 Monitoreo de parámetros del proceso de biodigestión anaeróbica

A continuación, se presentan los datos del monitoreo de parámetros físico-químicos (pH, CE y temperatura) que influyen en el proceso de biodigestión anaeróbica y producción de los digestatos (Tabla 4).

Tabla 4. Monitoreo de pH, Conductividad Eléctrica y Temperatura del proceso.

Parámetro	pH	C.E. (dS.m-1)	Temp. (°C)
Día 0	5.20	18.63	22
Día 1	4.80	21.00	24
Día 5	4.50	25.50	28
Día 10	4.30	28.40	32
Día 15	4.05	30.30	36
Día 20	3.85	31.00	33
Día 25	3.84	31.10	30

El pH de la solución descendió rápidamente por debajo de 4.8 desde el primer día de fermentación, debido a la acción de las BAL, las cuales empezaron a degradar inmediatamente la materia orgánica (guano de isla y subproductos vitivinícolas) al contar con 3 factores importantes: un medio anaeróbico, un sustrato energético adecuado (melaza) y un inóculo microbiano seleccionado (cepas de *Lactobacillus* y *Bacillus*). Resultados similares fueron obtenidos en estudios anteriores donde los valores de pH descendieron desde el primer día de fermentación [30,32,33]. Como la mezcla inicial contenía suero de quesería, los sustratos de la materia orgánica (azúcares, aminoácidos, minerales, microorganismos) en medio líquido activaron instantáneamente la fermentación, ya que se observó el burbujeo en la botella con agua (presencia de algunos microorganismos heterofermentadores), lo cual indicó la actividad microbiana interna; con el importante incremento de la temperatura. De acuerdo a sus características, el GARLAC es un activador de la fermentación láctica, alcanzando una predominancia de *Lactobacillus* al quinto día de fermentación, generalmente con un pH inferior a 4 (altamente ácido), resultado de la alta concentración de ácidos orgánicos, lo cual redujo la producción de gases como el amoníaco y sulfuro de hidrógeno, los cuales generan malos olores. Los *Lactobacillus* al ser resistentes a las condiciones ácidas les permitió crecer y prevalecer en el sistema anaerobio, al igual que los *Bacillus*, que son grampositivos termofílicos productores de esporas, las cuales les permiten persistir en condiciones extremas de altas temperaturas, alta acidez o alcalinidad, así como otros ambientes adversos. Es conocido que muchas

enzimas son secretadas por *Bacillus subtilis*, como la proteasa, celulasa, amilasa y fitasa, que pueden compensar las carencias de otros microorganismos para promover su crecimiento [48], las cuales ayudaron a degradar los sustratos orgánicos iniciales. La inclusión de *Bacillus subtilis* (contenido en BIODIGEST) para acelerar el proceso de biodigestión, mejoró la eficiencia del proceso y la calidad de los digestatos.

La Conductividad Eléctrica (CE) mostró un incremento paulatino durante el proceso de biodigestión, mientras la materia orgánica se fue descomponiendo y solubilizando, sumado a que los minerales contenidos en algunos insumos utilizados como la dolomita agrícola también se solubilizaran. El mayor incremento en la CE y el aumento de temperatura está relacionada a la solubilidad de la mayoría de las sales ya que la materia orgánica es más accesible para los microorganismos aumentando así la velocidad del proceso. Este incremento de la temperatura (>35°C) evitó el desarrollo de algunas levaduras remanentes en las lías de vinificación que pudieran causar contaminación del proceso (eliminación del olor inicial a alcohol), ya que, las levaduras abundan en medios ricos en materia orgánica poco descompuesta y son capaces de desarrollarse en medios anaerobios cuando realizan fermentación. El mayor incremento en la CE se registró a partir del día 5, considerando que a partir de ese momento la temperatura del proceso superó los 25°C, rango en el que trabajan los microorganismos mesófilos. A partir del día 15, el valor de la CE se mostró sin mayor variación hasta el final del proceso.

3.3 Caracterización de los productos obtenidos

3.3.1 Parámetros físico-químicos

De acuerdo a los resultados analíticos obtenidos (Tabla 5), el digestato líquido (Biol) presentó una elevada acidez (pH=3.84), lo cual favorece la fijación de nutrientes al hacerlos más solubles y por tanto con mayor disponibilidad para que sean asimilados por las plantas (Fig. 3). Asimismo, a mayor acidez, se minimiza la emisión de gases de efecto invernadero (como metano y dióxido de carbono) a la atmósfera [49]. Igualmente, la CE (indicador de salinidad) resultó elevada (31.28 dS·m⁻¹); debido a las altas concentraciones de iones solubles, en especial por la presencia de K aportado por los subproductos vitivinícolas y la melaza (7212.5 ppm), N (5315.83 ppm) y P (1227.61 ppm) proveniente del guano de isla, Ca (2125 ppm) y Mg (1825 ppm) solubilizado desde la dolomita agrícola; y a la intensa actividad microbiana para degradar la materia orgánica. Mientras que el digestato sólido (biosol) mostró un pH ligeramente ácido (pH= 5.82) atribuido a las características de los subproductos vitivinícolas utilizados, en parte neutralizados por la dolomita agrícola, y a la modificación de la composición química de los sustratos orgánicos (guano de isla, suero de quesería) a través de la acción microbiana, en particular por la producción de ácidos orgánicos. Asimismo, el digestato sólido (Biosol) posee mayores concentraciones de macro y micronutrientes con respecto al líquido (Biol). Esta notable diferencia se atribuye a la alta capacidad de los

consorcios microbianos (BAL y *Bacillus*) para degradar compuestos insolubles como los presentes en los sustratos orgánicos utilizados y a los procesos de espesamiento y deshidratación antes de ser tamizado; explicándose con ello el buen contenido de materia orgánica presente en el sólido (27.22%) similar a un compost cumpliendo con los rangos establecidos por la NTP ($\geq 20\%$), la NOCh (25-45%) y la FAO que exige valores mayores a 20% [50,51,52]. En efecto, el Biosol presentó un importante contenido de nutrientes (1,93% N, 5,65% P₂O₅, 0,95 K₂O, 13,66% CaO, 9,4% MgO) confiriéndole propiedades de biofertilizante [53] y como abono orgánico NPK de origen animal y vegetal. De acuerdo a la normativa española, los digestatos también deben someterse a un adecuado control y tratamiento antes de su uso como biofertilizante (para eliminar la toxicidad y patogenicidad), estando regulado al igual que el compost, por el Real Decreto 999/2017 [54]. La incorporación de guano de isla en el proceso aportó principalmente N (que fue solubilizado eficientemente en el Biol), la roca fosfórica aportó P (la mayor parte concentrada en el Biosol y una fracción soluble en el Biol), sumado a la aplicación de dolomita agrícola como fuente de Ca y Mg, los cuales fueron solubilizados por los ácidos orgánicos y concentrados en el Biosol por la actividad microbiana. La alta acidez obtenida, por acción del ácido láctico, evitó que el N se pierda rápidamente de forma amoniacal (malos olores), asimismo la fermentación en depósitos cerrados evitó pérdidas importantes de P, K o Ca contenidos en los materiales orgánicos crudos. En relación al contenido de micronutrientes, el Biosol presentó valores aceptables de Cu (<100 ppm) y Zn (<200) similares a un compost clase A según la NOCh [51]; así como buen contenido de Fe (1290 ppm) proveniente principalmente de las LV. Es conocido que la materia orgánica tiene carácter acidificante, lo que facilita la solubilización del Fe. Para evitar la inactivación de las formas de hierro en suelos con altos contenidos de bicarbonato, la materia orgánica tiene que ser aplicada en grandes cantidades [55].



Figura 3. Medición de pH del digestato líquido.

Considerando que el guano de isla y la roca fosfórica también contienen microelementos en pequeñas proporciones como el Fe, Zn, Mn, Cu y B, éstos fueron solubilizados en el Biol por la acción de los ácidos orgánicos (efecto quelante) y los microorganismos, confiriéndole propiedades de bioestimulante ya que

puede mejorar y promover procesos biológicos y fisiológicos del cultivo, haciéndolos más eficientes y resolver de forma satisfactoria carencias nutricionales en distintas etapas fenológicas [56,57,58]. Adicionalmente, se calculó la relación C/N para ambos digestatos, dato que permite un mejor manejo agronómico de las enmiendas en cuanto a la estabilidad del producto, obteniéndose valores de 7.66 para el Biol y 10.45 para el Biosol. Estudios anteriores indican que la relación C/N óptima para la producción de biogás es 20-30 [59], pudiéndose tomar estos valores como referentes de una digestión anaeróbica adecuada y por lo tanto de la generación de su fase líquida (digestato). Desde este criterio, la relación C/N inferior a los valores referenciados resulta desfavorable, por lo que, para mejorar la formulación, se debería añadir materiales lignocelulósicos ricos en carbono, tales como rastrojo de maíz, leguminosas, residuos de cosechas [60,61]; inclusive restos de poda en verde, raleos, escobajo picado u orujo, especialmente de uva blanca [40,10]. Estos valores obtenidos se pueden deber a que los sustratos orgánicos utilizados (guano de isla, subproductos vitivinícolas y melaza) poseen una Relación C/N <14, siendo ricos en N. Dentro del manejo agronómico de cultivos, se recomienda que los materiales que se agreguen al suelo tengan una relación C/N cercana a 24, ya que valores mayores resultarán en un déficit temporal de N (inmovilización), y aquellos con una relación C/N menor resultarían en un superávit temporal de N (mineralización).

Con respecto a la determinación de acidez titulable (expresada como ácido láctico), el digestato líquido (Biol) presentó una concentración de 3.6%, siendo un valor similar al de otros biofermentos lácticos [19]. Los ácidos orgánicos (carboxílicos) de bajo peso molecular, como el láctico y acético entre otros, incrementan la disponibilidad de micronutrientes, como Fe, Zn y Mn, en el suelo al disminuir el pH en la rizósfera, o por la quelación de estos micronutrientes [55]. De igual manera, los ácidos orgánicos participan en el suelo en fenómenos como la quimiotaxis microbiana y la detoxificación de metales, siendo sustancias polares capaces de formar puentes de hidrógeno entre sí y con el agua. Entre los géneros bacterianos con capacidad de producir ácidos orgánicos que solubilizan P están los *Bacillus* y *Pseudomonas* (contenidas en BIODIGEST), poniéndolo a disposición para la nutrición de las plantas. La acción de los ácidos orgánicos en la solubilización de minerales puede atribuirse a que disminuyen el pH y, más aún, a la formación de complejos estables con Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} y Al^{3+} [62].

Tabla 5. Características físico-químicas de los digestatos obtenidos.

Parámetro	Líquido (Biol)	Sólido (Biosol)
pH	3.84	5.82
C.E. (dS.m-1)	31.28	10.87
Humedad (%)	--	68.76
Sólidos totales (ST)	140.21 g/L	--

Materia Orgánica (M.O.)	102.24 g/L	27.22%
Relación C/N	10.45	7.66
N	5315.83 ppm	1.93% N
P	1227.61 ppm	5.65% P ₂ O ₅
K	7212.50 ppm	0.95% K ₂ O
Ca	2125 ppm	13.66% CaO
Mg	1825 ppm	9.41% MgO
S	1687.50 ppm	2000 ppm
Na	1075 ppm	2700 ppm
Fe	16.98 ppm	1290 ppm
Cu	34.88 ppm	89.50 ppm
Zn	37.98 ppm	77 ppm
Mn	12 ppm	97.50 ppm
B	44.61 ppm	16.99 ppm

La capacidad fertilizante de un producto depende principalmente de las concentraciones de N, P y K. Para los biofertilizantes, estos valores varían en función de la clase de subproductos (residuos) empleados y del método de tratamiento usado. En el caso de los digestatos líquidos (bioles) no se dispone de valores de referencia para establecer su calidad, sin embargo, se conoce que su composición puede variar en función de los sustratos de origen, los parámetros de operación usados en la digestión y el tipo de separación sólido-líquida; sabiendo que este último parámetro define las concentraciones de macro y micronutrientes [63]. Por ende, se requiere estandarizar los procedimientos de obtención para cada tipo de digestato, caracterizarlos y llegar a validarlos.

3.3.2 Población microbiana

En la Tabla 6, se muestran los resultados del análisis microbiológico de los digestatos obtenidos (líquido y sólido), para verificar la ausencia de microorganismos patógenos que puedan afectar su calidad e inocuidad. Se puede observar que la población de *E. coli* fueron inferiores a los límites de detección por la técnica de Número más Probable (<3 NMP·g-1), interpretándose como ausencia en el ensayo, evidenciando una reducción total de la carga enteropatógena inicial a partir de los sustratos orgánicos utilizados, debido al efecto supresor de las BAL sobre cepas competidoras, principalmente mediante la producción de ácidos orgánicos y bacteriocinas [32,33].

Los coliformes fecales son comúnmente utilizados como indicadores de contaminación fecal en aguas residuales. Su uso en lodos de depuración usualmente indica la eficiencia de los procesos de tratamiento en la destrucción de bacterias, y además regula la calidad de los biosólidos que pueden reutilizarse favorablemente [19]. Según García [64] el ácido láctico, genera los cambios de pH hacia la acidez originando condiciones de antagonismo inhibiendo el desarrollo de las bacterias putrefactivas y patógenas.

Así también, dentro de esta investigación se ensayó el uso de inóculos bacterianos seleccionados (GARLAC y BIODIGEST) sobre el proceso de biodigestión,

degradación de los subproductos vitivinícolas, calidad del producto final y su persistencia como potenciales agentes de control biológico. Este efecto positivo se evidencia con la presencia de *Lactobacillus* (19×10^7 UFC·ml⁻¹) y *Bacillus* (60×10^4 UFC·ml⁻¹) en el Biol (a 15 días de finalizar el proceso de biodigestión), de carácter benéfico, por la acción fitosanitaria que estos ejercen cuando se aplican sobre las semillas, superficies de plantas o el suelo; ya que actúan sinérgicamente con la microbiota benéfica para promover una mejor asimilación de nutrientes [32] y también su capacidad de solubilización de P. Sumado a ello, se conoce que los *Bacillus* producen enzimas extracelulares que favorecen la degradación de la lignocelulosa presente en materiales como las LV. Asimismo, en el Biosol se reportó la presencia de *Bacillus* en una menor concentración (17×10^2 UFC·ml⁻¹).

Tabla 6. Carga microbiana de los digestatos obtenidos.

Microorganismo	Líquido (Biol)	Sólido (Biosol)
E. Coli (NMP·g ⁻¹ o ml ⁻¹)	<3	<3
Lactobacillus (UFC·g ⁻¹ o ml ⁻¹)	19×10^7	--
Bacillus (UFC·g ⁻¹ o ml ⁻¹)	60×10^4	17×10^2

Se conoce que los *Bacillus* son un género de bacterias Gram-positivas que pueden sobrevivir en ambientes adversos a través de la formación de esporas, un proceso que es típicamente provocado por la escasez de nutrientes. Como consecuencia de su estructura y composición, las esporas latentes de los *Bacillus* son metabólicamente inactivas, no exhiben expresión génica y son extremadamente resistentes a todo tipo de condiciones ambientales extremas, incluidas las altas temperaturas o la radiación, la desecación, los productos químicos tóxicos y los pH extremos. Todas estas propiedades permiten que las esporas sobrevivan durante muchos años en ausencia de nutrientes. Sin embargo, si se proporcionan los nutrientes apropiados, generalmente l-alanina, las esporas pueden romper rápidamente su latencia en el proceso de germinación utilizando proteínas específicas presentes en las esporas. Con suficientes nutrientes, las esporas germinadas pueden volver al proceso de crecimiento vegetativo [65].

3.3.3 Evaluación del rendimiento del proceso y la estabilidad de los productos

Después del día 25 se procedió a separar la parte líquida y sólida del biodigestor, mediante el cernido con una coladera metálica fina. Se cuantificó el volumen de ambos digestatos (90% de Biol y 10% de Biosol) para evaluar el rendimiento del proceso, separando una muestra de 1 L y 1 kg respectivamente, para ser enviados al laboratorio para su análisis físico-químico. Posteriormente el digestato líquido (Biol) se almacenó en bidones de 10 L, manteniendo una alta acidez (pH < 4) y color marrón brillante durante casi 30 días (Fig. 4.A), un olor agradable a azúcar fermentada, una consistencia viscosa, suave y cremosa, característico de la elevada

acidez del biofermento, debido al contenido de ácidos orgánicos producidos acción microbiana (*BAL* y *Bacillus*), demostrando su estabilidad. Mientras tanto el digestato sólido (Biosol) fue colocado en una bandeja al aire libre para su proceso de secado (deshidratación) durante 15 días, hasta que su volumen se redujo a la mitad, mostrando un color marrón y olor similar a un compost (producto estable), para posteriormente ser tamizado y pesado (Fig. 4.B). En total de 50 L de volumen de carga, se obtuvieron 44.5 L de digestato líquido (Biol) y 2 kg de digestato sólido (Biosol).

Con la información de la riqueza nutricional obtenida por ambos digestatos (% N, P, K, Ca, Mg), se estimó su valorización económica a mediana escala para su aplicación en un viñedo de 6 ha (rendimiento promedio de 12000 kg/ha al 7° año) perteneciente a la bodega vitivinícola Viña Los Reyes (Tabla 7), una de las generadoras de subproductos vitivinícolas utilizados en el estudio. Para esta estimación, se consideran valores referenciales de requerimientos nutricionales para una viña en mantenimiento [66,67, 68], tomando en cuenta que la fertilización del viñedo resulta compleja, habida cuenta de la amplia gama de factores de la producción vitícola (medio, planta y técnicas de cultivo) con incidencia en la nutrición mineral, y la consideración general del viñedo como un cultivo perenne, leñoso y de bajos requerimientos hídricos, características que limitan el desarrollo y la respuesta del abonado.

Tabla 7. Estimación de la valorización nutricional y económica de los digestatos obtenidos para su uso en un viñedo (6 ha) para vinificación y destilación.

Tipo de uva	Para vinificación	Para destilación
Producción de uva	42000 kg	30000 kg
Característica	Sólido	Líquido
Generación de subproductos	LV (970.2 kg)	VD (12461.54 L)
Producción de digestatos	Biosol (1934.17 kg)	Biol (48354.2 L)
Precio de mercado de digestatos	Biosol (USD 0.27/kg)	Biol (USD 1.62/L)
Valor económico de digestatos	Biosol (USD 522.7)	Biol (USD 78412.3)
Nutriente	Necesidades nutricionales	Aporte de los digestatos
N	360 kg N	294.37 kg N
P	150 kg P ₂ O ₅	245.22 kg P ₂ O ₅
K	480 kg K ₂ O	436.92 kg K ₂ O
Ca	360 kg CaO	408.06 kg CaO
Mg	120 kg MgO	328.45 kg MgO

De acuerdo a la valorización económica de los digestatos, resulta rentable la recuperación de subproductos vitivinícolas (LV y VD), sumado a otros subproductos agropecuarios y agroindustriales junto con

el aporte de enmiendas minerales y el uso de consorcios microbianos para obtener enmiendas orgánicas y biofertilizantes, generando ingresos económicos superiores a USD 78935 para un viñedo y bodega vitivinícola de 6 ha. Además, puede significar un ahorro en costos de tratamiento para cumplir con las normativas ambientales vigentes.

El “valor de fertilizante” o el “valor de sustitución del fertilizante” de un nutriente en un producto orgánico, como un digestato, entre otros, se define generalmente como el porcentaje de la cantidad total de ese nutriente que está disponible para la absorción de la planta. Esto puede determinarse relacionando la cantidad de un nutriente de un fertilizante mineral regular (referencia) que se requiere para alcanzar el mismo rendimiento o la misma absorción de ese nutriente como una cierta cantidad del producto orgánico (por ejemplo, digestato) [58]. Tomando en cuenta que las enmiendas orgánicas o biofertilizantes, son productos de liberación lenta, de acuerdo a su tasa de mineralización (relación $\text{NH}_4^+ / \text{NO}_3^-$), se recomienda usarlos junto con fertilizantes sintéticos minerales, para potenciar su asimilación por las plantas. En abonados de plantación, cuando la MO disponible es poco estable y de relación C/N baja, que suponen una importante disponibilidad de N para su mineralización, es aconsejable aplicarla en niveles cercanos a 10 t/ha [68].

Se podría valorizar también el aporte de los micronutrientes, los cuales a pesar que se requieren en pequeñas cantidades, son igualmente esenciales y frente a deficiencias, se afectará el rendimiento del viñedo. En general su disponibilidad se relaciona estrechamente con el pH del suelo, así nutrientes como el Hierro (Fe), Cobre (Cu), Zinc (Zn) y Manganeseo (Mn) estarán más disponibles a pH ácido, mientras que el Molibdeno (Mo) a pH básico, debido a esto, para la decisión de fertilización se debe conocer estas características del suelo [69]. Con respecto al digestato líquido (Biol), presenta una versatilidad de uso, ya que se puede aplicar vía sistema de riego por goteo, en drench o foliar a lo largo de toda la campana vitícola.

En síntesis, los resultados permitieron evaluar el potencial de los digestatos para ser utilizados como biofertilizantes y enmiendas orgánicas o como insumos para elaborarlos.

4 Conclusiones

El tratamiento de los subproductos de la industria vitivinícola y de destilación, usando un consorcio microbiano ácido-láctico, permite obtener digestatos que pueden ser valorizados como enmiendas orgánicas y biofertilizantes para su uso agrícola.

La digestión anaeróbica permite la transformación de subproductos agroindustriales, en especial vitivinícolas, de carácter contaminante, en insumos agrícolas inocuos, de alta calidad nutricional y biológica, con buenas características organolépticas, de estabilidad, en un espacio reducido y en corto tiempo.

El nivel de acidez alcanzado en el proceso permite asegurar la inocuidad de ambos digestatos, estando libres

de microorganismos patógenos que puedan generar riesgos en la salud de las personas, a los suelos y los cultivos aplicados.

Los contenidos de macroelementos (especialmente K) y microelementos (especialmente Fe y B) provenientes de los subproductos vitivinícolas (medio ácido) son una fuente orgánica que se puede recuperar para incorporarlos al viñedo, especialmente en suelos pobres y alcalinos, característicos de la costa peruana.



Figura 4. Muestras de digestatos obtenidos: (A) Biol (líquido), (B) Biosol (sólido).

La aplicación de estas enmiendas orgánicas y biofertilizantes de liberación lenta, dentro de un programa racional de fertilización, puede cubrir gran parte de las necesidades nutricionales de un viñedo, recuperando la fertilidad del suelo, generando enormes beneficios socio-económicos y ambientales, dentro de un enfoque de transición agroecológica y de economía circular.

Queda pendiente balancear la relación C/N, incorporando otros subproductos agroindustriales lignocelulósicos, y determinar la relación $\text{NH}_4^+ / \text{NO}_3^-$ pues nos daría información sobre la disponibilidad inmediata de N y sus posibles pérdidas, así como mantener el equilibrio de macro y micronutrientes para asegurar el funcionamiento de los consorcios microbianos responsables del proceso y su eficiente aplicación en los campos de cultivo.

Los resultados aportados por este trabajo ayudan a establecer alternativas de recuperación y valorización de la enorme cantidad de subproductos (mal llamados residuos) vitivinícolas y de destilación generados en el Perú, no sólo para evitar la contaminación ambiental, sino también para convertirlos en valiosos recursos para desarrollar una vitivinicultura sustentable.

Esta investigación fue financiada con recursos de la empresa BIOPUQUNA S.A.C., con el soporte institucional del Instituto

de la Pequeña Producción Sustentable (IPPS-UNALM). Agradecemos también el soporte técnico del Prof. Juan Juscamaita del Laboratorio de Biotecnología Ambiental y Biorremediación del Departamento de Biología de la Facultad de Ciencias (UNALM), del Dr. Vicente Sotés, la Dra. Flor Etchebarne y a los viticultores de los valles de Ica y Cañete por su colaboración en la recolección de insumos.

Referencias

1. L. Huertas, Historia de la producción de vinos y piscos en el Perú, *Universum (Talca)* **19**, n°2, 44-61 (2004)
2. M.A. Bustamante, R. Moral, C. Paredes, A. Pérez-Espinosa, J. Moreno-Caselles, M.D. Pérez-Murcia. Agrochemical characterisation of the solid byproducts and residues from the winery and distillery industry. *Waste Manage.* **28**, 372–380 (2008)
3. F.J. Beltrán, J.F. García-Araya, P.M. Álvarez. Wine distillery wastewater degradation. 1. Oxidative treatment using ozone and its effect on the wastewater biodegradability. *J. Agric. Food Chem.* **47**, 3911–3918 (1999)
4. R. Devesa-Rey, X. Vecino, J.L. Varela-Alende, M.T. Barral, J.M. Cruz, A.B. Moldes, Valorization of winery waste vs. the costs of not recycling, *Waste Manag.* **31**, 2327–2335 (2011)
5. C. Da Ros, C. Cavinato, P. Pavan, D. Bolzonella. Winery waste recycling through anaerobic co-digestion with waste activated sludge. *Waste Manag.* **34**, 2028–2035 (2014)
6. R. Villena Gordo. Utilización del compost de orujo de vid como enmienda orgánica y fertilizante en una zona vulnerable. Tesis Doctoral, E.T.S. de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas, Universidad Politécnica de Madrid, España (2019)
7. Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual (INDECOPI). Reglamento de la Denominación de Origen Pisco, Lima, Perú (2011)
8. K. Mendoza. Diseño de una bodega vitivinícola pisquera en el Valle de Ica utilizando acondicionamiento ambiental pasivo. Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería Agrícola. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú (2015)
9. R. Moletta. Winery and distillery wastewater treatment by anaerobic digestion. *Water Sci Technol* **51**, 137–144 (2005)
10. Hungria J., Siles J.A., Gil A., Gutiérrez, M.C., Martín M.A. Revalorization of grape marc waste from liqueur wine: Biomethanization. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* **94**, 1499–1508 (2019)
11. J. Mojica-Gómez, W. Pérez-Mora. Aprovechamiento de Residuos Agroindustriales de la Industria Vinícola del Valle de Sáchica. Bogotá D.C. (Colombia): Servicio Nacional de Aprendizaje, p. 113 (2019)
12. M. Agustín. Libro de los secretos de agricultura, casa de campo, y pastoril. Alacant: Biblioteca Virtual Miguel de Cervantes (1722)
13. L.J.M. Columela. Los doce libros de Agricultura que escribió en latín Lucio Junio Moderato Columela, traducidos al castellano por D. José María Alvarez de Sotomayor y Rubio. Imprenta de Miguel de Burgos. Madrid (1824)
14. C. Sorlini, V. Andreoni, P. Balsari, A. Bertoluzza, P. Bonfanti, R. Levi-Minzi, R. Marchetti, A. Masoni, G. Ranalli, F. Sangiorgi, A. Silva, F. Tano. Trattamento e utilizzazione agronomica di reflui e residui di cantine di vinificazione. *Riv. Agron.* **32**, 282–287 (1998)
15. A.B. Moldes, M. Vázquez, J.M. Domínguez. Evaluation of mesophilic biodegraded grape marc as soil fertilizer. *Appl Biochem Biotechnol* **141**, 27–36 (2007)
16. A.R. Fontana AR, A. Antonioli, R. Bottini. Grape pomace as a sustainable source of bioactive compounds: extraction, characterization, and biotechnological applications of phenolics. *J Agric Food Chem* **61**, 8987–9003 (2013)
17. R. Paradelo, A.B. Moldes, B. Prieto, R.G. Sandu, M.T. Barral. Can stability and maturity be evaluated in finished compost from different sources?. *Compost science and utilization* **18**, 22-31 (2010a)
18. M.A. Bustamante, M.A., C. Paredes, R. Moral, J. Moreno-Caselles, A. Pérez-Espinosa, M.D. Pérez-Murcia. Uses of winery and distillery effluents in agriculture: characterisation of nutrient and hazardous components. *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research* **511**, 145-51(2005)
19. B. Cupe, J. Juscamaita. Tratamiento de lodos residuales de una industria cervecera a través de fermentación homoláctica para la producción acelerada de abono orgánico. *Ecología Aplicada* **17(1)**, 107-118 (2018)
20. D. Lakhali, B. Bahlaouan, N. Boutaleb, M. Bennani, M., S. El Antri.. Agricultural valorization by biotransformation of fish wastes combined with grape marc and molasses. *Mediterranean Journal of Chemistry* **7**, 723–733 (2020)
21. L.D. Groot, A. Bogdanski. Bioslurry = brown gold? A review of scientific literature on the co-product of biogas production. *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)* (2013)
22. L. Warnars, H. Oppenorth. El digestato: el fertilizante supremo, estudio sobre el digestato, el uso y sus resultados. *HIVOS*. 52 p. (2014)
23. L.T. Vega, D.A. Vega, F.A. Poveda. Evaluación de un digestado como fertilizante orgánico. *Idesia (Arica)* **38(3)**, 87-96 (2020)
24. M. Duan, Y. Zhang, B. Zhou, Z. Qin, J. Wu, Q. Wang. Effects of *Bacillus subtilis* on carbon components and microbial functional metabolism during cow manure–straw composting. *Bioresource Technology* **303**, 122868 (2020)
25. E.R. Oviedo-Ocaña, J. Soto-Paz, V. Sanchez-Torres, L.J. Castellanos-Suarez, D. Komilis. Effect of the Addition of the *Bacillus* Sp., *Paenibacillus* Sp. Bacterial Strains on the Co-Composting of Green

- and Food Waste. *J. Environ. Chem. Eng.* **10**, 107816 (2022)
26. E. Castañeda Alvarez, L.C. Sánchez. Evaluación del crecimiento de cuatro especies del género *Bacillus* sp., primer paso para entender su efecto biocontrolador sobre *Fusarium* sp. *Nova* **14**(26), 53–62 (2016)
 27. L. De Vuyst, F. Leroy. Bacteriocins from Lactic Acid Bacteria: Production, purification, and food applications. *Journal of molecular microbiology and biotechnology*. Bélgica. Págs. 194 y 195 (2007)
 28. Bustos, G., Cruz, J.M., Moldes, A.B., Domínguez, J.M., 2004a. Formulation of low-cost fermentative media for lactic acid production with *Lactobacillus rhamnosus* using vinification lees as nutrients. *J. Agric. Food Chem.* **52**(4), 801–808
 29. J.M. Salgado, N. Rodríguez, B. Max, B. Pérez, R. Rodríguez, S. Cortés, J.M. Domínguez. Evaluation of wine vinasses as alternative nutrients in biotechnological processes *CyTA: Journal of food* **9**, Núm. 4, pp. 278-281 (2011)
 30. H. Buchelli. Producción de biofertilizante de bagazo de cebada, excretas de vacuno y suero de quesería mediante fermentación homoláctica. Tesis de Grado, Facultad de Ciencias-Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú (2014)
 31. T. Colque, D. Rodríguez, A. Mujica, A. Canahua, V. Apaza, S. Jacobsen. Producción de biol: Abono líquido natural y ecológico. (En línea) INIA-EE Illpa, Puno, Perú. 16 p. (2005)
 32. H. Quiñonez, W. Trejo, J. Juscamaita. Evaluación de la calidad de un abono líquido producido vía fermentación homoláctica de heces de alpaca. *Ecología Aplicada* **15**(2), 133-142 (2016)
 33. R. Peralta. Determinación de parámetros óptimos en la producción de fast biol usando excretas de ganado lechero del establo de la UNALM. Tesis de Grado, Facultad de Ciencias-Biología. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú (2010)
 34. E. Iglesias, V. Pérez. Determination of maturity indices for city refuse compost. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **38**, 331-343 (1992)
 35. AOAC (Association Official Analytical Chemists). *Codex-Adapted 942.15* (1998)
 36. ICMSF (International Commission on Microbiological for Food). Segunda Edición. **1** Part II. Editorial Acribia (1983)
 37. APHA. *Compendium of Methods for the Microbiological Examination of Foods*. 3rd Edition, American Public Health Association, Washington DC, 1992
 38. J.C. Cabanis, M.T. Cabanis, V. Cheynier, P.L. Teissendré. Tablas de composición. En “*Enología: fundamentos científicos y tecnológicos*». En: C. Flanzky (ed.): 218-231, AMV Ediciones y Mundi Pressa. Madrid (2000)
 39. P. Ribéreau-Gayon, D. Dubordieu, B. Donèche, A. Lonvaud. *Handbook of Enology Vol. 1: The microbiology of wine and vinifications*, John Wiley & Sons Ltd. (2000a)
 40. A.B. Moldes, M. Vázquez, J.M. Domínguez, F. Díaz-Fierros, M.T. Barral. Negative effect of discharging vinification lees on soils. *Bioresource Technol.* **99**, 5991-5996 (2008)
 41. J. Hungría. Reciclaje de residuos y subproductos derivados de la industria vitivinícola. Tesis Doctoral, Universidad de Córdoba, España (2019)
 42. J.M. Salgado, E.M. Carballo, B. Max, J.M. Domínguez. Characterization of vinasses from five certified brands of origin (CBO) and use as economic nutrient for the xylitol production by *Debaryomyces hansenii*. *Bioresource Technol* **101**(7), 2379-2388 (2010)
 43. P. Inca, E. Vargas. Tratamiento anaerobio de las vinazas provenientes de la industria Pisquera mediante reactores UASB a escala piloto. Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería Ambiental- Ingeniería Sanitaria Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú (2010)
 44. M.E. García. Determinación Voltamperométrica de hierro en vinos. Tesis de Maestría, Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias, Universidad de Valladolid (2017)
 45. K. Chander, P.C. Brookes, S.A. Harding. Microbial biomass dynamics following addition of metal-enriched sewage sludges to a sandy loam. *Soil Biology and Biochemistry* **27**, p.1409-1421 (1995)
 46. Yruela. Copper in plants. *Braz. J. Plant Physiol* **17**(1), 145-156 (2005)
 47. R. Hänsch, R.R. Mendel. Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl). *Curr Opin Plant Biol* **12**(3), 259-266 (2009)
 48. J. David, J., N. Gary. Formation of volatile compounds during fermentation of soya beans *bacillus subtilis*. *J. Sci. F. Agri.* **74**(8), 132–140 (1997)
 49. J.A. Félix, R.R. Sañudo, G.E. Rojo, R. Martínez, V. Olalde. Importancia de los abonos orgánicos. *Ra Ximhai.* **4**(1), 57-67 (2008)
 50. Instituto Nacional de Calidad (INACAL). NTP 201.207:2020 FERTILIZANTES. Compost para uso agrícola. Requisitos. 1ª Edición (2020)
 51. Instituto Nacional de Normalización. Norma Chilena de Calidad de Compost (Norma Chilena Oficial 2880) (2004)
 52. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Manual de compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina Oficina Regional para América Latina y el Caribe Santiago de Chile (2013)
 53. P.H. Fallgren, L. Chen, M. Peng. Facultative-anaerobic microbial digestion of coal preparation waste and use of effluent solids to enhance plant growth in a sandy soil. *Int J Coal Sci Technol* **8**, 767–779 (2021)
 54. BOE-A-2017-14332. Real Decreto 999/2017. Regulación española sobre productos fertilizantes (2017)
 55. Wallace. Acid and acid-iron fertilizers for iron-deficiency control in plants. *J. Plant Nutr.* **11**, 1311-1319 (1988)

56. Instituto Nacional de Investigación Agraria (INIA). Producción y uso del biol. Folleto. Serie N° 2: Tecnologías apropiadas para la conservación in situ de los cultivos nativos. Lima, Perú, 1era edición (2008)
57. N. Zamora. Evaluación de coadyuvantes botánicos y abono orgánico (Biol) enriquecido con minerales en el cultivo de Col Brassica oleracea var. Capitata (2013)
58. L. Bonten, K. Zwart, R. Rietra. Bio-slurry as fertilizer. SNV Netherlands Development Organisation. 50 p. (2014)
59. B. Puyuelo, S. Ponsa, T. Gea, A. Sánchez, A. Determining C/N ratios for typical organic wastes using biodegradable fractions. *Chemosphere* **85**(4), 653-650 (2011)
60. M.A. Rahman, H.B. Moller, C.K. Saha, M.M. Alam, R. Wahid, L. Feng, L. Optimal ratio for anaerobic co-digestion of poultry droppings and lignocellulosic-rich substrates for enhanced biogas production. *Energy Sustain Dev* **39**, 59-66 (2017)
61. J. Jara-Samaniego, M.D. Pérez-Murcia, M.A. Bustamante, A. Pérez-Espinoza, C. Paredes, D.B. López-Lluch, I. Gavilanes-Terán, M. Moral, M. Composting as sustainable strategy for municipal solid waste management in the Chimborazo Region, Ecuador: Suitability of the obtained composts for seedling production. *J Clean Prod.* **141**, 1349-1358 (2017)
62. M. Paredes-Mendoza, D. Espinosa-Victoria. Ácidos orgánicos producidos por rizobacterias que solubilizan fosfato: una revisión crítica. *Terra Latinoamericana* **28**(1), 61-70 (2010)
63. Akhiar, A. Battimelli, M. Torrijos, H. Carrere, H. Comprehensive characterization of the liquid fraction of digestates from full-scale anaerobic co-digestion. *Waste Manage* **59**, 118-128 (2017)
64. L. García. Uso de bacterias probióticas en el ensilado de residuos de pescado. Tesis de Grado, Facultad de Ciencias-Biología. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú (2008)
65. X. Zhang, X., A. Al-Dossary, A., M. Hussain, M., P. Setlow, P., J. Li. Applications of *Bacillus subtilis* Spores in Biotechnology and Advanced Materials. *Applied and environmental microbiology* **86**(17), e01096-20 (2020)
66. F. Champagnol. Rajeunir le diagnostic foliare. *Progrès Agric. Vit.* (**107**), 343-351(1990)
67. D. Neukirchen. NutrientManagement for grapes. Yara (Norkshydro Research Center Hanninghof). Congreso Internacional de uva de mesa, Cape Town, South Africa. 12-22 (2003)
68. MARM (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino). Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España. Parte II, P.259 (2010)
69. P. Gil Montenegro, D. Knopp, D. Acciones para una vitivinicultura sustentable e inocua. Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Pontificia Universidad Católica de Chile, 152 pp (2020)