

Estabilización anaeróbica de residuos sólidos biodegradables para proponer un producto alimenticio para cerdos, en el Tecnológico de Costa Rica

Anaerobic stabilization of biodegradable solid waste for animal feed at Tecnológico de Costa Rica

Noelia González-Rojas¹, Laura Brenes-Peralta²,
María Fernanda Jiménez-Morales³, Felipe Vaquerano-Pineda⁴,
Roel Campos-Rodríguez⁵

Fecha de recepción: 21 de enero de 2018
Fecha de aprobación: 12 de mayo de 2018

González-Rojas, N; Brenes-Peralta, L; Jiménez-Morales, M; Vaquerano-Pineda, F; Campos-Rodríguez, R. Estabilización anaeróbica de residuos sólidos biodegradables para proponer un producto alimenticio para cerdos, en el Tecnológico de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 31-4. Octubre-Diciembre 2018. Pág 120-132.

DOI: <https://doi.org/10.18845/tm.v31i4.3970>

- 1 Estudiante egresada. Escuela de Agronegocios. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: noegonzar@gmail.com.
- 2 Ingeniera Agropecuaria Administradora y Máster en Gerencia y Gestión Ambiental. Profesora Investigadora de la Escuela de Agronegocios. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: labrenes@tec.ac.cr.
- 3 Ingeniera Agropecuaria Administradora y Máster en Sistemas Modernos de Manufactura. Profesora Investigadora. Escuela de Agronegocios. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: maria.jimenez@tec.ac.cr.
- 4 Ingeniero en Zootecnia y Máster en Gerencia Agroempresarial. Profesor. Escuela de Agronegocios. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: fvaquerano@tec.ac.cr.
- 5 Doctor en Ciencias Naturales para el Desarrollo. Docente e investigador de la Escuela de Agronegocios. Coordinador del Área Académica Agroforestal Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: rocampos@tec.ac.cr.



Palabras clave

Residuos biodegradables; cerdos; ensilaje; fermentación; alimentación animal.

Resumen

La generación de residuos es causa inmediata de cualquier tipo de actividad humana, hoy en día se está ante una sociedad de consumo que genera gran cantidad y variedad de residuos sólidos biodegradables procedentes de una amplia gama de actividades. El presente estudio tuvo como objetivo la evaluación de tratamientos de estabilización de residuos sólidos biodegradables, provenientes del restaurante institucional del Tecnológico de Costa Rica, como alternativa para gestionar y valorizar dichos residuos a través de la alimentación de cerdos de engorde. La estabilización se obtuvo por medio de una fermentación anaeróbica con microorganismos eficaces (EM), a partir de tres tratamientos que consideraron distintas proporciones de adición de EM, semolina, y melaza de caña en polvo, dispuestos en capas en microsilos para la fermentación. Se evaluaron cualitativamente parámetros físicos, y cuantitativamente parámetros nutricionales como el porcentaje de proteína, fibra total, cenizas y extracto etéreo, así como humedad, pH, Energía Bruta, presencia de *Salmonella* y Coliformes Fecales. Como resultados se obtuvo un producto de tipo energético, estabilizado al ser llevado a un pH ácido y no se detectó presencia de patógenos. Finalmente, se realizó un análisis económico y ambiental del uso de los residuos estabilizados en un caso hipotético de producción porcina según parámetros nacionales, resultando en la posibilidad de obtener rentabilidad e inocuidad en los tratamientos, además de lograr evitar ciertos costos ambientales y una mejor gestión en general.

Keywords

Biodegradable solid waste; swine; silage; fermentation; animal feed.

Abstract

Waste is an immediate cause of almost any human activity, and nowadays, due to consumers' behavior there is a lot of waste generation, regarding amount and variety, which need to be managed. Consequently, this research focused on the evaluation of different treatments for the stabilization of biodegradable solid waste generated at the institutional restaurant from Tecnológico de Costa Rica, as an alternative to manage, use and re-value that waste through animal feed. The waste was stabilized through an anaerobic fermentation with Effective Microorganisms (EM) in three treatments that added different proportions of EM, semolina, and molasses. The ingredients were introduced in micro-silos for ten days to allow the fermentation. Then, the products were evaluated qualitatively for physical parameters, and quantitatively for nutritional composition and microbiologic parameters, such as fiber, protein, ashes and nitrogen-free extract percentage, as well as moisture, pH, Gross Energy and presence of *Salmonella* and fecal coliformes. The results showed that the stabilized waste was a product that qualifies as an energy source, with acid pH and absence of pathogenic microorganisms. It was also evaluated economically and environmentally in a hypothetical swine production case contextualized in Costa Rica. This evaluation resulted in a chance of managing wastes through a fermentation process and obtain revenues, comply with animal welfare and environmental legislation, and avoid certain environmental costs if not treated.

Introducción

A partir de julio de 2010, las entidades públicas o privadas en Costa Rica deben cumplir con lo establecido en la ley 8839 sobre la Gestión Integral de Residuos [1], la cual presenta como objetivo regular la gestión integral de los residuos y su uso eficiente, con planes de acción regulatorios apegados a una política ambiental de monitoreo y evaluación. Debido a que esta ley promueve el aprovechamiento de los residuos, pueden considerarse las técnicas como el compostaje o la elaboración de subproductos alimenticios para la formulación de dietas para animales como una opción.

El aprovechamiento de los residuos, contribuye a conservar y reducir la demanda de recursos naturales, disminuir el consumo de energía, preservar los sitios de disposición final y reducir sus costos, así como a reducir la contaminación ambiental al disminuir la cantidad de residuos que van a los vertederos o que simplemente son dispuestos en cualquier sitio generando contaminación [2].

Los residuos sólidos biodegradables tienen un alto contenido en humedad lo que implica dificultades para el almacenamiento, y su uso o consumo debe ser rápido con el fin de evitar descomposición. Por tanto, para incorporar el producto proveniente de este tipo de materias como complemento en la alimentación animal, es necesaria una planificación en la que se tenga en cuenta, productos disponibles, cantidades y tiempo [2] y el acondicionamiento de los mismos.

Paralelamente, la investigación y evaluación de nuevas fuentes alimenticias para las explotaciones porcinas se ha tornado de interés debido a la baja competitividad en ese agronegocio, generada por el alto costo de los cereales y fuentes de proteína para elaborar las dietas. La posibilidad de optimizar la producción porcina es factible, mediante mejoras en la eficiencia de la producción [3], por lo que existen investigaciones que evalúan distintos tipos de materias primas e insumos; donde se ha probado incluso, que existe una mayor digestibilidad de nutrientes de las raciones basadas en residuos sólidos biodegradables, que las elaboradas con maíz y soya, en especial la proteína [4]. Además, el gusto y el olfato de los cerdos ha evolucionado para poder asociar alimentos beneficiosos o perjudiciales a través de claves volátiles específicas que anticipan las consecuencias del consumo. Los cerdos, al igual que otros mamíferos, poseen preferencias innatas por el sabor dulce y en menor medida por el salado [5].

Por tal motivo, utilizar residuos biodegradables como los generados a partir de sobrantes de comida, para la alimentación de cerdos podría resultar económicamente rentable para los porcicultores, además de evitar que una cantidad importante de éstos lleguen a un relleno sanitario. No obstante, es necesario tomar en cuenta que un residuo sin estabilizar podría convertirse en un foco de transmisión de enfermedades para el animal y posteriormente al ser humano. Por esto, varios estudios muestran la utilidad de fermentar o ensilar los residuos orgánicos como un mecanismo de estabilización que luego permita un proceso seguro de ingesta y un balance en la dieta de los animales. En este proceso, las bacterias del ácido láctico fermentan los carbohidratos hidrosolubles presentes en los residuos produciendo ácido láctico y en menor cantidad ácido acético. Al generarse estos ácidos, el pH del material ensilado baja a un nivel que inhibe la presencia de microorganismos que inducen la putrefacción [6], y la proliferación de enterobacterias [7] que podrían afectar la salud de los animales que tuvieran residuos orgánicos entre sus fuentes de alimentación. En caso de no contar con una fuente de carbohidratos importante en el residuo, pueden adicionarse estos al proceso también. El producto final, deberá estar libre de sustancias tóxicas, presentar una mínima pérdida en nutrientes y materia seca, y contar con un olor agradable, color adecuado y ausencia de moho, característicos de un proceso de fermentación.

Por lo anterior, esta investigación consiste en evaluar distintos tratamientos de ensilaje de residuos sólidos biodegradables, provenientes del restaurante institucional del Instituto Tecnológico de Costa Rica, como alternativa de aprovechamiento de los residuos que se generan en este sitio para alimentación de cerdos de engorde. Su importancia radica en llegar a considerar el tratamiento que tuviera un mejor comportamiento técnico, económico y ambiental, de manera que se puedan convertir en una opción para que el TEC gestione este tipo de residuos.

Metodología

La investigación se realizó en el TEC en la Sede Central de la Universidad, en el Cantón Central de la Provincia de Cartago, en el distrito Oriental, Barrio Los Ángeles 9°51'16"N 83°54'33"O. Se utilizó un *p value* de 0, 05, y se empleó el programa *InfoStat*.

Diseño del Experimento

Se utilizó un diseño de 3 tratamientos con 4 repeticiones cada uno. El siguiente cuadro muestra el resumen de cada tratamiento con los insumos utilizados.

Cuadro 1. Tratamientos e insumos utilizados

Tratamientos	Insumos
T1	*EM (10%) Residuos alimenticios (70%) Semolina Fermentada (20%)
T2	*EM (10%) Residuos alimenticios (70%) Semolina sin fermentar (20%)
T3	Melaza en polvo (10%) Residuos alimenticios (70%) Semolina Fermentada (20%)

*EM (Microorganismos Efectivos)

La selección de la composición de cada tratamiento se basó en criterio experto, y se debió pasar por procesos de preparación tanto de los residuos como de los insumos adicionados para la ejecución del experimento, como se describe a continuación.

Activación de EM y fermentación de la semolina

El producto utilizado para la fermentación fue un cultivo mixto de microorganismos benéficos (bacterias ácido lácticas, levaduras, bacterias fototróficas), sin manipulación genética, denominado EM de la marca BioEco ®. El producto EM requiere de un proceso de activación, que se realiza mezclándolo con melaza de caña y agua, para una concentración del 10%, es decir 100 mL de EM con 100 mL de melaza en 1 L de agua. Una vez activado el producto se utilizó para los tratamientos T1 y T2.

Para el caso de los tratamientos que emplearon semolina fermentada (T1 y T3), se realizó la mencionada activación del EM al 1%, y luego se humedeció la semolina homogéneamente con

el EM activado, dejándola reposar una semana, en un contenedor sellado, en un lugar fresco y oscuro.

Preparación de los Residuos biodegradables

Se utilizaron los residuos biodegradables del Restaurante Institucional del TEC en su mayoría provenientes de arroz, frijoles, ensaladas, carnes rojas, blancas, frutas y pan. Los residuos con mayor grado de humedad, así como los que presentaban daños se separaron de forma manual para evitar problemas en el proceso de fermentación e impedir una posterior putrefacción. Posteriormente se mezclaron con una pala, y se molieron durante una hora con un triturador de alimentos, para obtener un producto homogéneo y con menor humedad. Los residuos utilizados fueron recolectados el mismo día que se procesaron, utilizando 42 kg para las repeticiones de los tres tratamientos y para una muestra utilizada en la determinación de la composición nutricional del residuo fresco en el laboratorio.

Equipo utilizado para el ensilado

Los tratamientos se desarrollaron en microsilos, los cuales consistieron en tubos de PVC de 1 m de largo con 3 pulgadas de diámetro, con bolsas plásticas largas dentro y fuera de los mismos (las de adentro con pequeños orificios), para recolectar los lixiviados que se pudieran generar, evacuándolos cada dos días durante el periodo de fermentación.

Fermentación del producto

El proceso total llevó cerca de tres semanas y media, donde primero se dio la activación del EM durante una semana, luego la fermentación de la semolina durante otra semana, seguido de la preparación del equipo (microsilos) y los residuos, para hacer finalmente el llenado y sellado de los mismos para mantener los tratamientos en condición anaeróbica y proceder a su fermentación durante 10 días. Los residuos sólidos previamente molidos, se colocaron en estos dispositivos, alternando con semolina fermentada o sin fermentar según correspondiera a cada tratamiento; hasta llenar el tubo a una capacidad de 5kg, con una proporción de (7:3). La primera capa fue de residuos y la última de semolina y entre cada capa se colocó la dilución de EM al 10% para los primeros tratamientos T1 y T2, y para T3 se colocó melaza de caña en polvo al 10%. Sobre la última capa de semolina se colocó una bolsa plástica para que no quedaran espacios de aire entre la capa de semolina y la tapa del tubo, y se dejó fermentar por 10 días.

La calidad del producto fresco y fermentado se evaluó en función de su composición química y nutricional por medio de análisis de proteína, humedad, fibra, energía, grasas, ceniza, carbohidratos y pH, además de la homogeneidad del producto. Se partió de estos análisis para determinar el contenido nutricional y formular el balance nutricional. También se evaluó la calidad microbiológica mediante análisis de *Salmonella* (Método NEOGEN NSR) y de Coliformes fecales (Método Petrifilm), ya que la presencia de alguno de estos dos en el producto ensilado podría traer consecuencias graves a los animales. Las pruebas se realizaron en el laboratorio de microbiología del CEQIATEC.

Balance Nutricional

Partiendo del producto fermentado el cual tuvo su respectivo análisis microbiológico y composicional, se procedió a realizar el balance nutricional para cerdos en etapa de engorde contemplando un requerimiento de total proteína del 13,2% y de energía metabolizable de 3265 kcal/kg según el *National Research Council* (NRC) [8], como se observa en el cuadro 2.

Cuadro 2. Requerimientos nutricionales para cerdos en la etapa de engorde

Parámetros	Etapa de engorde
Rango de Peso (kg)	80 a 120
Peso Promedio (kg)	100
Consumo/día (kg)	3,075
Conversión Alimenticia	3,75
Proteína Cruda (%)	13,2
Energía Metabolizable	3,265

Fuente: Adaptado de [7]

Con la aplicación del complemento *Solver* de Excel, para precisar la formulación de raciones adecuando los datos al menor costo posible y el precio actual de materias primas en el mercado costarricense, se formularon cuatro balances nutricionales para cerdos de engorde, utilizando los residuos frescos y los 3 ensilajes (residuos estabilizados o fermentados), respetando niveles de inclusión permitidos. Esto permitió estimar el costo por kilogramo de cada dieta.

Análisis Económico- Ambiental

Se estimaron los indicadores bioproductivos, y los costos fijos y variables incurridos al utilizar cada estrategia de alimentación, utilizando producto fresco y las cuatro dietas formuladas, para generar escenarios comparativos. Los ingresos se estimaron con información del precio del kg en canal a noviembre de 2017 y la producción estimada, calculando una valorización por kg de residuo, utilizado por cada estrategia de alimentación.

A partir de la valorización, se hizo una comparación entre los productos frescos y ensilado.

Se describieron los principales rubros que se podrían ver disminuidos económicamente al valorizar los residuos sólidos, a partir de una descripción cualitativa y basándose en la técnica de costos evitados.

Además, se calcularon las emisiones de dióxido de carbono equivalente (CO₂e) como resultado de estabilizar los residuos sólidos biodegradables mediante la fermentación anaeróbica realizada a partir del ensilaje.

Resultados y discusión

Evaluación de los tratamientos:

Se procedió a realizar una evaluación técnica de los tratamientos. A nivel cualitativo y considerando el criterio experto, se observó que las características físicas no variaron entre sí, logrando describirse todos como productos fermentados efectivamente, con mayor o menor humedad, pero aceptable en todos los casos. Se infiere que esto último se debió a un drenaje inadecuado de los lixiviados. Se determinó que el T3 tuvo las mejores características sensoriales de color y olor.

Seguidamente, se realizó una evaluación de la calidad microbiológica, lo que llevó a determinar que no hubo presencia de *Salmonella* o Coliformes fecales en ninguno de los tres tratamientos ni en los residuos sólidos frescos. Según la literatura y los resultados observados, posiblemente el descenso en el pH de los tratamientos no permitió el crecimiento de bacterias patógenas.

También debe rescatarse el hecho de que los residuos eran inocuos microbiológicamente a su salida del restaurante institucional.

Respecto a parámetros técnicos composicionales considerados, el cuadro 3 resume los resultados para cada uno de los tratamientos y los residuos frescos, en base seca.

Cuadro 3. Composición nutricional de los residuos frescos y los productos estabilizados

Tipos de Tratamientos	T1	T2	T3	Residuos Frescos
pH	3,60 ^a	3,61 ^a	3,65 ^a	6,62 ^b
Humedad	69 ^a	61 ^b	59 ^c	75 ^d
Fibra Total (%)	2,62 ^a	2,67 ^a	2,41 ^a	1,84 ^a
Proteína (%)	6,68 ^a	6,13 ^a	7,20 ^a	7,00 ^a
Cenizas (%)	5,35 ^a	6,09 ^a	7,11 ^b	1,36 ^c
Grasa (%)	2,46 ^a	2,43 ^a	6,21 ^b	4,00 ^c
Extracto libre de nitrógeno (%)	22,75 ^a	29,95 ^b	27,04 ^c	19,64 ^d
Energía bruta kJ/g	636,2 ^a	745,0 ^b	874,3 ^c	650,8 ^d

Letras diferentes denotan diferencia significativa

Se observa a partir del cuadro anterior, que en todos los tratamientos hubo un descenso significativo de pH respecto a los residuos sólidos frescos (RS) como era de esperar en un proceso de fermentación o ensilaje si era llevado a cabo adecuadamente.

Para el caso del parámetro de humedad, se presentaron diferencias significativas entre todos los tratamientos, y respecto a los residuos frescos. En estos últimos, la humedad fue mucho mayor que en los tratamientos, principalmente debido a la inclusión de semolina en el proceso de ensilaje.

En el caso de los componentes de interés nutricional, se consideraron los porcentajes de fibra total, proteína, cenizas, grasa, extracto libre de nitrógeno y la energía bruta expresada en kJ/g. El porcentaje de fibra mostró un aumento en los tratamientos respecto a los residuos sólidos frescos; sin embargo, dicho aumento no representa una diferencia significativa entre los tratamientos ni respecto a los residuos sólidos. Se podrá inferir según este resultado, que el proceso de ensilaje no afecta o modifica significativamente los contenidos de fibra. Tampoco se observan diferencias significativas entre los tratamientos y los residuos sólidos frescos respecto al porcentaje de proteína. Esto podría deberse a que, en principio el proceso de ensilaje no afecta el contenido de proteína cruda, en el entendido de que, el método de laboratorio utilizado determina directamente el nitrógeno presente en la muestra y la proteína, estimándolo al multiplicar el resultado por un factor de 6,25. Si bien algunas proteínas verdaderas se desnaturalizan en el proceso de ensilaje, el contenido total nitrógeno se mantiene.

Respecto a la ceniza, todos los tratamientos mostraron diferencias significativas respecto a los residuos, siendo el porcentaje de ceniza significativamente menor en los residuos. No se encuentran diferencias significativas entre el T1 y T2, pero sí se determina que el T3 presenta un porcentaje de ceniza significativamente mayor al del T1 y T2, pudiendo esperar que esto se deba a que el aporte de melaza, EM y semolina afecta la composición nutricional en los tratamientos con respecto a los residuos frescos. Además, varias repeticiones del T3 se mezclaron con el lixiviado que tenía minerales disueltos. En cuanto al extracto etéreo (grasa), no

se hallaron diferencias significativas entre el T1 y el T2; sin embargo, hay diferencia entre estos y el T3, el cual fue significativamente mayor. Los residuos sólidos frescos resultaron con mayor porcentaje de grasa que el T1 y T2 y menor que el T3, mostrando diferencias significativas respectivamente. Se podrá inferir que esto se debe a que hubo mezclas del T3 con sus lixiviados, los cuales pudieron tener ácidos grasos del proceso de fermentación. Además, la inclusión de melaza en polvo aporta una carga extra de carbohidratos solubles que se transforman en ácidos grasos durante el proceso de ensilaje. Para el extracto libre de nitrógeno (carbohidratos), se observaron diferencias significativas entre todos los tratamientos y entre estos y los residuos, detectando que el tratamiento 2 tuvo el mayor porcentaje. Probablemente, esto se debió a que existía mayor aporte de carbohidratos provenientes de la semolina no fermentada, sumado a un proceso fermentativo más rápido, donde se reduce el pH a 4 sin que se consuman todos los carbohidratos solubles, lo que se traduce en un mayor contenido de carbohidratos al final del proceso (cuando se estabiliza el pH). Finalmente, en cuanto a la Energía Bruta, se denota que existieron diferencias significativas entre todos los casos. El que presentó mayor porcentaje de energía fue el T3, pudiendo inferirse que este tiene más contenido graso y por tanto mayor capacidad calórica que los demás nutrientes de los otros tratamientos o los residuos.

Balance nutricional

Mediante la herramienta *Solver*, se hizo la formulación acorde a las restricciones de inclusión de materias primas reportados en la literatura consultada. Se calculó el costo de los residuos frescos y tratados o estabilizados, considerándolo junto al costo de adquisición de las otras materias primas propuestas, a noviembre de 2017, para un balance sugerido según los requerimientos nutricionales del NRC [8] para cerdos en etapa de engorde.

Cuadro 4. Aporte nutricional y Costo de las diferentes materias primas utilizadas

Materia prima	*ED kcal/kg	**EM kcal/kg	Proteína (%)	***Precio (¢/kg)	***Precio (USD/kg)	Inclusión máxima	Inclusión mínima
Maíz	3490	3360	8,8	360	0,63	100%	0%
Acemite de trigo	3110	2930	16,7	136	0,24	15%	0%
Semolina	3100	2960	13,1	170	0,30	15%	0%
Harina coquillo	2800	2600	16,1	70	0,12	10%	0%
Aceites de soya	8750	8400	-	650	1,13	5%	0%
Aceite de palma	8010	7600	-	396	0,69	5%	0%
Sebo	8000	7680	-	210	0,37	5%	0%
Soya integral	4130	3640	36,6	274	0,48	20%	0%
Harina carne y hueso	2700	-	40	200	0,35	10%	0%
Residuo Estabilizado T1	1064,4	989,9	6,68	191	0,33	30%	20%
Residuo Estabilizado T2	1246,5	1159	6,132	191	0,33	30%	20%
Residuo Estabilizado T3	1462,8	1360	7,203	382	0,67	30%	20%
Residuos frescos	455,6	367,6	7	0	0,00	30%	20%

Nota. *(ED: Energía digestible), *(EM: Energía metabolizable), ***precio actualizado a noviembre de 2017.

Al hacer el balance con el uso de cada uno de los productos estabilizados o los residuos frescos, la herramienta propuso el porcentaje de uso de los mismos, por lo que a continuación, se presenta el resumen de cada caso.

Cuadro 5. Porcentaje de inclusión, aporte nutricional y costos utilizando los residuos estabilizados o frescos

Insumo	Inclusión %	*ED kcal/kg	**EM kcal/kg	Proteína (%)	Costo del insumo en formulación (USD/kg)	Costo total de la formulación (USD/kg)
T1	25,12	267	249	1,68	0,084	0,387
T2	27,89	348	323	1,71	0,092	0,380
T3	20,00	293	272	1,44	0,132	0,467
RS	20,39	93	75	1,43	0,000	0,336

Nota. *(ED: Energía digestible), **(EM: Energía metabolizable).

Dado que se tiene un requerimiento nutricional base, cada balance sugirió un porcentaje distinto de inclusión de residuos (frescos o estabilizados) según su aporte nutricional. Destaca el caso del T3 respecto al costo, pues este incluía la adición de melaza en polvo en su proceso, el cual tiene un precio de adquisición mayor que la semolina usada en el T1 y T2, lo que encarece toda la formulación. A diferencia de este, en el caso de los residuos frescos, al considerarse que será para uso dentro de las mismas instalaciones del TEC, se consideró que tendría un costo de cero. Aun así, eventualmente podría asignársele algún costo de acarreo interno, pero se esperaba que el costo de la formulación también fuera menor. Igualmente, puede notarse la diferencia en el aporte nutricional de los residuos frescos a diferencia de los tratados, que para los T1 y T2 permite un mayor porcentaje de utilización debido a su aporte y a su costo.

Análisis Económico-Ambiental

Las entidades públicas y el sector productivo de Costa Rica están en la búsqueda alternativas que ayuden a minimizar la problemática ambiental y a consolidar buenas prácticas de gestión sostenible, sin descuidar la condición económica del sector productivo. Por esto, los productos obtenidos de los tratamientos fueron evaluados desde la perspectiva económica y ambiental, pues la finalidad de analizar las oportunidades a partir de un suplemento alimenticio para cerdos es que se logre una disminución de los riesgos ambientales que causa el no realizar el manejo adecuado de los residuos, contribuir de manera positiva con el plan de gestión integral de residuos institucional, y ofrecer una alternativa de alimentación para los cerdos de granjas porcinas con una relación económica favorable para el productor.

Según la recopilación de costos que se hizo para cada tratamiento y cuyo total se observó en el cuadro 5, se estima que los rubros de mayor peso corresponden a los materiales y equipo, como serían los silos y la tritadora; sin embargo, estos serían costos de inversión en los que se incurriría solo una vez al inicio del proceso. Operativamente, las diferencias principalmente se darán en función de los insumos requeridos para la estabilización. Se considera que todos los casos acá estudiados, a excepción del T3, tendrían un costo por kilogramo menor de adquisición de concentrados para cerdos en etapa de engorde en el mercado costarricense, los cuales rondan los USD 0,462/kg.

Además, enfocándose en la valorización del residuo, se calcularon los posibles beneficios económicos del uso residuo ensilado en la dieta animal, teniendo en cuenta conversión alimenticia, rendimiento y precios de mercado, a partir de datos expuestos en 2017 durante las reuniones de la Comisión Porcina coordinadas por el Programa Nacional de Porcino del Ministerio de Agricultura y Ganadería. ⁶

El siguiente cuadro resume los principales factores de valorización del producto ensilado, tomando como referencia la producción de 229,16 kg de residuos sólidos biodegradables por tratar por día, generados en el comedor institucional del TEC [9].

Los cálculos se basaron en los supuestos de cuatro estrategias de alimentación, estimando la producción de kg de cerdo por día, asociada a la respuesta animal esperada según cada estrategia de alimentación descrita en el cuadro 6, a saber: 1) dieta balanceada con uso de residuos estabilizados, 2) dieta sin balancear a base solo de residuos estabilizados 3) dieta balanceada con residuos frescos y 4) dieta sin balancear a base de residuos frescos. En el caso de los residuos estabilizados, se utilizó como referencia el T2 al ser el que ofrecía la posibilidad de una dieta balanceada de menor costo.

Cuadro 6. Factores de Valorización de los residuos

Factores	Residuo estabilizado y balanceado	Residuo estabilizado sin balancear	Residuo fresco balanceado	Residuo fresco sin balancear
Residuos sólidos biodegradables generados (kg)	229,16	229,16	229,16	229,16
Costo del alimento (USD/kg)	0,38	0,33	0,34	-
Cantidad de alimento (kg)	916,64	229,16	916,64	229,16
*FCR	3	5,5	3	5,5
Kilogramos de cerdo producido/ día	305,5	42	305,5	42
Rendimiento canales (%)	73	73	73	73
Costo Alimentación explotaciones porcinas (%)	80	80	80	80
Canal cerdo (kg)	223	30,4	223	30,4
Precio Canal (USD/kg))	2	2	2	2
Ingreso por venta canal/ día (USD)	515	70	515	70
Ganancia canal/ día (USD)	79	- 28	119	48

Nota. *(FCR: Factor de conversión Alimenticia).

Se desprende del cuadro anterior que, ante los escenarios de uso de los residuos estabilizados o frescos, balanceados o no, habrá un resultado que podrá ser menos deseable en algunos

⁶ Comisión Nacional Porcina [Comunicación personal durante reuniones de Comisión] 5 de diciembre 2017.

casos para el sector productivo, en términos de producción de carne de cerdo. Es decir, en los casos que se ofrece una dieta sin balancear solo con los residuos, la producción diaria de carne será menor y por tanto los ingresos por canal. Partiendo del hecho que estabilizar el residuo supone además un costo adicional, un plan de alimentación de cerdos de engorde con residuos estabilizados sin balancear resultaría en pérdidas económicas para la operación, no así en el caso de residuos sólidos frescos sin balancear. Sin embargo, en este último caso el cual se cree que es uno de los escenarios más usuales en el caso costarricense actual, podría incurrirse en riesgos de inocuidad, pues al tratarse de residuos sin estabilizar o fermentar, las condiciones fisicoquímicas de humedad y pH podrían suponer una mayor propensión a la contaminación del producto. En este caso, habría afectación desde la perspectiva de bienestar animal, aunque se cumpliera ambientalmente con la reutilización del residuo.

Ahora bien, utilizar residuos estabilizados y balanceados en la dieta animal generaría mayor utilidad que los dos casos anteriores, pero menor que la utilización de residuos sólidos frescos balanceados. En ambos casos se cumpliría con lo técnicamente más adecuado desde el punto de vista de nutrición animal, pero igualmente se correría el riesgo en el caso de los residuos frescos de poder tener contaminación del producto debido a su falta de estabilización.

Desde la perspectiva ambiental, valorizar los residuos mediante su uso en alimentación animal puede considerarse también desde ejemplos concretos como los costos evitados al ambiente fomentando de igual manera la economía circular. Se esperaría que al valorizar y usar en un circuito más corto el residuo, se evitaría mayor desgaste de los vehículos de recolección al tener que transportar menos residuos. A su vez, esto implicaría menor generación de sustancias como monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), y dióxido de carbono (CO₂). Otro factor sería un uso más adecuado de los rellenos sanitarios, donde se podría tener una vida útil más larga de estos al disponer menos residuos sólidos en ellos. A manera de resumen se muestra en el siguiente cuadro un poco más detallado el costo evitado con su respectiva justificación.

Cuadro 7. Descripción de Costos Ambientales evitados

Costo Evitado	Justificación
Combustible y mantenimiento del Camión Recolector (aceites, filtros, llantas, entre otros)	Menos viajes del TEC al Relleno Sanitario
Mano de Obra de recolección y mantenimiento de contenedores en el TEC	Tratamiento de los residuos sólidos biodegradables del comedor del TEC
Maquinaria y costos dentro del Relleno	Menos costos de mano obra de los empleados del relleno, y disminución del mantenimiento y combustible de la maquinaria

Si se lograra estabilizar los residuos sólidos biodegradables por medio de compostaje y tratar los 229,16 kilogramos por día que se generan en el restaurante institucional, bajo un escenario de 5 días por semana y 32 semanas al año (solo periodo lectivo), tomando en cuenta factores de emisión de 0,0581 kg CH₄/kg de residuos sólidos [10], se dejarían de emitir 44,7 toneladas de CO₂ equivalente al año, por la disposición en relleno sanitario.

Conclusiones

A partir de los resultados y análisis realizados, se considera que es posible la creación de un suplemento alimenticio para cerdos a partir de residuos sólidos biodegradables, con una adecuada fermentación anaeróbica. Lo anterior puesto que en un periodo de 10 días se logró estabilizar el producto por medio de una fermentación con bacterias eficientes, donde se obtuvieron pH bajos y con menor humedad que los residuos frescos, además de resultar inocuo al no detectarse presencia de patógenos como *Salmonella* y Coliformes fecales que pudieran dañar la salud de los animales. El producto de menor costo es el correspondiente al tratamiento dos (T2), ya que puede ser incluido en mayor cantidad en una dieta balanceada para cubrir las necesidades nutricionales de los cerdos, a menor costo por kilogramo, permitiendo que puedan manifestar su potencial productivo en un ambiente sanitario y ambientalmente adecuado.

El producto obtenido se clasifica como energético, y podría sustituir el maíz que se usa comúnmente en las dietas para cerdos, siendo este uno de los rubros de importancia económica en los balances actuales y tratándose de un insumo mayormente importado en el caso costarricense.

La investigación realizada, puede tomarse como una alternativa para minimizar el impacto negativo de los residuos sólidos biodegradables al medio. Por un lado, propone cumplir con indicaciones de la Ley 8839 [1] sobre la gestión integral de residuos sólidos, adicionalmente, estará acorde a lo establecido en la ley 7451 [11] sobre el bienestar animal, ya que se estaría dando la valorización correcta adaptada a las necesidades nutricionales de los cerdos. Además, técnicamente, al estabilizar el residuo y llevarlo al grado de acidez mostrado en los tratamientos, es posible inhibir el crecimiento de las bacterias patógenas analizadas, y muy posiblemente el de otros patógenos. En todo caso, es recomendable realizar otros estudios para analizar el efecto del proceso de ensilaje en otros organismos patógenos, así como el de otros tratamientos avalados por la legislación costarricense y la OIE ⁷, tanto en los patógenos como en variables técnico-ambientales.

Se sugiere para futuras réplicas de este experimento, el hacer siempre la homogenización de los residuos con el fin de que se logre un patrón repetitivo cada vez que se elabore el ensilado y prever a futuro una relativa estandarización de la composición química del producto, dado en principio también por el balance alimenticio de la fuente del residuo (restaurante institucional). También podrán considerarse otros insumos que podrían ayudar al control de la humedad y con menor costo, como el bagazo de caña, bokashi u otra fibra que tenga buena capacidad de absorción de humedad, debiendo evaluarlas con la repetición de la metodología propuesta para conocer la respuesta a nivel de parámetros técnicos. Además, es importante que se tenga un control estricto de los factores externos, tales como personas, insectos, u otros, que puedan afectar el sistema.

Es válido también considerar que hacer pruebas con tratamientos donde no se incluyan microorganismos eficientes, podría arrojar diferentes resultados con menores costos, con investigación previa. Igualmente se sugiere avanzar hacia la realización de pruebas formales de aceptación aparente y respuesta animal, de los productos estabilizados obtenidos. Finalmente, deberá ahondarse en resultados a partir del escalamiento del proceso y la estimación de la vida útil del producto.

7 Comisión Nacional Porcina [Comunicación personal durante reuniones de Comisión] 5 de diciembre 2017.



Referencias

- [1] ASAMBLEA LEGISLATIVA DE LA REPÚBLICA DE COSTA RICA, “Ley para la Gestión Integral de Residuos N° 8839”. San José, Costa Rica: 2010. http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=68300&nValor3=83024&strTipM=TC#ddown
- [2] G. Jaramillo, & L. Zapata, L. “Aprovechamiento de los residuos solidos organicos en Colombia”. Colombia: Universidad de Antioquia, 2008. <http://uniciencia.ambientalex.info/infoCT/Apressolorgco.pdf>
- [3] E. Mosquera Perea, “Evaluación de la calidad de pellets extruidos elaborados con materias primas no convencionales para la alimentación de cerdos”. Tesis, Palmira, Colombia, 2014 http://www.bdigital.unal.edu.co/48701/1/Dissa_Enith_Mosquera_Perea.pdf
- [4] M. Granja, O. Menendez, J. Jeomans, C. Hernandez, y R. Botero, “ESTABILIZACIÓN ANAERÓBICA DE DESECHOS DE COMIDA PARA LA ELABORACIÓN DE SUPLEMENTOS ALIMENTICIOS PARA CERDOS”. Limón, Costa Rica: Universidad EARTH, 2005 file:///C:/Users/AMD/AppData/Local/Temp/v1-01_GranjaMenendez.pdf
- [5] D. Frias Aranda,5). “EVALUACION DE METODOS PARA MEDIR LA PALATABILIDAD EN CERDOS DE RECRÍA”. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Veterinarias y Pecuarias, 2015. <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/131822/Evaluacion-de-metodos-utilizados-para-medir-la-palatabilidad-en-cerdos-de-recria.pdf;sequence=1>
- [6] M. Flores, R. Sanchez, R. Gutierrez, y F. Echeverria, “MICROSILOS: UNA ALTERNATIVA PARA PEQUEÑOS PRODUCTORES”. Mexico: INIFAP 2014. <http://www.zacatecas.inifap.gob.mx/publicaciones/microsilos.pdf>
- [7] R. Lizardo, “Utilización alimentación líquida fermentada”. España: Comunidad Profesional Porcin, 2007. https://www.3tres3.com/especial_alimentacion_liquida/utilizacion-alimentacion-liquida-fermentada_1847/
- [8] National Research Council, “Nutrient requirements of swine / Committee on Nutrient Requirements of Swine, Board on Agriculture and Natural Resources, Division on Earth and Life Studies”. 11th Ed. Washington CD, USA: National Academy of Sciences, 2012, Ch 16, pp210-238
- [9] Brenes, L., Jiménez, M., Campos, R. & Gamboa, M. (2017). Entender las pérdidas de alimentos para actuar sobre la gestión de residuos desde la minimización. Libro de actas. VII Simposio Iberoamericano en Ingeniería de Residuos, Universidad de Cantabria, Santander, pp.762. ISBN: 978-84-697-3824-5.
- [10] Instituto Meteorológico Nacional. 2017. Factores de emisión gases efecto invernadero. Séptima edición. Costa Rica
- [11] ASAMBLEA LEGISLATIVA DE LA REPÚBLICA DE COSTA RICA, “Bienestar de los Animales , Ley 7451”. San José, Costa Rica: 1994. http://lebi.ucr.ac.cr/images/files/ley_bienestar-animales.pdf