

EN

Determination of the physicochemical properties of agave (*Agave angustifolia* Haw.) bagasse digests obtained with biodigester bales

ES

Determinación de parámetros físicos y químicos de digeridos de bagazo de agave (*Agave angustifolia* Haw.) obtenidos con pacas biodigestoras

José Antonio Mendoza Rossano¹; Javier Cruz Hernández²; Lusmila Herrera Pérez^{3*}

¹Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, Facultad de Ingeniería en Agronomía, 21 Sur, núm. 1103, Barrio Santiago, Puebla, Puebla, C. P. 72410. México.

²Colegio de Postgraduados, Campus Puebla, Boulevard Forjadores de Puebla núm. 205, Santiago Momoxpan, San Pedro Cholula, C.P. 72760, Puebla, México.

³Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, Facultad de Ingeniería Ambiental. 21 Sur, núm. 1103 Barrio Santiago, Puebla, Puebla, C. P. 72410. México.

*Corresponding autor:
lusmila.herrera@upaep.mx
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1579-2795>

Received: February 8, 2023 /
Accepted: October 17, 2023

DOI:
10.5154/r.rchsagt.2023.03.10

Abstract

The mezcal industry generates solid waste called bagasse, which has a negative impact on the soil when it is incinerated or spread in streams, ravines, and on the plantations themselves. The use of this waste in small mezcal factories is incipient. One strategy to valorize bagasse is to produce organic fertilizer using biodigester bales. The objective was to evaluate the efficiency of degradation of agave bagasse and animal waste in biodigester bales for alternative management in mezcal factories and application in agricultural soils. Four treatments (bales) were established with two replicates, in different mixtures (manure, chicken manure, and domestic waste) and bagasse alone. The parameters evaluated during the decomposition process were pH, temperature, humidity, weight, and volume, over a period of five months, and at the end of the process: organic matter, macroelements (N.P.K), and pH, in accordance with NOM-021-RECENAT-2000. The product generated (organic fertilizer) was compared with three official standards to produce soil improvers, composts, and organic solid waste derivatives. The results indicate that bagasse alone obtained higher parameters that meet the essential requirements established in the Standards. In conclusion, bagasse digestate can be considered a soil improver, and the biodigester bale is a suitable waste management option for mezcal farmers.

Keywords: Degradation, efficiency, organic matter; soil improver, residues.

Resumen

La industria mezcalera genera el residuo sólido denominado bagazo, este ocasiona un impacto negativo en el suelo cuando es incinerado o esparcido en arroyos, barrancas y en las mismas plantaciones. El aprovechamiento de este residuo en las fábricas pequeñas de mezcal es incipiente. Una estrategia para valorizar el bagazo es producir abono orgánico mediante pacas biodigestoras. El objetivo fue evaluar la eficiencia de degradación del



Please cite this article as follows (APA 6): Mendoza Rossano, J. A., Cruz Hernández, J., & Herrera Pérez, L. (2023). Determination of the physicochemical properties of agave (*Agave angustifolia* Haw.) bagasse digests obtained with biodigester bales. *Revista Chapingo Serie Agricultura Tropical*, 3(2). doi: <https://doi.org/10.5154/r.rchsagt.2022.03.10>

bagazo de agave y desechos de animales en pacas biodigestoras para su manejo alternativo en las fábricas de mezcal y aplicación en suelos agrícolas. Se establecieron cuatro tratamientos (pacas) con dos repeticiones, en diferentes mezclas (estiércol, gallinaza y residuos domésticos) y bagazo en solitario. Los parámetros evaluados durante el proceso de descomposición fueron: pH, temperatura, humedad, peso, volumen, en un periodo de cinco meses y al término del proceso: materia orgánica, macroelementos (N.P.K) y pH, de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000. El producto generado (abono orgánico) se comparó con tres Normas Oficiales referentes a la elaboración de mejoradores de suelos, compostas y derivados de residuos sólidos orgánicos. Los resultados indican que el bagazo en solitario obtuvo mayores parámetros que cumplen con los requerimientos esenciales establecidos en las Normas. En conclusión, el digerido de bagazo se puede considerar como un mejorador de suelo y la paca biodigestora como una opción de manejo adecuado del residuo para los mezcaleros.

Palabras clave: Degradación, eficiencia, materia orgánica, mejorador de suelo, residuos.

Introduction

Mezcal is a representative native beverage of Mexico and has the Denomination of Origin of Mezcal (DOM). There are currently 13 states that have the DOM, specifically the state of Puebla, which was granted in 2015. The national production of mezcal in 2022 was 14 165 505 L, which meant an increase of 75 % compared to 2021 (8 million) (Consejo Mexicano Regulador de la Calidad del Mezcal COMERCAM, 2023). Although mezcal production is mainly artisanal, the current increase in demand has driven the industrialization of its production which has caused negative ecological and social effects (Bautista et al., 2015). Mezcal is obtained mainly from two species, *Agave angustifolia* and *A. potatorum*. Regarding biological richness, the state of Oaxaca is the most representative with 58 species, of which 13 are endemic (Villalobos, 2020), while the state of Puebla has around 35 species (Villaseñor, 2016).

Despite the economic resources generated by mezcal production, its production generates waste, with varied characteristics and production volumes. The two wastes with the greatest impact are vinasse and bagasse. Bagasse is a solid waste made up of coarse fibers composed mainly of cellulose, hemicellulose and lignin (González-García et al., 2005), and it is directly related to the volume of production.

The state of Puebla in 2022 represented the second place in the production of the beverage with a commercialization of 278 625.93 L which corresponded to 3.4 % at the national level (COMERCAM, 2023). The resulting amount of bagasse varies by the type of milling, distillation and species, in this sense, the production of bagasse waste in mezcal species such as *A. angustifolia*, *A. potatorum*, *A. karwinskii* and *A.*

Introducción

El mezcal es una bebida originaria representativa de México y cuenta con Denominación de Origen del Mezcal (DOM). Actualmente son 13 estados que cuentan con la DOM, específicamente el estado de Puebla que le fue otorgado en 2015. La producción nacional de mezcal en el año 2022 fue de 14 165 505 L, lo que significó un aumento del 75 % respecto a 2021 (8 millones) (Consejo Mexicano Regulador de la Calidad del Mezcal [COMERCAM], 2023). Si bien, la producción de mezcal se realiza principalmente de forma artesanal, el aumento actual en la demanda ha impulsado la industrialización de su producción lo que ha originado efectos negativos ecológicos y sociales (Bautista et al., 2015). El mezcal se obtiene principalmente de dos especies *Agave angustifolia* y *A. potatorum*. Respecto a la riqueza biológica, el estado de Oaxaca es el más representativo con 58 especies, de las cuales 13 son endémicas (Villalobos, 2020), por su parte, el estado de Puebla cuenta con alrededor de 25 especies (Villaseñor, 2016).

A pesar de la derrama de recursos económicos que implica la producción de mezcal, en su elaboración se generan residuos, con características y volúmenes de producción variados. Los dos residuos de mayor impacto son las vinazas y el bagazo. Este último es un residuo sólido formado por fibras gruesas compuestas de celulosa, hemicelulosa y lignina principalmente (González-García et al., 2005), y está directamente relacionado con el volumen de producción.

El estado de Puebla en 2022 representó el segundo lugar de producción de la bebida con una comercialización de 278 625.93 L que correspondió al 3.4 % a nivel nacional (COMERCAM, 2023). La cantidad resultante de

marmorata originates between 5.63 to 12.83 kg·L⁻¹ of mezcal (Flores-Ríos et al., 2020). That is, an average of 9 kg·L⁻¹ of bagasse is produced; therefore, approximately 2 507 tons were produced in Puebla in 2020.

Bagasse waste is biodegradable; however, the production volumes are high and the management is insufficient. Bagasse is incinerated or disposed of in rivers and streams causing a negative impact on the environment (Martínez et al., 2013) or it is spread directly on the plantations or ravines surrounding the factories. These actions cause corrosion in soils promoting its alteration, due to the concentration of sugars, alcohols, and humidity contained in bagasse and the high amount dumped in soils (Hoz-Zavala & Nava, 2017).

Therefore, strategies have been proposed to minimize the impact of this waste and, at the same time, valorize it, for example: production of biopolymers and carbohydrases, phenolic compounds, biohydrogen, biogas and bioethanol; when used as a substrate under fermentative processes: compost for the production of substrates to produce agave seedlings, production of activated carbon (González-García et al., 2005; Crespo-González et al., 2013; 2018; Pérez et al., 2018; Estrada-Maya & Weber, 2022), raw material for brick manufacturing and mattress filling, as well as fuel in boilers and forage for poultry and livestock (Iñiguez et al., 2011) and in mezcal factories themselves (Chávez & Hinojosa, 2010). In the biotechnology industry, it has been used to obtain pulp for the production of paper, cardboard, cork and as a substrate for mushroom cultivation (Chairez et al., 2015).

It is important to highlight the economic and technological feasibility of implementing management techniques, which are based on the cost-benefit ratio (González-García et al., 2005). In this sense, an easy management option is the implementation of the biodigester bale ecotechnique, proposed by Silvia-Pérez (2012). The biodigester bale ecotechnique is an ecological process with a chemical phase in which domestic waste is managed, eliminating contamination by toxic gases, leachates, and vectors through a fermentation process that generates alcohol and acetic acid that avoid methane production and nitrogen loss (Silvia-Pérez, 2018), in addition, the biodigester bale is an alternative to minimize greenhouse gas (GHG) emission, derived from substituting compost as a soil amendment (Peñalosa Bernal & Ossa Carrasquilla, 2023). Different studies have evidenced the ecological benefits of the facultative anaerobic process carried out in biodigester bales, being an alternative to traditional compost (Velázquez et al., 2017).

bagazo varía por tipo de molienda, destilación y especie, en este sentido, la producción del residuo bagazo en especies mezcaleras como *A. angustifolia*, *A. potatorum*, *A. karwinskii* y *A. marmorata* originan entre 5.63 a 12.83 kg·L⁻¹ de mezcal (Flores-Ríos et al., 2020). Es decir, en promedio se genera de bagazo 9 kg·L⁻¹, por lo tanto, en Puebla en el año 2020 fueron producidas 2507 t aproximadamente.

El bagazo es un residuo biodegradable, sin embargo, los volúmenes de producción son altos y el manejo es insuficiente. El bagazo es incinerado o desechado en ríos y arroyos ocasionando un impacto negativo al medio ambiente (Martínez et al., 2013) o es esparcido directamente en las plantaciones o barrancas aledañas a las fábricas. Estas acciones provocan corrosión en los suelos promoviendo su alteración, debido a la concentración de azúcares, alcoholes y humedad que contiene el bagazo y a la elevada cantidad que se vierte en los suelos (Hoz-Zavala y Nava, 2017).

Por lo anterior, se han planteado estrategias que minimizan el impacto de este residuo y a su vez lo valoricen, por ejemplo: producción de biopolímeros y carbohidrasas, compuestos fenólicos, biohidrógeno, biogás y bioetanol; cuando se utiliza como sustrato bajo procesos fermentativos: composta para la producción de sustratos para producir plántulas de agave, producción de carbón activado (González-García et al., 2005; Crespo-González et al., 2013; 2018; Pérez et al., 2018; Estrada-Maya y Weber, 2022), materia prima para fabricación de ladrillos y relleno de colchones, así como combustible en calderas y forraje para aves y ganado (Iñiguez et al., 2011) y en las mismas fábricas de mezcal (Chávez e Hinojosa, 2010). En la industria biotecnológica, se ha aprovechado en la obtención de pulpa para la elaboración de papel, cartón, corcho y como sustrato en el cultivo de setas (Chairez et al., 2015).

Es importante destacar la factibilidad económica y tecnológica de la implementación de técnicas de manejo, las cuales están en función a la relación costo-beneficio (González-García et al., 2005). En este sentido, una opción de fácil manejo es la implementación de la ecotecnia de pacas biodigestoras, propuesta por Silva-Pérez (2012). La ecotecnia paca biodigestora es un proceso ecológico con una fase química en la cual se realiza un manejo de los residuos domésticos, eliminando la contaminación por gases tóxicos, lixiviados y vectores, mediante un proceso de fermentación que genera alcohol y ácido acético que evita la producción de metano y la pérdida de nitrógeno (Silva-Pérez, 2018), además la paca biodigestora es una alternativa para minimizar las emisiones de los gases

Meanwhile, Sosa et al. (2016) indicate that the use of animal by-products (compost and manure) and pastures is a viable option for the fertility of agricultural soils, because they improve the physical and biological conditions of the soil and their correct use could avoid a source of contamination. Therefore, it is important to know their quality, proper use and physical and chemical composition to prevent possible damage to the soil and negative environmental impacts.

One way to use this waste could be through its co-digestion in biodigester bales together with mezcal bagasse waste. In this sense, biodigester bales have been developed by mixing grass with domestic waste, which indicates that it could also be carried out with agave bagasse and not only domestic waste but also those of animal origin or agricultural uses.

Therefore, the objective of this research was to determine the degradation efficiency of agave bagasse (*Agave angustifolia* Haw.) in biodigester bales alone and together with different wastes, by evaluating the physicochemical properties, for its alternative management in mezcal factories and its subsequent use as a soil improver in agave plantations.

Methodological approach

Experimental site and characteristics of the study area

The experiment was conducted at Rancho San Bernardino, located in the municipality of Oriental in the state of Puebla, Mexico, located between the coordinates 19° 41' 76" North latitude and -97° 56' 35" West longitude, the municipality represents 0.7 % of the state surface (INEGI, 2009) (Figure 1).

The experimental site has a yearly average temperature that ranges from 12 to 16 °C. The climate is semi-dry temperate (93 %) and sub-humid temperate with summer rains (7 %). 55 % of the municipality's surface area is not suitable for agriculture (Forecast; INEGI, 2009; INEGI, 2017).

Implementation and measurement of biodigester bale parameters

Biodigester bales were constructed based on the methodology of Ardila-Delgado et al. (2015) and Velázquez et al. (2017) using agave bagasse as raw material and domestic waste, chicken manure, and manure as co-digester supplement. Four treatments (N=4) were installed in duplicate (N=2), for a total of eight biodigester bales (N=8), for five months (March-August,

de efecto invernadero (GEI), derivado de sustituir el abono como enmienda para suelos (Peñalosa Bernal y Ossa Carrasquilla, 2023). Diferentes estudios han evidenciado los beneficios ecológicos que conlleva el proceso anaeróbico facultativo que se lleva a cabo en las pacas biodigestoras, siendo una alternativa a la composta tradicional (Velázquez et al., 2017).

Por su parte Sosa et al. (2016), indican que emplear subproductos de origen animal (composta y estiércol) y pasturas, es una opción viable para la fertilidad de suelos agrícolas, debido a que mejoran las condiciones físicas y biológicas del suelo y además su correcto uso podría evitar una fuente de contaminación. Por lo tanto, es importante conocer su calidad, adecuada utilización y la composición física y química para prevenir posible daño al suelo e impactos ambientales negativos.

Una manera de utilizar estos residuos puede ser a través de su codigestión en pacas biodigestoras en conjunto con bagazo de mezcal. En este sentido, se han desarrollado pacas biodigestoras mezclando pasto con residuos domésticos, lo que indica que podría llevarse a cabo también con bagazo de agave y no solo residuos domésticos si no también aquellos de origen animal u otros usos agrícolas.

Es por ello, que el objetivo de esta investigación fue determinar la eficiencia de la degradación del bagazo de agave (*Agave angustifolia* Haw.) en pacas biodigestoras en solitario y en conjunto con diferentes residuos, mediante la evaluación de las propiedades fisicoquímicas, para su manejo alternativo en las fábricas de mezcal y su uso posterior como mejorador de suelos en plantaciones de agave.

Enfoque metodológico

Sitio de experimentación y características del área de estudio

La experimentación fue conducida en el Rancho San Bernardino ubicado en el municipio de Oriental del estado de Puebla, México, ubicado entre las coordenadas 19° 41' 76" Latitud norte y -97° 56' 35" Longitud occidental, el municipio representa el 0.7 % de la superficie estatal (INEGI, 2009) (Figura 1).

El sitio de experimentación cuenta con una temperatura media anual que oscila entre 12 a 16 °C. El clima es semiseco templado (93 %) y templado subhúmedo con lluvias en verano (7 %). El 55 % de la superficie del municipio no es apta para la agricultura (Prontuario; INEGI, 2009; INEGI, 2017).

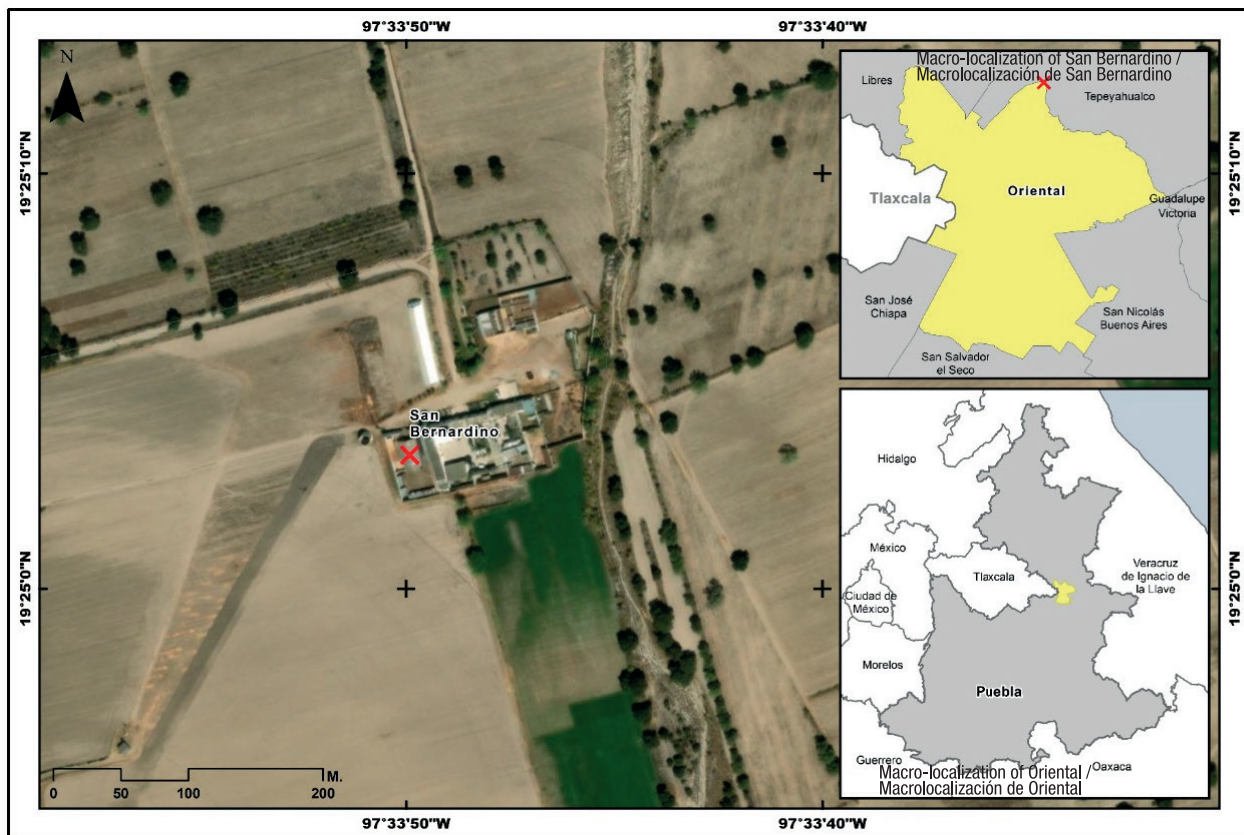


Figure 1. Geographic location of Rancho San Bernardino Oriental, Puebla.
Figura 1. Ubicación geográfica del Rancho San Bernardino, Oriental, Puebla.

Source: Own elaboration with data of INEGI, 2022.
 Fuente: Elaboración propia con datos del INEGI, 2022.

2021), the replicate system was maintained for all analyses. The agave bagasse was obtained from mezcal producers in the municipality of Tecali de Herrera in the state of Puebla and corresponded to the *Agave angustifolia* species.

The treatments BBM: Bagasse bale with manure and BBCM: Bagasse bale with chicken manure, consisted of a total mass of 225 kg of waste for biodigestion with a distribution and weight ratio of 1.25:1 agave bagasse; animal waste, that is, 125 kg of agave bagasse per 100 kg of waste. A 225 kg bale was installed exclusively with bagasse (BBA). For the BBDW: Bagasse bale with domestic waste, the ratio was not equal due to the difficulty of collecting the waste, therefore, the ratio was 1.25:0.5, corresponding to 125 kg of bagasse and 50 kg of domestic waste, all treatments with two replications.

The construction of the eight bales was carried out according to Silvia-Pérez (2012), with four wooden molds (1m x 1m) a 1 m³ was formed where the waste

Implementación y medición de parámetros en las pacas biodigestoras

Se construyeron pacas biodigestoras con base a la metodología de Ardila-Delgado et al. (2015) y Velázquez et al. (2017) tomando como materia prima el bagazo de agave y como suplemento para codigerir, residuos domésticos, gallinaza y estiércol de ganado bovino. Se instalaron cuatro tratamientos (n=4) por duplicado (n=2), para un total de ocho pacas biodigestoras (N=8), por un periodo de cinco meses (marzo-agosto, 2021), el sistema de réplicas se mantuvo para todos los análisis. La obtención del bagazo de agave procedió de productores de mezcal del municipio de Tecali de Herrera del estado de Puebla y correspondió a la especie *Agave angustifolia*.

Los tratamientos PBE: Paca de bagazo con estiércol de ganado bovino y PBG: Paca de bagazo con gallinaza, consistieron en una masa total de 225 kg de residuos para biodigestar con distribución y proporción en peso de 1.25:1 bagazo de agave: residuo animal, es decir,

was added in layers, that is, the bagasse in the perimeter and in the core or center the waste in wet mass. Subsequently, they were compacted manually for approximately 10 or 15 minutes for each layer, until the waste was compacted and at the end the wooden mold was removed (Figure 2).

Physicochemical parameter evaluated during the biodigestion process

The pH, humidity, weight and volume of each biodigester bale were determined at the beginning and end of the biodigestion process. Only the temperature was also determined 15 days after installation and every month thereafter, for a total period of five months.

The pH of the bales was determined *in situ* at the beginning of bale installation and every month thereafter, using a 1:1 (w/v) suspension of distilled water and solid material, that is, 100 g of biodigested material extracted from the core of each bale and 100 mL of distilled water (Dahlgren & Walker, 1994), utilizing a potentiometer (PH/MV/°C, with Hanna Instruments electrode).

A Brannan mercury thermometer (-1/260 °C) was used to measure the temperature, which was inserted in three points of the bale; ambient temperature, that is, above the bale, internal, in the center or core, and the environment at a depth of 10 cm. To obtain the percentage of humidity in the bale, the calculation was based on Standard NMX-F-525-1992, which is used in the sugar industry for the determination of humidity in samples of sugarcane bagasse, for this purpose, samples were taken from the core and the perimeter of the solid material of the bale, these samples were dehydrated with the use of a microwave oven and the calculation was made by weight differences, subtrac-

125 kg de bagazo de agave por 100 kg de residuos. Se instaló una paca de 225 kg exclusivamente con bagazo (PBA). Para la PBRD: Paca de bagazo con residuos domésticos, la proporción no fue igual debido a la dificultad de la recopilación del residuo, por lo tanto, la relación fue de 1.25:0.5, correspondiente a 125 kg de bagazo y 50 kg de residuos domésticos, todos los tratamientos con dos repeticiones.

La construcción de las ocho pacas se realizó de acuerdo con Silva-Pérez (2012), con cuatro moldes de madera (1m x 1m) se formó un cubo de 1 m³ donde se agregaron los residuos en capas, es decir, el bagazo en el perímetro y en el núcleo o centro los residuos en masa húmeda. Posteriormente fueron compactadas de forma manual entre 10 a 15 minutos por cada estrato aproximadamente, hasta observar compactado el residuo y al final el molde de madera fue retirado (Figura 2).

Parámetros fisicoquímicos evaluados durante el proceso de biodigestión

Se determinó el pH, humedad, peso y volumen de cada paca biodigestora al inicio y al final del proceso de biodigestión. Solo la temperatura fue también determinada a los 15 días después la instalación y posteriormente cada mes, por un periodo total de cinco meses.

El pH de las pacas se determinó *in situ* al inicio de la instalación de las pacas y posteriormente cada mes, a través de una suspensión 1:1 (p/v) agua destilada y material sólido, es decir, 100 g de material en biodigestión extraído del núcleo de cada paca y 100 mL de agua destilada (Dahlgren y Walker, 1994), mediante un potenciómetro (PH/MV/°C, con electrodo de Hanna Instruments).



Figure 2. Installation of biodigester bales with different animal waste mixtures.

Figura 2. Instalación de pacas biodigestoras con diferentes mezclas de desechos animales.

ting the initial humidity from the final (dried) humidity. The total weight of the waste was obtained with the Advance RH BAPLE 100 kg digital commercial scale and the volume with a flexometer (5.5 m).

In addition, qualitative parameters were monitored, such as: the presence of arthropods, rodents, fungal growth, and organoleptic parameters: characteristic odor and coloration.

The monitoring periods were divided into three: at the beginning of the installation, during the co-digestion process and at the end, that is, at the end of the experiment. Therefore, at the beginning of the installation of the bales, data were collected on pH, humidity, temperature, weight and volume during the composting process in the biodigester bale and at the end, pH, humidity, temperature, weight and volume (Figure 3). At the end of the organic degradation process (five months), the physicochemical characteristics of each bale were evaluated through a core sample.

Analysis of the physical and chemical properties of the final substrate

The 11 parameters were evaluated according to the analytical determinations established in the "NOM-021-RECNAT-2000, which establishes the specifications for fertility, salinity and soil classification, studies, sampling and analysis". In each sample (two per treatment) the pH (AS-02 with potentiometer), electrical conductivity (EC) (AS-18, with a conductivity meter), bulk density (Bde) (AS-03 with kerosene) were determined in duplicate, organic matter content (Om) by Walkley and Black's method, total nitrogen (MicroKjeldahl), C/N ratio by Bray Kurtz n° I, potassium, sodium and calcium, with ammonium acetate and zinc by diethylene triamine pentaacetic acid extraction (DTPA). The analysis was carried out at the Nutrition Laboratory of the Postgraduate College, Montecillo campus.

Para la medición de la temperatura se utilizó un termómetro de mercurio (-10/260 °C) de la marca Brannan, el cual se insertó en tres puntos de la paca: temperatura ambiente, es decir, encima de la paca, interna, en el centro o núcleo y del entorno a 10 cm de profundidad. Para obtener el porcentaje de humedad en la paca el cálculo se basó en la Norma NMX-F-525-1992, la cual es empleada en la industria azucarera para la determinación de humedad en muestras de bagazo de caña de azúcar, para ello, se tomaron muestras del núcleo y del perímetro del material sólido de la paca, dichas muestras fueron deshidratadas con el uso del horno de microondas y el cálculo se realizó por diferencias de peso, restando la humedad inicial de la final (desechada). El peso del total de los residuos se obtuvo con la báscula comercial digital Advance RH BAPLE 100 kg y el volumen con un flexómetro (5.5 m).

Aunado a lo anterior, se monitorearon parámetros cualitativos, tales como: presencia de artrópodos, roedores, crecimiento de hongos y organolépticos: olor característico y coloración.

Respecto a los periodos de monitoreo, estos se dividieron en tres: al inicio de la instalación, durante el proceso de codigestión y al final, es decir al levantamiento del experimento. Por lo tanto, al inicio de la instalación de las pacas, se recolectaron datos de: pH, humedad, temperatura, peso y volumen durante el proceso de compostaje en la paca biodigestora y al finalizar, pH, humedad, temperatura, peso y volumen (Figura 3). Al término del periodo de la degradación orgánica (cinco meses) se evaluaron las características fisicoquímicas de cada paca a través de una muestra del núcleo.

Análisis de las propiedades físicas y químicas del sustrato final

Los 11 parámetros se evaluaron de acuerdo con las determinaciones analíticas establecidas en la "NOM-



Figure 3. Measurement of temperature, pH, humidity, and weight of biodigester bales.
Figura 3. Medición de temperatura, pH, humedad y peso de las pacas biodigestoras.

Statistical analysis

The experimental design used was completely randomized, and the evaluation of the biodigester bales was four treatments (biodigester bales) with two replications, the data were processed with the statistical package SPSS (Statistical Package for the Social Science ver. 17th) and Excel. An ANOVA, comparison of means and Tukey tests were performed, with a confidence level of 0.05. A correlation analysis was performed between variables, as well as a principal component and cluster analysis, to group and differentiate the processed digests based on their physical and chemical characteristics. For this purpose, the variables were standardized and the De Ward method and Euclidean distance calculation were used as a measure of association, as indicated by Sánchez et al. (2013), with the use of the statistical software IfoStat 2020 free version 2008.

Results and discussion

Results of the parameter evaluated in the biodigestion process of agave bagasse in biodigester bales (Table 1).

pH. The pH values recorded during the monitoring of the bales did not show oscillations. The pH closest to neutrality was found in the BBCM and BBA (7.79 and 8.13). Crespo-González et al. (2013) report that the pH of agave bagasse compost ranges from 6.9 to 7.3, values observed in the BBA and BBCM.

Humidity. The bales in general showed fluctuations in the evaluation of internal humidity. In the initial phase of biodigestion, the average humidity was 29.69 % with a maximum of 45.70 % observed in the BBDW and a minimum average value of 11.40 % in the BBCM, which is evident, because the domestic waste contained higher humidity while the chicken manure was incorporated dehydrated. The final average humidity of the process was 6.45 %, with a maximum humidity obtained in the BB (9.63 %) and a minimum value of 4.33 % in the BBCM.

Temperature. Regarding the average environmental temperature during the five-month monitoring period, it was 24 °C. Regarding the internal temperature, Ardila-Delgado et al (2015) refer that this allows the identification of the mesophilic phase and that this facilitates effective composting, it is recommended that the temperature should be between 44 and 65 °C (Iñiguez et al., 2011); at the time of installation of the bales showed high temperatures between 36 and 45 °C, the bale that presented higher oscillations was the one corresponding to the BBCM, while in the BBDW the lowest temperatures on average resulted 36.5 °C.

021-RECENAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudios, muestreo y análisis". En cada muestra (dos por tratamiento) por duplicado se determinó el pH (AS-02 con potenciómetro), conductividad eléctrica (CE) (AS-18, con un conductímetro), Densidad aparente (Dap) (AS-03 con parafina), contenido de materia orgánica (mo) con el método de Walkley y Black, nitrógeno total (MicroKjeldahl), relación C/N por el método de Bray Kurtz n° I, potasio, sodio y calcio, con acetato de amonio y zinc por extracción ácido dietilenotriaminopentaacético (DTPA). El análisis se realizó en el Laboratorio de Nutrición del Colegio de Postgraduados, campus Montecillo.

Análisis estadístico

El diseño experimental que se utilizó fue completamente al azar, la evaluación de las pacas biodigestoras fue de cuatro tratamientos (pacas biodigestoras) con dos repeticiones, los datos se procesaron con el paquete estadístico SPSS (Statistical Package for the Social Sciences ver. 17) y Excel. Se realizó un ANOVA, comparación de medias y pruebas de Tukey, con un nivel de confianza de 0.05. Se realizó un análisis de correlación entre variables, así como un análisis de componentes principales y de conglomerados, para agrupar y diferenciar los digeridos elaborados con base en sus características físicas y químicas, para ello, se estandarizaron las variables y se usó el método De Ward y por cálculo de distancia Euclideana como medida de asociación, como lo indica Sánchez et al. (2013), con el uso del software estadístico IfoStat 2020 versión libre 2008.

Resultados y discusión

Resultados de los parámetros evaluados en el proceso de biodigestión del bagazo de agave en las pacas biodigestoras (Cuadro 1).

pH. Los valores de pH registrado durante el monitoreo de las pacas no mostraron oscilaciones. El pH más cercano a la neutralidad se encontró en la PBG y PBA (7.79 y 8.13). Crespo-González et al. (2013) refieren que el pH de composta de bagazo de agave presenta rangos que van de 6.9 a 7.3, valores observados en las PBA y PBG.

Humedad. Las pacas en general mostraron fluctuaciones en la evaluación de la humedad interior. En la fase inicial de la biodigestión, la humedad promedio fue de 29.69 % con una máxima de 45.70 % observada en la PBRD y un valor mínimo promedio de 11.40 % en la PBG, lo cual es evidente, debido a que los residuos domésticos contenían mayor humedad mientras que la gallinaza se incorporó deshidratada. La humedad

Table 1. Parameters evaluated in the agave bagasse biodigestion process in the biodigester bales of the four treatments.
Cuadro 1. Parámetros evaluados en el proceso de biodigestión bagazo de agave en las pacas biodigestoras de los cuatro tratamientos.

Parameter / Parámetro	Result / Resultado
pH	pH close to neutrality BBCM (7.79) and BBA (8.13). / pH cercano a la neutralidad PBG (7.79) y PBA (8.13).
Humidity / Humedad	Average final humidity 6.45 %, maximum humidity in BB (9.63 %) and minimum 4.33 % in the BBCM. Average initial humidity 29.69 %, maximum 45.70 %. / Humedad promedio final 6.45 %, humedad máxima en PB (9.63 %) y la mínima 4.33 % en la PBG. Humedad inicial promedio de 29.69 %, máxima de 45.70 %.
Temperature / Temperatura	Ambient temperature 24 °C. Internal temperature 36 °C and 45 °C, the BBCM presented higher oscillations, and the BBDW lower temperatures in average 36.5 °C / Temperatura ambiente 24 °C. Temperatura interna 36 °C y 45 °C, la PBG presentó oscilaciones más altas, y las PBRD temperaturas menores en promedio 36.5 °C.
Weight / Peso	Decrease on average at the end more than half (58 %). The bale with the highest degradation was the BBDW, from 175 to 75.39 kg on average, equivalent to 56.92 %, the BBM and BBCM were reduced by 27.89 and 33.32 % respectively. / Disminución en promedio al final más de la mitad (58 %). La paca con mayor degradación fue la PBRD, de 175 a 75.39 kg en promedio, equivalente al 56.92 %, las PBE y PBG se redujo en un 27.80 y 33.32 % respectivamente.
Volume / Volumen	The initial volume was 1m ³ , the BBM represented a greater decrease with respect to the other three, the BBM was reduced from 41 to 33 cm at the end of the process, with a reduction of 8 cm. / El volumen inicial fue 1m ³ , la PBE representó una mayor disminución respecto a las otras tres, la PBE se redujo de 41 a 33 cm al final del proceso, con una reducción de 8 cm.

The temperature began to decrease significantly when the fermentation and degradation stage began to decrease; however, this parameter depended on each biodigester bale after one month of installation. It is important to note that the average internal temperature was different by four degrees with respect to the external temperature from the first month until the final phase of the evaluation, in agreement with Ardila-Delgado et al. (2015), the external temperature presented a behavior analogous to the ambient temperature, therefore, the temperature of the environment does not affect the biodigestion process.

Weight. At the end of the waste biodigestion process, the weight of the bales decreased on average by more than half (58 %). The bale with the greatest degradation in weight was the BBDW, which went from 175 to 75.39 kg on average, equivalent to 56.92 %, possibly in the bales with domestic waste that were in the process of decomposition with a high degree of humidity, which generates leachates in wet waste. The BBM and BBMC bales reduced the least weight by 27.80 and 33.32 % respectively.

promedio final del proceso fue de 6.45 %, con una humedad máxima obtenida en la PB (9.63 %) y un valor mínimo de 4.33 % en la PBG.

Temperatura. Respecto a la temperatura ambiental promedio en el periodo de cinco meses de monitoreo fue de 24 °C. Respecto a la temperatura interna refiere Ardila-Delgado et al. (2015) que esta permite identificar la fase mesofílica, y que esta facilita un compostaje eficaz, se recomienda que la temperatura debe estar entre 44 y 65 °C (Íñiguez et al., 2011) al momento de la instalación de las pacas mostraron temperaturas altas entre 36 y 45 °C, la paca que presentó oscilaciones más altas fue la correspondiente a la PBG, mientras que en la PBRD las temperaturas menores en promedio resultaron de 36.5 °C.

La temperatura inició su descenso significativo cuando empezó a disminuir la etapa de fermentación y degradación, sin embargo, este parámetro dependía de cada paca biodigestora al mes de instaladas. Es importante señalar que el promedio de la temperatura interna resultó diferente en cuatro grados con respecto a la

Volume. Both weight and volume decreased gradually with degradation. The initial volume was one meter by one meter (1 m^3), at the end of monitoring, the bales decreased in height. The BBM represented a greater decrease with respect to the other three bales, in this sense, the BBM was reduced from 41 cm to 33 cm at the end of the composting process, that is, it was reduced by 8 cm (19.5 %).

The reduction of weight and volume derived from the microbial biodigestion process in the piles results in a beneficial effect, because they allow reducing the amount of waste in places where they can cause pollution and manages to convert waste into a useful product for agriculture as mentioned by Sánchez et al. (2019).

In the visual parameters, arthropods were identified (larvae of coleopteran of the genus *Phyllophaga*, dermaptera commonly called earwigs and hemipteran called mealybugs), which were found in greater population density in the BBA, this is due to the absence of natural enemies (fungi, nematodes, bacteria, birds, reptiles, insects and spiders) that perform a biological control. As for the organoleptic parameters, only at the beginning were characteristic odors emitted by the waste used; however, in the intermediate period and at the end of the compost generation, no odors were present after the third month.

Analysis of the physical and chemical properties of the final digestates

The physicochemical properties derived from the laboratory analysis of the biodigested products generated in the bales were analyzed (Tables 2 and 3).

In the physical and chemical characterization of the digests obtained from the bales, pH and electrical conductivity (EC) showed significant differences between samples. The results of the analysis indicate that there are significant statistical differences in eight parameters. While for the variables nitrogen (N) ($P = > 0.914$), M.O ($P = > 0.104$) and C:N ratio ($P = > 0.104$) there were no differences (Table 2).

As can be seen in Table 3, the digests of BB ($2.92 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) and BBDW ($3.79 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) bales presented EC values within or around the range of 0.75 to $3.49 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ recommended for soilless plant cultivation indicated by Abad (1992), cited by Crespo-González et al. (2013). It should be noted that potential organic fertilizers for seed germination and plant development should present a value equal to or less than $3 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (Velázquez et al., 2017). For their part, BBM and BBCM digests exceed the optimum EC value.

temperatura externa a partir del primer mes y hasta la fase final de la evaluación, en concordancia con Ardila-Delgado et al. (2015), la temperatura externa presentó un comportamiento análogo a la temperatura ambiente, por consiguiente, la temperatura del entorno no afecta el proceso de biodigestión.

Peso. Al final del proceso de biodigestión de los residuos, el peso en las pacas disminuyó en promedio a más de la mitad (58 %). La paca con mayor degradación en peso fue la PBRD, la cual pasó de 175 a 75.39 kg en promedio, equivalente al 56.92 %, posiblemente en las pacas con residuos domésticos se encontraban en proceso de descomposición con alto grado de humedad lo que genera lixiviados en residuos húmedos. Las pacas PBE y PBG fueron las que redujeron menor peso en un 27.80 y un 33.32 % respectivamente.

Volumen. Tanto el peso como el volumen decreció paulatinamente con la degradación. El volumen inicial fue de un metro por un metro (1 m^3), al final del monitoreo las pacas decrecieron en altura. La PBE representó una mayor disminución respecto a las otras tres pacas, en este sentido la PBE se redujo de 41 cm a 33 cm al final del proceso de compostaje, es decir se redujo en 8 cm (19.5 %).

La reducción de peso y volumen derivado del proceso de biodigestión microbiana en las pilas resulta un efecto benéfico, debido a que permiten disminuir la cantidad de desechos en lugares donde pueden provocar contaminación, y logra convertir los residuos en un producto útil para la agricultura como lo menciona Sánchez et al. (2019).

En los parámetros visuales, se identificaron artrópodos (larvas de coleóptero del género *Phyllophaga*, dermápteros comúnmente llamados tijerillas y hemípteros denominadas cochinillas), que se encontraron en mayor densidad de población en las PBA, esto se debe a la ausencia de enemigos naturales (hongos, nemátodos, bacterias, aves, reptiles, insectos y arañas) que realicen un control biológico. En cuanto a los parámetros organolépticos, solo al inicio se expidieron olores característicos a los residuos empleados, sin embargo, en el periodo intermedio y al final de la generación del abono, no se presentaron olores correspondientes a partir del tercer mes.

Análisis de las propiedades físicas y químicas de los digeridos finales

Se analizaron las propiedades fisicoquímicas derivadas del análisis de laboratorio de los productos digeridos generados en las pacas (Cuadro 2 y 3).

Table 2. Analysis of variance by the effect of bale type on physical and chemical characteristics evaluated in the final product.**Cuadro 2. Análisis de varianza por efecto de tipo de paca en características físicas y químicas evaluadas en el producto final.**

Parameters / Parámetros	Statistical measure / Medida estadística		
	Coeff. Of var. / Coef. De var.	Sum of squares / Suma de cuadrados	Pr > F
pH	8.108	3.308	0.008*
CE	56.916	90.3686269	0.009*
Da	19.313	0.18774875	0.022*
Ca ²⁺	12.236	78.6281007	0.010*
N	13.538	13.538	0.914
P	24.452	0.014228	0.012*
K	53.647	680.714402	0.040*
MO	31.051	191.203093	0.104
C:N ratio / Relación C:N	30.034	92.0141291	0.165
Zn	58.310	358.766728	0.013*
Na	58.552	40.0174552	0.019*

*Significant difference ($P < 0.05$).*Diferencia significativa ($P < 0.05$).**Table 3. Physical and chemical parameters of the final digestate of agave bagasse alone and in mixtures digested in bales.****Cuadro 3. Parámetros físicos y químicos del digerido final de bagazo de agave solo y en mezclas digeridas en pacas.**

Treatment Bales / Tratamiento Pacas	pH	CE	Da	Ca	K	Na	Zn	MO	N	C:N ratio / Relación C:N	P
	--	dS·m ⁻¹	g·cm ³	meq·100 g ⁻¹	meq·100 g ⁻¹	meq·100 g ⁻¹	ppm	%	%	--	ppm
BB / PB	8.13ab	2.92a	0.62a	32.09b	7.61a	3.02a	10.31a	23.20a	0.82a	16.35a	0.21b
BBM / PBE	9.33c	11.00b	0.97b	23.76a	30.27b	7.61b	6.48a	15.36a	0.85a	10.50a	0.22b
BBCM / PBG	7.70ab	7.64ab	0.97b	27.39ab	21.75ab	3.66ab	23.10b	11.44a	0.76a	8.83a	0.19b
BBDW / PBRD	8.77b	3.70a	0.83ab	26.33a	13.90ab	2.04a	9.22a	17.32a	0.81a	12.61a	0.12a

Means with different letters in the columns are statistical different (Tukey, $P \leq 0.05$). BB = Bagasse, BBM = Bagasse plus manure, BBCM = Bagasse and chicken manure, BBDW = Bagasse and domestic waste.Medias con distinta letra en las columnas son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). PB=Bagazo, PBE= Bagazo más estiércol, PBG= Bagazo y gallinaza, PBRD= Bagazo y residuos domésticos.

The BBM and BBDW respectively registered the maximum average pHs of 9.3 and 8.7 in the range considered as slightly alkaline. pH higher than 7.5 can reduce P solubility and may result in poor P availability to plants as described by Agarwal et al. (2023).

The bulk density in BB and BBDW was lower compared to the rest of the digests, with values of 0.62 to 0.83, but below the range of 0.2 to 0.5 g·cm⁻³ DA recommended for use as substrates, as indicated by Agarwal et al. (2023). In general, digests can be used in mixtures as substrate components in nursery plant propagation because they have a Da <1, but other properties such as pH, EC and Na content of the digests should also be considered so as not to affect plant growth and development.

All the digests had levels of N, P and K lower than those established by the standards (Table 3), and therefore required a greater contribution of complementary waste to improve their characteristics. However, the BB, BBM and BBCM digests have the highest P levels, and only BBM had a higher K content compared to BB digest.

The BB digest is characterized by a higher Ca content, the agave bagasse digest supplemented with chicken manure (BBCM) showed the highest levels of Mg and Zn, and the BBM showed similar levels of Mg compared to the BBCM, but with higher Na values compared to the rest of the digests.

In Table 3, it is noteworthy that in all cases a C:N ratio (from 8.8 to 16.3) is observed within the ranges indicated for amendments or organic fertilizers that have reached an adequate process of stabilization or microbial decomposition (C:N between 10 and 20) to be commercially acceptable, as indicated by Castro-Hernandez et al. (2023).

Considering that agave tequila bagasse can initiate the decomposition process with a C:N ratio of about 79 and that the digests in the study had similar C:N ratio values observed in bagasse compost obtained by traditional aerobic processes presented by Acosta et al. (2023a), it can be indicated that the final agave mezcal bagasse digests were stable. The term stable refers to organic materials or composts that no longer manifest rapid or noticeable decomposition, with a decrease in microbial activity and in which nutrients are relatively available as mentioned by Sánchez et al. (2019) and Acosta et al. (2023b).

Derived from a high initial C:N ratio of bagasse, Acosta et al. (2023b) in a study of the dynamics of C and N in Regosols and Luvisols soils, indicate that the applica-

En la caracterización física y química de los digeridos obtenidos de las pacas, el pH y la conductividad eléctrica (CE) reflejaron diferencias significativas entre las muestras. Los resultados del análisis indican que existen diferencias estadísticas significativas en ocho parámetros. Mientras que para las variables nitrógeno (N) ($P = > 0.914$), M.O ($P = > 0.104$) y Relación C:N ($P = > 0.104$) no presentaron diferencias (Cuadro 2).

Como se aprecia en el Cuadro 3, los digeridos de las pacas PB (2.92 dS·m⁻¹) y PBRD (3.79 dS·m⁻¹) presentaron unos valores de CE dentro o alrededor del intervalo de 0.75 a 3.49 dS·m⁻¹ recomendado para el cultivo de plantas sin suelo indicado por Abad (1992), citado por Crespo-González et al. (2013). Cabe señalar que los fertilizantes orgánicos potenciales para la germinación de semillas y desarrollo de plantas deben presentar un valor igual o menor a 3 dS·m⁻¹ (Velázquez et al., 2017). Por su parte, los digeridos de la PBE y la PBG exceden el valor óptimo de CE.

Las PBE y PBRD respectivamente registraron los pH promedios máximos de 9.3 y 8.7 en el intervalo considerado como ligeramente alcalino. pH mayores a 7.5 pueden reducir la solubilidad del P y puede ocasionar poca disponibilidad del P para las plantas como se describe en Agarwal et al. (2023).

La densidad aparente en PB y PBRD resultó inferior en comparación con el resto de digeridos, con valores de 0.62 a 0.83, pero por debajo del intervalo de 0.2 a 0.5 g·cm⁻³ de DA recomendado para ser usados como sustratos, indicado por Agarwal et al. (2023). En general los digeridos sí pueden ser usados en mezcla como componentes de sustratos en la propagación de plantas en vivero por presentar una Da <1, pero también deben considerarse otras propiedades como pH, CE y contenido de Na de los digeridos para no afectar el crecimiento y desarrollo de las plantas.

Todos los digeridos resultaron con niveles de N, P y K inferiores a los establecidos en las normas (Cuadro 3), por lo que requieren una mayor aportación de residuos complementarios que mejoren sus características. Si bien, los digeridos de PB, PBE y PBG resultaron con los mayores niveles de P, y únicamente el PBE resultó superior en contenido de K comparado con el digerido de PB.

El digerido de PB se caracteriza por un mayor contenido de Ca, el digerido a base de bagazo de agave complementado con gallinaza (PBG) manifestó los mayores niveles de Mg y Zn, y el PBE mostró niveles similares en Mg comparado con el PBG, pero con mayores valores de Na en comparación con el resto de digeridos.

tion of bagasse to the soil manifests a reduction of N availability, which can cause a problem of lack or “hunger of nitrogen” in crops, a situation that is less pronounced in the already composted agave tequila bagasse; therefore, the use of composts or bagasse digests as amendments or soil improvers and as manures or fertilizers in crops is more advisable. In this regard, Cooperband (2002) indicates that the quality of composts or digests depends on the characteristics of the raw material, process management, biological activity, and mainly on the final use, and depending on their characteristics, they can be used as organic fertilizer, a supplement of organic substrates or as a soil improver.

Analysis of correlation and principal components

In the analysis of the correlation between physical and chemical variables of the final digests, a significant and positive relation was found between K and EC ($r = 0.98, 0.016$), Mg and DA ($r = 0.98, 0.023$), C:N and MO ($r = 0.99, 0.008$), and a significant and negative correlation between C:N and DA (-0.97 and 0.008). Carbon is associated with higher MO content and dissolved K increases the EC in the solution of the digests, while the higher levels of carbon in the digests the DA decreases, making the materials or digests more porous by an inversely proportional relation with DA as established by Agarwal et al. (2023).

The analysis of the principal components generated two components that together explain 82 % of the accumulated variance, CPI with 53.1 % and CPII with 29.2 %. The variables with the greatest weight were K (0.99), EC (0.96), DA (0.95), Ca (-0.89), C:N (-0.87), MO (-0.80) and Na (0.79) in the CPI, as well as N (0.97), Zn (0.87), pH (0.70) and MO (0.60) in the CPII.

With the cluster analysis it was possible to differentiate two groups of digests at a cut-off distance of 5.25 (Euclidean) (Figure 4), where the group I was formed by the digests BB, BBCM and BBDW and group II only with the digest based on agave bagasse plus manure (BBM), the latter separated from the rest by its higher content of P, K, Mg, but also by presenting higher DA, pH, EC and a higher content of Na, which make it least recommended for use as a substrate or substrate component in plant propagation.

Comparison of digestates characteristics with official standards

The OM content in this research did not show significant statistical differences ($P = > 0.104$). However, BB obtained the highest percentage of OM, therefore

En el Cuadro 3, es de resaltar que en todos los casos se observa una relación C:N (de 8.8 a 16.3) dentro de los intervalos indicados para enmienda o abonos orgánicos que han alcanzado un adecuado proceso de estabilización o descomposición microbiana (C:N entre 10 y 20) para que sean comercialmente aceptables como lo indican Castro-Hernández et al. (2023).

Considerando que el bagazo de agave tequilero puede iniciar el proceso de descomposición con una relación C:N de alrededor de 79 y que los digeridos del estudio resultaron con valores similares de relación C:N observados en compost de bagazo obtenidos por procesos aerobios tradicionales presentados por Acosta et al. (2023a), puede indicarse que los digeridos finales de bagazo de agave mezcalero resultaron estables. El término estable se refiere a materiales orgánicos o compost que ya no manifiestan una descomposición rápida o perceptible, con una disminución de la actividad microbiana y en los que los nutrientes son relativamente disponibles como lo mencionan Sánchez et al. (2019) y Acosta et al. (2023b).

Derivado de una alta relación C:N inicial de los bagazos, Acosta et al. (2023b) al hacer un estudio de la dinámica de la mineralización del C y N en suelos Regosoles y Luvisoles, indican que la aplicación de bagazo al suelo manifiesta una reducción de la disponibilidad de N, lo que puede ocasionar un problema de falta o “hambre de nitrógeno” en los cultivos, una situación que resulta menos pronunciada en los bagazos de agave tequilero ya compostados; por lo que, resulta más recomendable el uso de compostas o digeridos de bagazo como enmiendas o mejoradores de suelo y como abonos o fertilizantes en los cultivos. Al respecto Cooperband (2002) indica que la calidad de las compostas o digeridos está en función de las características de la materia prima, manejo del proceso, actividad biológica, y principalmente al uso final, y en función de sus características se pueden emplear como abono orgánico, suplemento de sustratos orgánicos o como mejorador de suelos.

Análisis de correlación y de componentes principales

En el análisis de correlación entre variables físicas y químicas de los digeridos finales, se encontró una relación significativa y positiva entre K y CE ($r=0.98, 0.016$), Mg y DA ($r=0.98, 0.023$), C:N y MO ($r=0.99, 0.008$), y una correlación significativa y negativa entre C:N y DA (-0.97 y 0.008). El carbono está asociado a un mayor contenido de MO y el K disuelto aumenta la CE en la solución de los digeridos, mientras que al presentarse mayores niveles de carbono en los digeridos la DA disminuye, haciendo los materiales o digeridos más

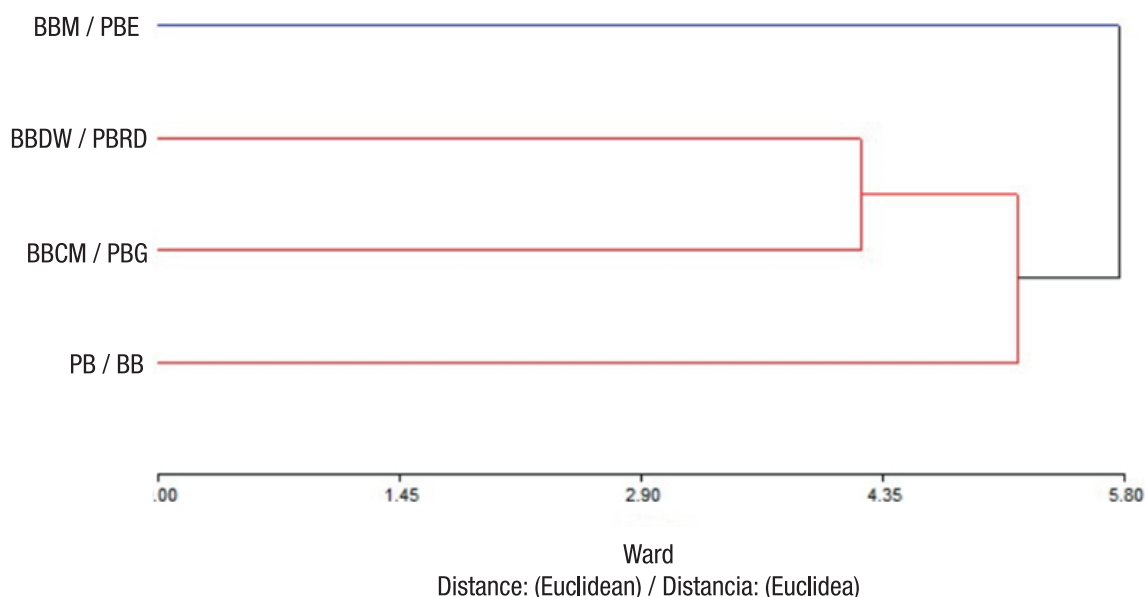


Figure 4. Dendrogram from the physical and chemical characteristics of the digests, obtained by the De Ward method.
Figura 4. Dendrograma a partir de las características físicas y químicas de los digeridos, obtenido por el método De Ward.

these results were compared with different official standards referring to the elaboration of soil improvers, composts, organic soil waste derivatives and with the results found by Velázquez et al. (2017) in evaluated biodigester bales (EPO 100) (Table 4), which were: NMX-AA-180-SCFI-2018; NTEA-006-SMA-RS-2006 and NADF-020-AMBT-2011. It was also compared with NMX-FF-109-SCFI-2007 for worm humus, where the ideal organic matter (dry basis) should be between 20 and 50 %. Derived from the indicated comparison, it can be highlighted that the BB (O.M. 23.20 %) in the O.M. value, in the C:N ratio complies with NMX-AA-180-SCFI-2018 and NADF-020-AMBT-2011 Standards, and in the EC it complies with the NMX-AA-180-SCFI-2018 Standard and with NADF-020-AMBT-2011.

Based on the Mexican Standards analyzed, the final digestate obtained from agave bagasse could be defined as a soil improver; composed of organic origin and plant nutrition inputs, and due to its characteristics can be used as a soil conditioner. In this regard, Acosta et al. (2023a) in a study of the decomposition dynamics of tequila bagasse and bagasse compost in Regosol and Luvisol soils in Jalisco, indicate that the degradation processes of the bagasse were more intense and accelerated than those observed in the compost. These authors also recommend that if it is necessary to increase the microbial activity of the soil it is preferable to use bagasse, but if it is desired to improve the fertilization and the MOS content of the soil, it is necessary to add compost.

porosos por una relación inversamente proporcional con la DA como lo establece Agarwal et al. (2023).

El análisis de componentes principales generó dos componentes que en conjunto explican el 82 % de la varianza acumulada, el CP1 con 53.1 % y el CP2 con 29.2 %. Donde las variables de mayor peso fueron contenido de K (0.99), CE (0.96), DA (0.95), Ca (-0.89), C:N (-0.87), MO (-0.80) y Na (0.79) en el CP1, así como contenido de N (0.97), Zn (0.87), pH (0.70) y MO (0.60) en el CP2.

Con el análisis de conglomerados se pudieron diferenciar dos grupos de digeridos a una distancia de corte de 5.25 (Euclidiana) (Figura 4), donde el grupo I estuvo conformado por los digeridos PB, PBG y PBRD y el grupo II solo con el digerido a base de bagazo de agave más estiércol (PBE), este último separado del resto por su mayor contenido de P, K, Mg, pero también por presentar mayor DA, pH, CE y un mayor contenido de Na, que lo hacen el menos recomendable para su uso como sustrato o componente de sustrato en la propagación de plantas.

Comparación de las características de los digeridos con normas oficiales

El contenido de MO en esta investigación no mostró diferencias estadísticas significativas ($P = > 0.104$). Sin embargo, la PB obtuvo el porcentaje más alto de MO, por ello estos resultados se compararon con

Table 4. Physicochemical parameters of bagasse compost with reference values from Mexican Official Standards.
Cuadro 4. Parámetros fisicoquímicos del abono orgánico de bagazo con valores de referencias de Normas Oficiales Mexicanas.

Parameter / Parámetro	Units / Unidades	Treatments				Velázquez et al. (2017)	Mexican Official Standards / Normas Oficiales Mexicanas			
		Bales / Tratamientos					EPO 100	NMX-AA-180- SCFI-2018 ¹	NTEA-006-SMA-RS-2006 ²	NADF-020-AMBT-201 ¹³
		BB / PB	BBM / PBE	BBCM / PBG	BBDW / PBRD					
pH		8.13	9.3	7.70	8.77	7.96	6.7 – 8.5	6.5 a 8.0	N/A	
EC / CE	dS·m ⁻¹	2.92	11.0	7.64	3.70	1.06	0.5 – 12	n/d	< 4	
Da	g·cm ³	0.62	1.0	0.97	0.83	0.85	n/d	n/d	n/d	
Ca	%	0.64	0.54	0.55	0.5	0.47				
K	%	0.29	0.85	0.54	1.2	0.85	From 1 to 3 % / De 1 to 3 %	> than 0.25 % or 2,500 ppm / > a 0.25 % o 2,500 ppm		
Mg	%	0.09	0.17	0.47	0.19	0.22	n/d	n/d	n/d	
Na	%	0.06	0.08	0.04	0.17	0.41	n/d	n/d	n/d	
Zn	ppm·mg ⁻¹ ·kg ⁻²	10.31	6.5	23.10	9.22	57	n/d	n/d	n/d	
M.O	%	23.2	15.4	11.44	17.32	15.54	≥ 20 MS	> al 15	> 20	
N	%	0.82	0.9	0.76	0.81	1.05	1 – 3	s/d	n/d	
C/N		16.35	10.5	8.83	12.61	14.8	15 – 25	< than 12	n/d	
P	ppm / %	0.21	0.2	0.19	0.12	0.47	> 1%	> than 0.10 % or 1000 ppm / > a 0.10 % o 1000 ppm	> than 0.25 % or 1000 ppm / > a 0.25 % o 1000 ppm	

n/d= no data. NPK. From 1 to 3 % in any of them and their sum ≤ 7 %; compost - organic soil improver¹. 3 % of the sum is greater than 7 % organic fertilizer
s/d= sin dato. NPK. De 1 a 3 % en cualquiera de ellos y su suma ≤ 7 %; composta - mejorador de suelo orgánico². 3 % o la suma es mayor a 7 % fertilizante orgánico.

¹NMX-AA-180-SCFI-2018. Standard that establishes the methods and procedures for the aerobic treatment of the organic fraction of municipal soil waste and special handling waste, as well as commercial information and quality parameters of the final products. /

²NMX-AA-180-SCFI-2018. Norma que establece los métodos y procedimientos para el tratamiento aerobio de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, así como la información comercial y de sus parámetros de calidad de los productos finales.

³NTEA-006-SMA-RS-2006. State environmental technical standard. Requirements for the production of soil improvers made from organic waste. Physicochemical and sanitary requirements for soil improvers. /

⁴NTEA-006-SMA-RS-2006. Norma técnica estatal ambiental. Requisitos para la producción de los mejoradores de suelos elaborados a partir de residuos orgánicos. Requisitos físico-químicos y sanitarios para los mejoradores de suelos.

⁵NADF-020-AMBT-2011. Minimum requirements for the production of compost from the organic fraction of urban, agricultural, livestock and forestry soil waste, as well as the minimum quality specifications of the compost produced and distributed in the Federal District. /

⁶NADF-020-AMBT-2011. Requerimientos mínimos para la producción de composta a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, agrícolas, pecuarios y forestales, así como las especificaciones mínimas de calidad de la composta producida y distribuida en el Distrito Federal.

Therefore, the agave bagasse digestate without the use of complementary wastes elaborated using biodigester bales with facultative anaerobic process is an option for the efficient management of agave bagasse because it meets the minimum requirements established in the Standards. In addition, Pérez et al. (2018) conclude that valorizing by-products through the elaboration of substrates helps to minimize the environmental impact through the use of waste, as can be the case of agave mezcal bagasse.

Conclusions

The agave bagasse digestate obtained from biodigester bales presented higher percentages of OM compared to the other three digests, with a pH close to neutrality, an EC within the recommended range for the cultivation of soilless plants, reached a C:N ratio that characterizes it as a stable compost, with a low Na level, but requires improvements in its N, P and K content.

Derived from the comparative analysis of the results with the Mexican Official Standards regarding the elaboration of soil improvers, compost, derived from organic waste, the agave bagasse has acceptable parameters and can be considered as a soil improver and as an option for the adequate management of the waste for mezcal growers.

The biodigester bale method is an alternative in the valorization of agricultural and industrial waste from the distillation of alcoholic beverages for producers, because the volume and weight of the digested bagasse are reduced, and the aeration action of the bagasse is reduced through the manual turning necessary in the traditional composting process, which results in zero labor as opposed to aerobic processes and can minimize the impact on the soil and the environment because it would no longer be dumped directly into the plantations.

End of English version

References / Referencias

- Acosta, S. L. L., Zamora, N. J. F., Rodríguez, M. R., González, E. D. R., Gallardo, L. J. F., y Salcedo, P. E. (2023a). Bagazo y composta de bagazo de agave tequilero en suelos contrastantes: 1. Dinámica de degradación. *Biocencia. Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud*. 25(2): 90-96. <http://biocencia.unison.mx/>
- Acosta, S. L. L., Zamora, N. J. F., Rodríguez, M. R., Jiménez, P. C., Gallardo, L. J. F., y Salcedo, P. E. (2023b). Bagazo y composta

diferentes normas oficiales referentes a la elaboración de mejoradores de suelos, compostas, derivados de residuos sólidos orgánicos y con los resultados encontrados por Velázquez et al. (2017) en pacas biodigestoras evaluadas (EPO 100) (Cuadro 4), las cuales fueron: NMX-AA-180-SCFI-2018; NTEA-006-SMA-RS-2006 y NADF-020-AMBT-2011. También se cotejó con la NMX-FF-109-SCFI-2007 para el humus de lombriz, en donde la materia orgánica (base seca) idónea debe estar entre un 20 a un 50 %. Derivado de la comparación indicada, se puede resaltar que la PB (M.O. 23.20 %) en el valor de M.O., en la relación C:N cumple con la Norma NMX-AA-180-SCFI-2018 y NADF-020-AMBT-2011, y en la CE cumple con la Norma NMX-AA-180-SCFI-2018 y con la NADF-020-AMBT-2011.

Con base a las Normas Mexicanas analizadas, el digerido final obtenido a partir de bagazo de agave se podría definir como mejorador de suelo; compuesto de origen orgánico e insumos de nutrición vegetal, y por sus características pueden utilizarse como acondicionador de suelos. Al respecto, Acosta et al. (2023a) al realizar un estudio de dinámica de descomposición de bagazo tequilero y compostas de bagazo en suelos Regosol y Luvisol en Jalisco, indican que los procesos de degradación de los bagazos resultaron más intensos y acelerados que los observados en las compostas. Estos autores además recomiendan que si se requiere aumentar la actividad microbiana del suelo es preferible utilizar el bagazo, pero si se desea mejorar la fertilidad y el contenido de MOS del suelo es necesario añadir la composta.

Por lo tanto, el digerido a base de bagazo de agave sin el uso de residuos complementarios elaborado mediante las pacas biodigestoras con un proceso anaerobio facultativo es una opción para el eficiente manejo del bagazo de agave debido a que cumple con los requisitos mínimos establecidos en las Normas. Además, Pérez et al. (2018) concluyen que valorizar subproductos mediante la elaboración de sustratos, coadyuvan en minimizar el impacto ambiental a través del aprovechamiento de residuos, como puede ser el caso del bagazo de agave mezcalero.

Conclusiones

El digerido a base de bagazo de agave obtenido de pacas biodigestoras presentó mayores porcentajes de MO en comparación con los otros tres digeridos, con un pH cercano a la neutralidad, una CE dentro del intervalo recomendado para el cultivo de plantas sin suelo, alcanzó una relación C:N que lo caracteriza como un compost estable, con bajo nivel de Na, pero requiere mejoras en su contenido de N, P y K.

- de bagazo de agave tequilero en suelos contrastantes: 2. Dinámica de mineralización del carbono y nitrógeno. *Biotecnia. Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud*. 25(2):5-11. <http://biotecnia.unison.mx/>
- Agarwal, P., Saha, S., y Hariprasad, P. (2023). Agro-industrial-residues as potting media: physicochemical and biological characters and their influence on plant growth. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 13:9601-9624. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01998-6>
- Ardila-Delgado, J. L., Cano, C. J., Silva, P. G., y López, A. Y. (2015). Descomposición de residuos orgánicos en pacas: aspectos fisicoquímicos, biológicos, ambientales y sanitarios. *Producción Limpia*, 10(2), 38-52.
- Bautista, J. A., Orozco, C. S., y Terán, M. E. (2015). La disminución de la producción artesanal de mezcal en la Región del Mezcal de Oaxaca, México. *Revista Mexicana en Ciencias Agrícolas*, 6(6), 1291-1305. <https://doi.org/10.29312/remexca.v6i6.577>
- Castro-Hernández, F., Navarro-Flores, J. R., y Castro-Barquero, L. (2023). Adición de inóculos microbianos y condiciones optimizadas de elaboración en un compost comercial. *Agronomía Costarricense* 47(2): 23-46. http://www.mag.go.cr/rev_agr/index.html
- Consejo Mexicano Regulador de la Calidad del Mezcal, A.C [COMERCAM]. (2023). *Informe Estadístico 2022*. México. 17 p. <https://n9.cl/41nm8>
- Cooperband, L. (2002). The art and science of composting: A resource for farmers and compost producers. Manual of the Center for Integrated Agricultural Systems, University of Madison- Wisconsin. U.S.A.F
- Crespo-González, M. R., González, E. D. R., Rodríguez, M. R., Rendón, S. L. A., del Real, L. J. I., y Torres, M. J. P. (2013). Evaluación de la composta de bagazo de agave como componente de sustratos para producir plántulas de agave azul tequilero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4(8), 1161-1173. <https://doi.org/10.29312/remexca.v4i8.1130>
- Crespo-González, M. R., González, E. D. R., Rodríguez, M. R., Ruiz, C. J. A., y Durán, P. N. (2018). Caracterización química y física del bagazo de agave tequilero compostado con biosólidos de vinaza como componente de sustratos para cultivos en contenedor. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 34(3), 373-382. <https://doi.org/10.20937/rica.2018.34.03.01>
- Chairez, A. J., Enríquez, dV. J. R., Ruíz, L. J., Campos, A. G. V., y Martínez, G. R. (2015). Uso del bagazo de *Agave* spp y hojas de maíz para cultivar el hongo *Pleurotus ostreatus*. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 2(1): 23-28.
- Chávez L., e Hinojosa M., (2010). Bagasse from the mezcal industry as an alternative renewable energy produced in arid lands. *Fuel*, 89(12), 4049-4052. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.07.026>
- Dahlgren, R. A., y Walker, W. J. (1994). Solubility control of KCl extractable aluminum in soils with variable charge. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 25(11-12), 2201- 2214. <https://doi.org/10.1080/00103629409369182>
- Derivado del análisis comparativo de los resultados con las Normas Oficiales Mexicanas referentes a la elaboración de mejoradores de suelos, compostas, derivados de residuos sólidos orgánicos, el digerido de bagazo de agave, cuenta con los parámetros aceptables y se puede considerar como mejorador de suelos y como una opción de manejo adecuado del residuo para los mezcaleros.
- El método de pacas biodigestoras es una alternativa en la valorización de los esquilmos agrícolas e industriales de la destilación de bebidas alcohólicas para los productores, debido a que se reduce el volumen y peso del bagazo digerido, y se disminuye la acción de aireación del bagazo mediante el volteo manual necesario en el proceso de compostaje tradicional, la cual resulta una labor nula a diferencia de procesos aerobios y puede minimizar el impacto en el suelo y en el ambiente, porque ya no sería vertido en las plantaciones de forma directa.
- Fin de la versión en español*
- Estrada-Maya, A., y Weber, B. (2022). Biogás y bioetanol a partir de bagazo de agave sometido a explosión de vapor e hidrólisis enzimática. *Ingengería Investigación y Tecnología*, 43(2), 1-10. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2022.23.2.009>
- Flores-Ríos, P. A., Robles, C., y Castañeda, H. E. (2020). Generación y caracterización básica de bagazos de la agroindustria del mezcal en Oaxaca. *Revista Mexicana Ciencias Agrícolas*, 11(6), 1437-1445. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i6.2615>
- González-García, Y., González, R. O., y Nungaray, A. J. (2005). Potencial del bagazo de *Agave* tequilero para la producción de biopolímeros y carbohidrasas por bacterias celulolíticas y para la obtención de compuestos fenólicos. *e-Gnosis*, (3)14, 1-18.
- Hoz-Zavala, M. E. E., y Nava, D. P. (2017). Los residuos de agave como factor de corrosión del suelo donde se vierte. *Revista del Desarrollo Tecnológico*, 1(2), 11-24.
- Iñiguez, C. G., Martínez, G. G., Flores, R. P., y Virgen, G. (2011). Utilización de subproductos de la industria tequilera. Monitoreo de la evolución del compostaje de dos fuentes distintas de bagazo de *Agave* para la obtención de un sustrato para jitomate. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 27(1), 47-59.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2017). Anuario estadístico y geográfico de Puebla 2017. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. 940 p.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos Oriental, Puebla. Clave geoestadística 211082009. 9 p. <https://n9.cl/29cw7>

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2022). Geografía y Medio Ambiente, Límites estatales, municipales y localidades: Marco geoestadístico, 2022. México. <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/>
- Martínez, G. G. A., Íñiguez, C. G., Ortiz, H. Y. D., López, J. Y., y Bautista, C. M. A. (2013). Tiempos de apilado del bagazo del maguey mezcalero y su efecto en las propiedades del compost para sustrato de tomate. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 29(3), 209-216.
- Norma Mexicana. NMX-AA-180-SCFI-2018. Publicada en el Diario Oficial, 21 de agosto de 2018. <https://n9.cl/nad7a>
- Norma Técnica Estatal Ambiental. NTEA-006-SMA-RS-2006. Publicada en el Periódico Oficial, No 001 1021, 9 de octubre del 2006. <https://n9.cl/ieeh9>
- Norma Ambiental para el Distrito Federal. NADF-020-AMBT-2011. Publicada en la Gaceta Oficial, 22 de abril de 2003. <https://n9.cl/5cdte>
- Pérez, F. A. R., Ruiz, M., Lobato, C. M. M., Pérez, V. E., y Rodríguez, S. P. (2018). Sustrato biofísico para agricultura protegida y urbana a partir de compost y agregados provenientes de los residuos sólidos urbanos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 34(3), 383-394.
- Peñalosa-Bernal, J. P., y Ossa-Carrasquilla, L. C. (2023). Estimation of greenhouse gases emitted by the biodigester bale during the organic waste treatment. *Revista Chapingo Serie Agricultura Tropical*, 3(1), 55-69. doi: <https://doi.org/10.5154/r.rchsagt.2023.03.05>
- Sánchez, R., Hernández, O., Jiménez, J., Ojeda, D., Guerrero, V., y Parra, R. (2019). Modelos de predicción del índice de madurez de abonos orgánicos producidos con tres procesos de transformación. *Tec. Econ. Agrar.* 115(3):198-212
- Sánchez, T. B., Zegbe, D. J. A., y Rumayor, R. A. F. (2013). Propuesta para evaluar el proceso de adopción de las innovaciones tecnológicas. *Rev. Mex. Cienc. Agric.* 4(6):855-868.
- Sosa, N., Alladio, M., Pagnan, F., Orcellet, J. M., y Gambaudo, S. (2016). Evaluación de aplicación de residuos sólidos de tambo en cultivo de maíz. *Planteos Ganaderos*. 22. Apresid, p. 54-58.
- Silva-Pérez, G. (2012). Manejo limpio y sano de residuos biodegradables en Pacas Digestoras Silva. Una Alternativa hacia basura cero en Medellín para Proteger la Salud Pública, el Ambiente y la Agricultura Ecológica. Medellín, Colombia. 7 p.
- Silva-Pérez, G. (2018). ¿Qué es la paca digestora Silva? Un reciclaje orgánico limpio y saludable. *Tecsisatcl*, 10(23), 1-6. <https://www.eumed.net/rev/tecsistecatl/n23/paca-digestora-silva.html>
- Velázquez, C. E., Ossa, C. L. C., Jarquín, S. N. H., y Ramírez, V. L. (2017). Biodigester bales: method for the ecological management of organic residues. *AGROFOR International Journal*, 2(3), 108-115.
- Villalobos, C. (2020). Agaves endémicos de México y algunos de sus destilados. *Mezcológia*. <https://mezcológia.mx/agaves-endemicos-de-mexico/>
- Villaseñor, J. L. (2016). Catálogo de las plantas vasculares nativas de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 87(3), 559-902. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2016.06.017>