UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

Propuesta de mejora de un fertilizante orgánico a partir de la vinaza de un ingenio

Trabajo de graduación presentado por Gabriela Elizabeth Marroquín Siguí para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería en Biotecnología Industrial

Guatemala

2024

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

Propuesta de mejora de un fertilizante orgánico a partir de la vinaza de un ingenio

Trabajo de graduación presentado por Gabriela Elizabeth Marroquín Siguí para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería en Biotecnología Industrial

Guatemala

2024

Vo. Bo.

(f)

Licda. Ana Luisa Mendizábal Solé

Terna examinadora

(f)

Licda. Ana Luisa Mendizábal Solé

(f)

Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano

(f)

Ing. Carmen Alicia Ortíz Pineda

Fecha de aprobación: Guatemala, 12 de diciembre de 2024

PREFACIO

Recuerdo claramente las múltiples ocasiones en las que las personas me preguntaban si estaba segura de estudiar dos carreras de forma simultánea, advirtiéndome que seguramente desertaría a mitad del camino. Por el contrario, cinco años han transcurrido desde entonces y, al lograrlo, comprobé que Walt Disney tenía razón, hacer lo imposible es una forma de diversión.

El presente trabajo de graduación es una prueba del inmenso amor que Dios ha tenido hacia mí, colmándome de la sabiduría necesaria para llegar hasta donde estoy hoy mismo. Por esa razón, quiero expresar mi gratitud por todas las oportunidades que ha puesto en mi camino, pero principalmente, por haberme dado el mejor de los regalos: mi familia. Ellos han sido mi motor incluso sin darse cuenta, y es también gracias a sus consejos, enseñanzas y apoyo que he logrado levantarme luego de muchas caídas y de mantener la cabeza en alto a pesar de las adversidades. Especialmente gracias a mi madre, Ruth Marroquín, por ser mi mano derecha y mi cómplice en todo momento; a mi padre, Estuardo Reyes, por la oportunidad de formarme profesionalmente; a mis abuelitos, Héctor H. Marroquín y Elizabeth Siguí, por su paciencia y su amor incondicional, y a mi tío, Héctor R. Marroquín, por lograr sacarme una sonrisa hasta en los peores momentos.

Quisiera también agradecer a la Lic. Ana Luisa Mendizábal, quien no solamente me asesoró durante la realización de este trabajo, sino también ha sido una excelente mentora académica y personalmente; al Ing. Gamaliel Zambrano, al Ing. Luis Núñez, al Ing. Eddy Meléndez y al Ing. Andrés Lam, por su apoyo y por sus consejos no solamente en la ejecución del trabajo de graduación, sino también a lo largo de mi formación profesional en la Universidad Del Valle de Guatemala; al Lic. Edwinth Rodríguez, por su ayuda con los análisis químicos y, por supuesto, a Verónica, Héctor, José y Cristian, quienes forman parte importante del Laboratorio de Operaciones Unitarias y siempre estuvieron dispuestos a brindarme su apoyo.

Por último, quiero agradecer a la Ing. Ingrid Yurrita y a la Ing. Isabel Valdés, por estar presentes en todo momento y ser una luz en mi trayectoria universitaria. Así como a mis amigos, Diego, Christian, Pablo, Eduardo, Andrea, Eli, Dani, Yizel y Karen, por siempre confiar en mí y motivarme en los momentos en los que creí no poder seguir adelante.

ÍNDICE

LISTA DE CÁLCULOS ..... **vi**
LISTA DE CUADROS ..... **vii**
LISTA DE ECUACIONES ..... **x**
LISTA DE FIGURAS ..... **xi**
RESUMEN ..... **xiii**
ABSTRACT ..... **xiv**
I. INTRODUCCIÓN **1**
II. OBJETIVOS **2**
III. JUSTIFICACIÓN **3**
IV. ANTECEDENTES **5**
V. MARCO TEÓRICO **6**
A. Generalidades de los fertilizantes 6
1. Definición *6*
2. Tipos de fertilizantes *6*
3. Caracterización del fertilizante orgánico *7*
B. Cultivo de caña 8
1. Requerimiento de nutrientes *8*
2. Características generales del bagazo de caña de azúcar *9*
C. Subproductos destacables involucrados en la producción de bioetanol 10
1. Características generales y obtención de ceniza del bagazo de caña *10*
2. Características generales y obtención de la vinaza *12*
D. Aprovechamiento de residuos y economía circular 14
E. Diseño del experimento 15
1. Análisis factorial 2^n *15*
2. Tamaño de muestra *15*
F. Métodos analíticos 16
1. Método de Kjeldahl *16*
2. Espectroscopía de absorción atómica *20*
G. Análisis comparativo entre mezclas formuladas 22
1. Análisis de varianza de un factor (Anova de un factor) *22*
H. Operaciones unitarias involucradas en el proceso 24
1. Evaporación *24*
2. Mezclado *26*
3. Secado *27*
4. Molienda *29*

VI. METODOLOGÍA 32
A. Determinación de propiedades físicas de la vinaza y la ceniza del bagazo de caña 32
B. Diseño del experimento 33
C. Elaboración de granulados de diferentes mezclas 33
D. Determinación de propiedades físicas de las mezclas para fertilizante orgánico sólido .. 36
E. Caracterización química de las mezclas para fertilizante orgánico sólido 37
VII. RESULTADOS 40
VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS 46
IX. CONCLUSIONES 55
X. RECOMENDACIONES 56
XI. BIBLIOGRAFÍA 57
XII. ANEXOS 63
A. DATOS DE PLACA 63
B. DATOS ORIGINALES 67
C. DATOS CALCULADOS 74
D. CÁLCULOS 79
E. ANÁLISIS DE ERROR 84
F. BALANCE DE MASA Y ENERGÍA 87
G. ILUSTRACIONES 88
H. GLOSARIO 100

LISTA DE CÁLCULOS

Cálculo 1. Cálculo del análisis factorial para determinar la cantidad de tratamientos necesarios 79
Cálculo 2. Determinación de la cantidad de muestras de análisis necesarias para asegurar un nivel de confianza y margen de error aceptables 79
Cálculo 3. Ejemplo de cálculo de la preparación de soluciones para el análisis de muestras por espectroscopía de absorción atómica (solución madre) 80
Cálculo 4. Ejemplo de cálculo de la preparación de soluciones para el análisis de muestras por espectroscopía de absorción atómica (diluciones) 80
Cálculo 5. Ejemplo de cálculo de la determinación de minerales por espectroscopía de absorción atómica 81
Cálculo 6. Ejemplo de cálculo de la determinación de densidad de la ceniza de bagazo de caña de azúcar y productos finales de fertilizante orgánico 81
Cálculo 7. Ejemplo de cálculo de la determinación de porcentaje de nitrógeno 82
Cálculo 8. Balance de energía del sistema durante el proceso de evaporación de la vinaza 82
Cálculo 9. Determinación de la irradiación solar a partir de la intensidad lumínica del sol 83
Cálculo 10. Determinación del área de secado en bandejas expuestas al sol 83
Cálculo 11. Balance de energía del sistema durante el proceso de secado del producto final de fertilizante orgánico 83
Cálculo 12. Ejemplo de cálculo de la media de una muestra 84
Cálculo 13. Ejemplo de cálculo de incertidumbre de sumas y diferencias 85
Cálculo 14. Ejemplo de cálculo de incertidumbre de divisiones y multiplicaciones 85
Cálculo 15. Ejemplo de cálculo de la desviación estándar 86
Cálculo 16. Ejemplo de cálculo del coeficiente de variación 86

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Características del fertilizante orgánico 8
Cuadro 2. Composición química de la ceniza obtenida a partir de bagazo de caña de azúcar 11
Cuadro 3. Composición química de la vinaza 13
Cuadro 4. Proporciones de mezcla para la formulación de los fertilizantes orgánicos 35
Cuadro 5. Propiedades físicas de las materias primas y productos finales de fertilizante orgánico sólido 40
Cuadro 6. Propiedades químicas de los productos finales de fertilizante orgánico sólido 41
Cuadro 7. Comparación de las propiedades químicas de los productos finales de fertilizante orgánico sólido con valores teóricos para la caña de azúcar 42
Cuadro 8. Comparación de las propiedades químicas de los productos finales de fertilizante orgánico sólido con fertilizantes comerciales para la caña de azúcar 43
Cuadro 9. Análisis de varianza (Anova) para los productos finales de fertilizante orgánico sólido 44
Cuadro 10. Propuesta de operaciones unitarias y equipos correspondientes para producir el fertilizante orgánico sólido a mayor escala 44
Cuadro 11. Datos de placa de la cocina de inducción con horno eléctrico 63
Cuadro 12. Datos de placa de la báscula industrial 63
Cuadro 13. Datos de placa de la balanza de humedad 63
Cuadro 14. Datos de placa de la báscula de mesa 64
Cuadro 15. Datos de placa de la balanza analítica 65
Cuadro 16. Datos de placa del medidor de luz 65
Cuadro 17. Datos de placa de la unidad de digestión del Kjeldahl 65
Cuadro 18. Datos de placa del lavador de gases del Kjeldahl 66
Cuadro 19. Datos de placa de la unidad de destilación del Kjeldahl 66
Cuadro 20. Datos de placa del espectrofotómetro de absorción atómica 67
Cuadro 21. Datos originales de la concentración de macronutrientes obtenida en fertilizantes orgánicos formulados en otros estudios 67
Cuadro 22. Certificado de análisis de calidad de vinaza concentrada 67

Cuadro 23. Datos experimentales para determinar la densidad de una de las materias primas (ceniza de bagazo de caña de azúcar) y de los productos finales de fertilizante orgánico 68
Cuadro 24. Datos experimentales de intensidad lumínica utilizando un medidor de luz..... 68
Cuadro 25. Parámetros estadísticos de los datos experimentales de intensidad lumínica utilizando un medidor de luz..... 68
Cuadro 26. Datos experimentales para determinar el porcentaje de nitrógeno presente en las materias primas y de los productos finales de fertilizante orgánico por el método de Kjeldahl .. 69
Cuadro 27. Datos experimentales para determinar la cantidad de calcio presente en los fertilizantes orgánicos utilizando el método de espectroscopía de absorción atómica..... 73
Cuadro 28. Datos experimentales para determinar la cantidad de cobre presente en los fertilizantes orgánicos utilizando el método de espectroscopía de absorción atómica..... 73
Cuadro 29. Datos experimentales para determinar la cantidad de hierro presente en los fertilizantes orgánicos utilizando el método de espectroscopía de absorción atómica..... 73
Cuadro 30. Datos experimentales para determinar la cantidad de potasio presente en los fertilizantes orgánicos utilizando el método de espectroscopía de absorción atómica..... 73
Cuadro 31. Datos experimentales para determinar la cantidad de magnesio presente en los fertilizantes orgánicos utilizando el método de espectroscopía de absorción atómica..... 74
Cuadro 32. Datos experimentales para determinar la cantidad de manganeso presente en los fertilizantes orgánicos utilizando el método de espectroscopía de absorción atómica..... 74
Cuadro 33. Datos experimentales para determinar la cantidad de zinc presente en los fertilizantes orgánicos utilizando el método de espectroscopía de absorción atómica..... 74
Cuadro 34. Datos calculados para determinar el tamaño de muestra necesario para cada nutriente 74
Cuadro 35. Datos calculados de la ceniza de bagazo de caña de azúcar..... 75
Cuadro 36. Parámetros estadísticos de los datos experimentales de densidad de la ceniza de bagazo de caña de azúcar..... 75
Cuadro 37. Datos calculados de la densidad de los fertilizantes orgánicos 75
Cuadro 38. Datos calculados del porcentaje de nitrógeno presente en las materias primas y de los productos finales de fertilizante orgánico utilizando el método de Kjeldahl..... 75
Cuadro 39. Parámetros estadísticos de datos experimentales en determinación de calcio presente en los fertilizantes orgánicos utilizando el método de espectroscopía de absorción atómica 76

Cuadro 40. Parámetros estadísticos de datos experimentales en determinación de cobre presente en los fertilizantes orgánicos utilizando el método de espectroscopía de absorción atómica 76
Cuadro 41. Parámetros estadísticos de los datos experimentales en determinación de hierro presente en fertilizantes orgánicos utilizando el método de espectroscopía de absorción atómica 76
Cuadro 42. Parámetros estadísticos de los datos experimentales en determinación de potasio presente en fertilizantes orgánicos utilizando el método de espectroscopía de absorción atómica 76
Cuadro 43. Parámetros estadísticos de los datos experimentales en determinación de magnesio presente en fertilizantes orgánicos utilizando el método de espectroscopía de absorción atómica 77
Cuadro 44. Parámetros estadísticos de los datos experimentales en determinación de manganeso presente en fertilizantes orgánicos utilizando el método de espectroscopía de absorción atómica 77
Cuadro 45. Parámetros estadísticos de los datos experimentales en determinación de zinc presente en fertilizantes orgánicos utilizando el método de espectroscopía de absorción atómica 77
Cuadro 46. Resumen de datos calculados para las propiedades químicas de los productos finales de fertilizante orgánico utilizando el método de Kjeldahl y espectroscopía de absorción atómica 77
Cuadro 47. Resumen de los datos sometidos al análisis de varianza (Anova) de un factor realizado en Microsoft Excel 78
Cuadro 48. Análisis de varianza (Anova) de un factor realizado en Microsoft Excel correspondiente a los 3 diferentes fertilizantes orgánicos sólidos producidos 79

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Diseño factorial 15
Ecuación 2. Tamaño de muestra para una estimación por intervalo de la media poblacional..... 16
Ecuación 3. Reacción de digestión de la muestra 18
Ecuación 4. Reacción de conversión de iones amonio en amoniaco durante la destilación..... 18
Ecuación 5. Reacción de formación de iones amonio mediante la captura de amoniaco usando ácido bórico..... 18
Ecuación 6. Reacción de formación de iones amonio mediante la captura de amoniaco usando otros ácidos 18
Ecuación 7. Determinación de concentración de iones amonio capturados mediante valoración directa..... 19
Ecuación 8. Determinación de concentración de iones amonio capturados mediante valoración indirecta o por retroceso..... 19
Ecuación 9. Determinación de porcentaje de nitrógeno presente en una muestra al utilizar ácido bórico como solución receptora en la valoración 20
Ecuación 10. Determinación de porcentaje de nitrógeno presente en una muestra al utilizar una solución valorada de ácido como solución receptora en la valoración..... 20
Ecuación 11. Media aritmética..... 84
Ecuación 12. Incertidumbre de sumas y diferencias..... 85
Ecuación 13. Incertidumbre para operaciones con división y multiplicación 85
Ecuación 14. Desviación estándar 86
Ecuación 15. Coeficiente de variación..... 86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Dinámica de los nutrientes en un cultivo de caña de azúcar 9
Figura 2. Proceso de producción de alcohol etílico a partir de melaza 12
Figura 3. Esquema general de las tres etapas de las que consta el método de Kjeldahl 17
Figura 4. Tanque típico del proceso con agitación 27
Figura 5. Diagrama de bloques de las operaciones unitarias propuestas para el proceso de producción de fertilizante orgánico sólido 45
Figura 6. Curva de calibración de calcio realizada en el equipo de espectroscopía de absorción atómica PerkinElmer PinAAcle 900F 69
Figura 7. Curva de calibración de cobre realizada en el equipo de espectroscopía de absorción atómica PerkinElmer PinAAcle 900F 70
Figura 8. Curva de calibración de hierro realizada en el equipo de espectroscopía de absorción atómica PerkinElmer PinAAcle 900F 70
Figura 9. Curva de calibración de potasio realizada en el equipo de espectroscopía de absorción atómica PerkinElmer PinAAcle 900F 71
Figura 10. Curva de calibración de magnesio realizada en el equipo de espectroscopía de absorción atómica PerkinElmer PinAAcle 900F 71
Figura 11. Curva de calibración de manganeso realizada en el equipo de espectroscopía de absorción atómica PerkinElmer PinAAcle 900F 72
Figura 12. Curva de calibración de zinc realizada en el equipo de espectroscopía de absorción atómica PerkinElmer PinAAcle 900F 72
Figura 13. Diagrama de bloques de la producción del fertilizante orgánico sólido utilizando distintas proporciones de vinaza y ceniza de bagazo de la industria azucarera 87
Figura 14. Vinaza previo al proceso de evaporación 88
Figura 15. Vinaza durante el proceso de evaporación 88
Figura 16. Vinaza concentrada luego del proceso de evaporación 89
Figura 17. Ceniza de bagazo de caña de azúcar previo a ser mezclada con la vinaza concentrada 89
Figura 18. Ejemplo de mezcla resultante entre la vinaza concentrada y la ceniza de bagazo de caña de azúcar 90

Figura 19. Mezclas de diferentes proporciones de vinaza y ceniza de bagazo de caña de azúcar (productos finales de fertilizante orgánico sólido) durante el proceso de secado..... 90
Figura 20. Sistema para el análisis de nitrógeno por el método de Kjeldahl (digestor y lavador de gases)..... 91
Figura 21. Sistema para el análisis de nitrógeno por el método de Kjeldahl (unidad de destilación)..... 91
Figura 22. Ejemplo de coloración de la muestra de análisis previo a la titulación utilizando ácido clorhídrico para determinación de nitrógeno por el método de Kjeldahl 92
Figura 23. Ejemplo del viraje de color de la muestra de análisis luego de la titulación utilizando ácido clorhídrico para determinación de nitrógeno por el método de Kjeldahl..... 92
Figura 24. Viraje de color hacia "*baby pink*" de las muestras de análisis luego de ser tituladas para la determinación de nitrógeno por el método de Kjeldahl de materias primas..... 93
Figura 25. Viraje de color hacia "*baby pink*" de las muestras de análisis luego de ser tituladas para la determinación de nitrógeno por el método de Kjeldahl de productos finales de fertilizante orgánico sólido..... 93
Figura 26. Soluciones preparadas para el análisis de minerales de los productos finales de fertilizante orgánico mediante espectroscopía de absorción atómica 94
Figura 27. Equipo de espectroscopía de absorción atómica para la cuantificación de minerales presentes en las muestras de análisis 94
Figura 28. Producto final de fertilizante orgánico (45 %) 95
Figura 29. Producto final de fertilizante orgánico (50 %) 95
Figura 30. Producto final de fertilizante orgánico (55 %) 96
Figura 31. Ejemplo de determinación de densidad de ceniza de bagazo de caña de azúcar y productos finales de fertilizante orgánico sólido 96
Figura 32. Cocina de inducción con horno eléctrico 97
Figura 33. Medidor de luz para determinación de intensidad lumínica..... 97
Figura 34. Balanza de humedad..... 98
Figura 35. Ejemplo de visualización de resultados en la balanza de humedad 98
Figura 36. Balanza analítica..... 99
Figura 37. Báscula de mesa 99

RESUMEN

Se llevó a cabo la propuesta de mejora de un fertilizante orgánico mediante su elaboración en forma granulada en beneficio de un ingenio para facilitar su transporte, promoviendo la economía circular mediante la revalorización de residuos industriales. Se determinaron propiedades fisicoquímicas de tres formulaciones de fertilizantes orgánicos sólidos, a partir de la mezcla en distintas proporciones de vinaza y ceniza de bagazo de caña; estas incluyeron humedad y densidad como propiedades físicas, mientras que para las propiedades químicas se cuantificó el nitrógeno utilizando el método de Kjeldahl y el método de espectroscopía de absorción atómica para el resto de macronutrientes (potasio, calcio y magnesio) y micronutrientes (cobre, hierro, manganeso y zinc). Para el fertilizante 45 % se obtuvieron valores de densidad de 0.564 g/cm^3 y una humedad de 3.17 %, con concentraciones de nitrógeno de 1.23 %, potasio de 3.99 %, calcio de 1.12 %, magnesio de 0.378 %, cobre de 9.26 ppm, hierro de 465 ppm, manganeso de 47.4 ppm y zinc de 120 ppm. El fertilizante 50 % presentó una densidad de 0.647 g/cm^3 y una humedad de 2.43 %, con concentraciones de nitrógeno de 1.19 %, potasio de 4.12 %, calcio de 1.15 %, magnesio de 0.375 %, cobre de 12.2 ppm, hierro de 318 ppm, manganeso de 46.8 ppm y zinc de 97.5 ppm. Finalmente, el fertilizante 55 % presentó una densidad de 0.587 g/cm^3 y una humedad de 3.51 %, con concentraciones de nitrógeno de 1.16 %, potasio de 3.46 %, calcio de 1.17 %, magnesio de 0.374 %, cobre de 15.6 ppm, hierro de 302 ppm, manganeso de 44.5 ppm y zinc de 103 ppm. Asimismo, se realizaron comparaciones con fertilizantes comerciales existentes, en donde se comprobó que existe diferencia en cuanto a la concentración de nutrientes presentes en las mezclas; sin embargo, también se determinó que los contenidos de nutrientes dependerán de los requerimientos de los suelos. Finalmente, se propusieron equipos para llevar a cabo un proceso industrial a mayor escala, de acuerdo con las operaciones unitarias implicadas en el proceso, dentro de las que se pueden mencionar evaporación, mezclado, secado, molienda y diferentes puntos de almacenamiento. Por todo lo mencionado anteriormente, para futuras investigaciones se recomienda también llevar a cabo pruebas de campo con los fertilizantes, así como evaluar la disponibilidad de recursos y equipos del ingenio interesado para integrar la producción de fertilizantes dentro las operaciones que se llevan a cabo normalmente.

ABSTRACT

The improvement proposal for an organic fertilizer was carried out by producing it in granular form to benefit a sugar mill by facilitating its transportation while promoting circular economy through the valorization of industrial waste. Physicochemical properties of three formulations of solid organic fertilizers were determined, using varying proportions of vinasse and sugarcane bagasse ash. These included moisture content and density as physical properties, while nitrogen content was quantified using the Kjeldahl method, and other macronutrients (potassium, calcium, and magnesium) and micronutrients (copper, iron, manganese, and zinc) were measured using atomic absorption spectroscopy. For the 45 % fertilizer, density values of 0.564 g/cm³ and a moisture content of 3.17 % were obtained, with nutrient concentrations of 1.23 % nitrogen, 3.99 % potassium, 1.12 % calcium, 0.378 % magnesium, 9.26 ppm copper, 465 ppm iron, 47.4 ppm manganese, and 120 ppm zinc. The 50 % fertilizer presented a density of 0.647 g/cm³ and a moisture content of 2.43 %, with nutrient concentrations of 1.19 % nitrogen, 4.12 % potassium, 1.15 % calcium, 0.375 % magnesium, 12.2 ppm copper, 318 ppm iron, 46.8 ppm manganese, and 97.5 ppm zinc. Finally, the 55 % fertilizer had a density of 0.587 g/cm³ and a moisture content of 3.51 %, with nutrient concentrations of 1.16 % nitrogen, 3.46 % potassium, 1.17 % calcium, 0.374 % magnesium, 15.6 ppm copper, 302 ppm iron, 44.5 ppm manganese, and 103 ppm zinc. Comparisons were made with existing commercial fertilizers, which confirmed differences in nutrient concentrations among the mixtures. However, it was also determined that the nutrient contents should be adapted to the requirements of specific soils. Lastly, equipment was proposed to carry out an industrial-scale process, in alignment with the unit operations involved in the production process, including evaporation, mixing, drying, grinding, and various storage stages. Based on the above, it is recommended for future research to conduct field tests with the fertilizers and evaluate the availability of resources and equipment at the interested sugar mill to integrate fertilizer production into its regular operations.

I. INTRODUCCIÓN

La estructura productiva de Guatemala se caracteriza por su dependencia del sector agrícola. La riqueza natural del país ha permitido el desarrollo de una gran variedad de cultivos que constituyen uno de los principales motores de la economía nacional, aspecto que se refleja en su contribución al PIB y en su capacidad para generar empleo y divisas por exportación (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación [MAPA], 2021). Sin embargo, la sostenibilidad de las prácticas agrícolas ha sido un desafío persistente, especialmente en un contexto en el que los fertilizantes químicos tradicionales han generado preocupaciones ambientales y de salud pública.

Los fertilizantes químicos han contribuido al rendimiento de los cultivos, produciendo un aumento en la producción de alimentos en el mundo; en el período de 2014-2015, el consumo de fertilizantes a nivel mundial fue de 181.9 millones de toneladas. Como se mencionó, la agricultura convencional depende de la aplicación de dichos fertilizantes para lograr un mayor rendimiento en los cultivos, pero su aplicación excesiva ha producido eutrofización, toxicidad de las aguas, contaminación de aguas subterráneas, contaminación del aire, degradación del suelo, desequilibrios biológicos y reducción de la biodiversidad (González, 2019).

En este escenario, la vinaza, un subproducto líquido resultante del proceso de producción de etanol a partir de azúcar en los ingenios, se presenta como una alternativa y oportunidad de cambio. La vinaza ha sido históricamente considerada como un residuo problemático debido a su elevado contenido de materia orgánica y su potencial como contaminante en caso de no manejarla adecuadamente. Para abordar esta problemática, actualmente existen varios procesos destinados a la valorización de la vinaza de caña de azúcar. Entre ellos, se encuentran métodos que incluyen metanización seguida de ósmosis inversa, aunque estos suelen tener un elevado coste operativo. Otros enfoques implican un compostaje o la combinación de vinaza con otros productos para la elaboración de fertilizantes (Martínez, 2012).

II. OBJETIVOS

A. General

Realizar una propuesta de mejora de un fertilizante orgánico mediante su elaboración en forma granulada en beneficio de un ingenio para facilitar su transporte.

B. Específicos

1. Determinar las propiedades fisicoquímicas de tres formulaciones de fertilizante orgánico sólido, a partir de la mezcla en distintas proporciones de vinaza y ceniza de bagazo de caña, para su uso en el cultivo de caña de azúcar.
2. Comparar las características químicas del fertilizante orgánico sólido con las de fertilizantes comerciales para determinar si alcanza los requerimientos comunes del cultivo de caña de azúcar.
3. Realizar una propuesta técnica de la producción de un fertilizante orgánico sólido para la puesta en marcha del proceso a mayor escala.

III. JUSTIFICACIÓN

El tratamiento de residuos industriales es un tema que ha adquirido interés a lo largo de los años, especialmente en aquellos países en los que existen regulaciones gubernamentales para controlar el grado de contaminación producido por las industrias. En países como Guatemala, no existe un control riguroso para estas situaciones; sin embargo, debido a la problemática medioambiental que se afronta hoy en día, es importante encontrar maneras de tratar dichos residuos, para lo cual una iniciativa viable puede ser darles un valor agregado mediante la elaboración de productos beneficiosos a la comunidad (Alfaro y Alfaro, 1996).

En 2021, la producción mundial de etanol fue de 27.2 billones de galones, siendo la caña de azúcar la principal fuente de azúcares, al ser la materia prima que proporciona el mayor rendimiento para dicha producción (Refinadora Costarricense de Petróleo [RCP], 2023). Asimismo, cabe mencionar que Guatemala es el mayor productor de etanol a nivel centroamericano, y tiene una capacidad instalada de 65 millones de galones de etanol por año (Asociación de Combustibles Renovables [ACR], 2020). Un aspecto alarmante de las cifras mencionadas es la vinaza, el principal residuo orgánico en la obtención de etanol, pues por cada litro de etanol producido se obtienen entre 12 y 15 litros de vinaza (Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar [Conadesuca], 2016). Estudios realizados sobre este residuo han revelado su naturaleza contaminante debido a que presenta un pH bajo y un alto contenido de materia orgánica disuelta y en suspensión, lo que complica su degradación y podría provocar serios problemas ambientales en los recursos hídricos donde se descarga (Camacho y Duharte, 2018). Por sus características, al volcar la vinaza a cuerpos de agua, consume el oxígeno disuelto y provoca elevada mortandad de la flora y la fauna acuática (Sotomayor, Morandini, Sanzano y Rojas, 2018).

Si bien existen técnicas conocidas para dar tratamiento a este tipo de residuos en donde se llevan a cabo operaciones de mezcla con otros productos para producir un fertilizante orgánico, uno de los problemas que se ha presentado en la obtención de estos es el uso de compuestos inertes para que estos actúen como aglomerantes, y así dar consistencia y homogeneidad al producto final. Esto representa un inconveniente en términos de aprovechamiento de residuos, ya que puede implicar una inversión adicional a los recursos que ya se disponen dentro del ingenio (Martínez, 2012).

En este punto, surge la importancia de la ceniza del bagazo de caña de azúcar, el residuo agroindustrial sólido que resulta luego de la quema del bagazo en calderas para la cogeneración de energía (Millones, Muñoz y Villanueva, 2023). Este es un residuo generado en abundancia, del que se estima un volumen anual de 4 millones de toneladas, pues por cada tonelada de bagazo quemado se generan aproximadamente 25 kg de ceniza, causando que su eliminación inadecuada puede resultar en un impacto perjudicial al medio ambiente (Pérez, Varela, y Mena, 2023).

Actualmente, en el ingenio interesado, la vinaza se utiliza como fertilizante líquido. A causa de esto, los costos de transporte de dicho fertilizante se elevan debido a que implica movimiento de agua, mayoritariamente; por su parte, las cenizas del bagazo de la caña de azúcar se utilizan para mejorar el pH de las tierras de los cultivos. Sin embargo, no existe una formulación específica de un fertilizante que combine ambos residuos para mejorar sus características y aprovechar su potencial. Por esta razón, la presente investigación aborda este problema proponiendo la elaboración un fertilizante orgánico sólido a partir de la vinaza y haciendo uso de las cenizas del bagazo de la caña, lo que resultaría beneficioso en términos de facilidad de transporte y de valoración de residuos industriales sin necesidad de utilizar ningún aglomerante, con lo cual se pretende abrir una brecha de investigación acerca del desarrollo de productos derivados de la combinación de residuos agrícolas.

IV. ANTECEDENTES

Actualmente, en Guatemala no existe la infraestructura necesaria para un manejo adecuado de los residuos generados, tanto a nivel industrial como domiciliar. La recolección separada y la recuperación de residuos con potencial de reutilización son esfuerzos que aún parecen aislados y se practican solamente cuando la remuneración económica es evidente, puesto que tampoco existe una legislación, ni suficiente consciencia ambiental para lograr una economía circular en donde los residuos puedan aprovecharse (United Nations [UN], 2018).

Se ha reportado que los desechos de las actividades agrícolas son uno de los tipos de desechos que más se generan en el país, siendo estos, en su mayoría, materia orgánica. Dentro de esta problemática es posible mencionar la vinaza, un residuo de la producción de etanol a partir de melazas o jugos de caña de azúcar que ha llamado la atención de investigadores científicos, con el fin de aumentar los esfuerzos para gestionar adecuadamente este desecho y evitar efectos perjudiciales al medio ambiente.

Lo anterior ha conducido al desarrollo de distintos estudios para el aprovechamiento de la vinaza por medio de la producción de fertilizantes. Tal como en el estudio de López y Aguilar (2020), en donde se concluyó que es posible producir un fertilizante orgánico sólido a partir de vinaza, utilizando una mezcla de pajilla de arroz y ceniza de pajilla de arroz como aditivo, en proporciones de 45, 50 y 55 % del aditivo con respecto a la cantidad de vinaza agregada. Esto con el fin de darle un valor agregado también a dicho residuo para reducir no solamente los impactos de la industria azucarera, sino también de la del arroz. Por otra parte, es importante mencionar la patente creada por Martínez (2012), en la que se propuso un procedimiento para obtener un producto sólido fertilizante y biocombustible a partir de vinazas de caña de azúcar, en donde para conseguir el producto deseado, el aditivo preparado consistió en una mezcla de bagazo de caña de azúcar fresco y cenizas de bagazo.

V. MARCO TEÓRICO

A. Generalidades de los fertilizantes

1. Definición

Se le denomina fertilizante a cualquier material que contenga uno o más nutrientes esenciales y que se agregue en el suelo o se aplique sobre follaje de las plantas con el propósito de complementar el suministro de dichos nutrientes (Vera, 2019).

2. Tipos de fertilizantes

Los fertilizantes suelen clasificarse según su origen en:

a. Orgánicos: comprenden a aquellos productos cuya materia procede de los reinos animal o vegetal y contiene uno o varios nutrientes principales.
b. Minerales: todos aquellos productos procedentes de minerales o de cenizas, obtenidos o preparados por medios químicos, físicos, o por ambos.

(Carbonero, 1984)

A su vez, los fertilizantes pueden clasificarse según su composición:

a. Simples: aquellos fertilizantes que contienen un solo nutriente principal: N, P, K, aunque formen parte de ellos otros nutrientes secundarios o microelementos.
b. Compuestos: productos que contienen, al menos, dos nutrientes principales en forma asimilable por las plantas.

(Carbonero, 1984)

Cabe mencionar que los abonos compuestos también se pueden clasificar en:

a. Mezclados: aquellos que, conteniendo más de uno de los nutrientes principales: N, P, K, se obtienen por mezcla mecánica de abonos simples, en general en forma sólida, con o sin uso de agua o vapor para su granulación.
b. Complejos: son los que contienen más de uno de los tres nutrientes principales y se obtienen por combinación química en un proceso de reacción química distinta de la simple adición de vapor o agua para su granulación.

(Carbonero, 1984)

Por último, los fertilizantes también pueden clasificarse por su presentación en:

a. Sólidos: cuando tienen una presentación en forma de gránulos, cristales, o polvo, según el procedimiento seguido. Cada productor decide cuál usar, dependiendo de su necesidad.
b. Líquidos: se obtienen por solución de abonos sólidos o por dilución de algunas fases intermedias en la fabricación de estos, pero no suelen ser comunes debido a su dificultad de transportación y baja concentración de nutrientes que contienen, aunque son de rápida absorción por las plantas.
c. Gaseosos: se limitan al amoníaco anhidro, que es el abono de mayor riqueza y es gaseoso en condiciones normales.

(Carbonero, 1984)

3. Caracterización del fertilizante orgánico

Específicamente, cuando se habla entonces de un fertilizante orgánico, se hace referencia a aquellos productos obtenidos a partir de residuos o de desechos animales, vegetales y a los subproductos de estos que se han obtenido a partir de algún proceso, como lo es la vinaza, un subproducto del proceso de destilación (Vera, 2019).

La mayoría de los productos orgánicos, por su parte, posee bajos contenidos de elementos nutritivos que, no obstante, deben tenerse en cuenta puesto que la aplicación de estos productos al suelo se hace en cantidades significativas, debido a que su objetivo principal es mantener el contenido de materia orgánica en el suelo (Vera, 2019).

Por esta razón, el aporte de elementos nutritivos en forma orgánica es un medio para incrementar la reserva de los mismos y, por tanto, el nivel de fertilidad. La liberación lenta y progresiva de estos es una garantía de que elementos móviles, como el nitrógeno, permanecen retenidos en el suelo y no son lavados con facilidad (Vera, 2019).

Es importante tener en consideración que este tipo de fertilizante contiene porcentajes mínimos y máximos de materia orgánica y otros elementos. Estos se pueden visualizar en el *Cuadro 1*.

Cuadro 1. Características del fertilizante orgánico

Elemento	Máximo o mínimo	Límite admitido
N orgánico	Mínimo	2 % sobre materia seca
N + P + K	Mínimo	6 % sobre el peso total
Materia orgánica total	Mínimo	% sobre materia seca
Relación C/N	Mínimo	25; máximo 35
Humedad	Máximo	35 %
Cadmio	Máximo	30 ppm
Cobre	Máximo	1500 ppm
Níquel	Máximo	350 ppm
Plomo	Máximo	1000 ppm
Zinc	Máximo	3000 ppm
Mercurio	Máximo	20 ppm
Cromo	Máximo	750 ppm

Fuente: (Vera, 2019, p.6)

B. Cultivo de caña

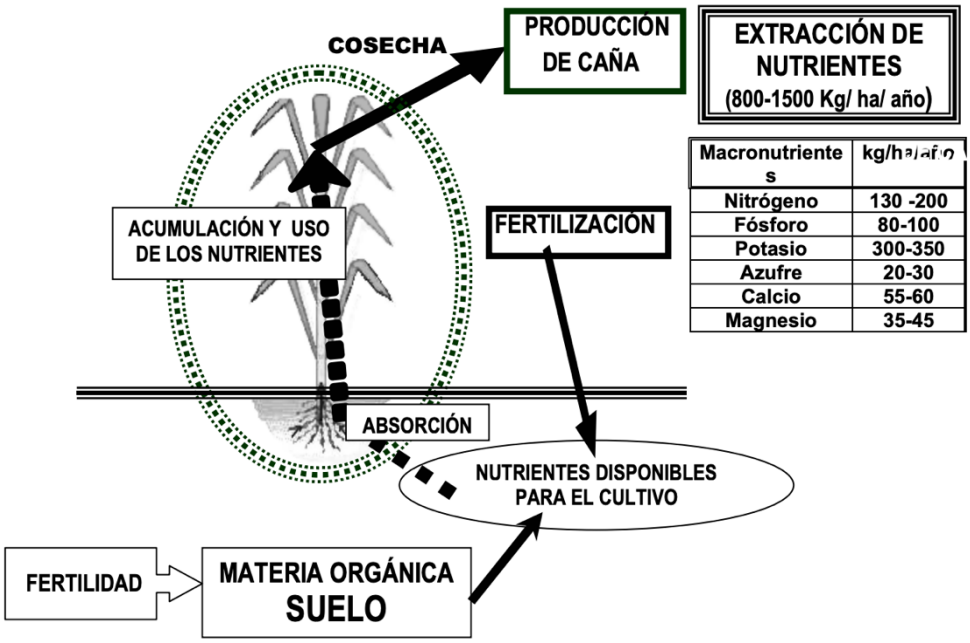
1. Requerimiento de nutrientes

Las plantas como la caña de azúcar requieren de 16 elementos esenciales para su crecimiento y desarrollo. Estos nutrientes comprenden el carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S), molibdeno (Mo) y cloro (Cl). Otro elemento que también se debe incluir es el silicio (Si) que, a pesar de no ser considerado un elemento esencial, resulta benéfico en la nutrición del cultivo de caña de azúcar (Melgar, Meneses, Orozco y Pérez, 2014).

Es importante tener en cuenta que el carbono, el hidrógeno y el oxígeno provienen del agua y del aire, y son los elementos que constituyen la mayor parte del peso de las plantas. Por su parte, el resto de los elementos son minerales y provienen del suelo o son adicionados mediante fertilizantes (Melgar, Meneses, Orozco y Pérez, 2014).

La caña de azúcar posee altos requerimientos nutricionales debido a su elevada capacidad de producción de material vegetal (tallos, follaje, cepa y raíces) y la prolongada duración de su ciclo, razón por la que se efectúa una elevada extracción de nutrientes del suelo, que puede alcanzar niveles de 800-1500 kg de nutrientes por hectárea por año, destacándose por cantidad algunos macronutrientes (*Figura 1*). Es derivado de esto, que este tipo de cultivo requiere de la ejecución de un programa apropiado para fertilización, capaz de restituir al suelo lo extraído por el cultivo, especialmente aquello que se pierde mediante la materia prima que es cosechada y cosechada en el ingenio (Romero et al., 2004).

Figura 1. Dinámica de los nutrientes en un cultivo de caña de azúcar



Macronutrientes	kg/ha/año
Nitrógeno	130 -200
Fósforo	80-100
Potasio	300-350
Azufre	20-30
Calcio	55-60
Magnesio	35-45

Fuente: (Romero et al., 2004, p.2)

2. Características generales del bagazo de caña de azúcar

El bagazo es el residuo lignocelulósico fibroso remanente de los tallos de caña, obtenido a la salida del último molino del tándem azucarero, constituyendo un conjunto heterogéneo de partículas de diferentes tamaños que oscilan entre 1 y 25 mm, presentando una fracción promedio de aproximadamente 20 mm (Diez y Garrido, 2012). Se produce como consecuencia de la fabricación de azúcar y constituye un subproducto de dicha producción;

además, se caracteriza por ser un material fibroso, heterogéneo en cuanto a su composición granulométrica y estructural, que presenta baja densidad y un alto contenido de humedad, en las condiciones en que se obtiene del proceso de molienda de caña (Barahona, Rodríguez, Ponce y Zorrila, 2019). Tradicionalmente, el bagazo de la caña era considerado como un desperdicio; sin embargo, actualmente se ha reconocido su potencial como una fuente valiosa de materia prima para diversas aplicaciones en la agroindustria.

C. Subproductos destacables involucrados en la producción de bioetanol

1. Características generales y obtención de ceniza del bagazo de caña

De acuerdo con Diez y Garrido (2012), el creciente desarrollo en la industria de los derivados y su diversificación, con el fin de reevaluar el aspecto económico de dicha industria, ha provocado la necesidad de encontrar alternativas a procesos de la cotidianidad. Dentro de los derivados de mayor interés en los últimos años, se puede encontrar el etanol, por la disponibilidad del bagazo en la fabricación de azúcar, lo que reduce los costos de producción en términos de densidad, transportación, humedad, entre otros.

A raíz de lo anterior, resulta importante mencionar que el bagazo de caña de azúcar ha sido implementado como fuente energética en la industria azucarera y, a pesar de que su poder calorífico es relativamente bajo (1850 kCal/kg), al comparar con otros combustibles fósiles tradicionales, no hay duda de que constituye un potencial energético valioso (Diez y Garrido, 2012). Se estima que en la producción del azúcar se generan alrededor de 6.5 millones de toneladas de bagazo y que, por cada tonelada de este material incinerado, se producen 25 kg de ceniza (Rojas, Izquierdo y Álvarez, 2019). Las cifras son alarmantes al saber que dicha ceniza es almacenada en pilas a la intemperie, constituyendo un riesgo de contaminación ambiental; este material, a pesar de ser portador de varios nutrimentos como fósforo y potasio que se han extraído del suelo y no vuelven a incorporarse, actualmente poseen un uso muy limitado, pero se estima que su reutilización permitiría fertilizar una gran extensión de áreas agrícolas (Arias et al., 2021).

El principal y componente mayoritario de la ceniza es el óxido de silicio, seguido en proporción comparativamente pequeña por compuestos de Potasio (K), Fósforo (P), Aluminio (Al), Calcio (Ca), Magnesio (Mg) y microelementos como el hierro (Fe) y zinc (Zn). De gran interés resultan los residuos agroindustriales que poseen buen potencial de P disponible, elemento estratégico de gran impacto en la producción agropecuaria, esencial para el crecimiento de las plantas y, sin embargo, es frecuentemente deficitario en los ecosistemas terrestres. Cabe mencionar que durante la combustión del bagazo de la caña, se pierde casi todo el carbono y nitrógeno, con lo cual desaparece el carácter orgánico de estos materiales; sin embargo, estas contienen micronutrientes como los metales Zn y Cu que son requeridos por las plantas en pequeñas cantidades, pero al igual que los macronutrientes son indispensables, pues su deficiencia ocasiona desórdenes fisiológicos en las plantas (Arias et al., 2021).

Un aspecto que se debe considerar es que la cantidad de constituyentes presentes en la ceniza varía de acuerdo con el tipo de suelo y la variedad de la caña, entre otros factores. Estudios realizados de cenizas obtenidas a partir del bagazo combustionado en dos industrias azucareras de Brasil y Cuba mostraron diferencias que pueden ser asociadas a los suelos en que fue cultivada la caña de azúcar. No obstante, en el *Cuadro 2* se presenta el contenido de nutrientes en una muestra de ceniza obtenida a partir de la combustión de bagazo de caña de azúcar (Arias et al., 2021).

Cuadro 2. Composición química de la ceniza obtenida a partir de bagazo de caña de azúcar

Elemento	**Contenido (% m/m)**
Nitrógeno (N)	0.10
Fósforo (P)	0.38
Potasio (K)	1.21
Calcio (Ca)	1.26
Magnesio (Mg)	0.46
Sodio (Na)	0.1
Hierro (Fe)	5.38
Silicio (Si)	14.62

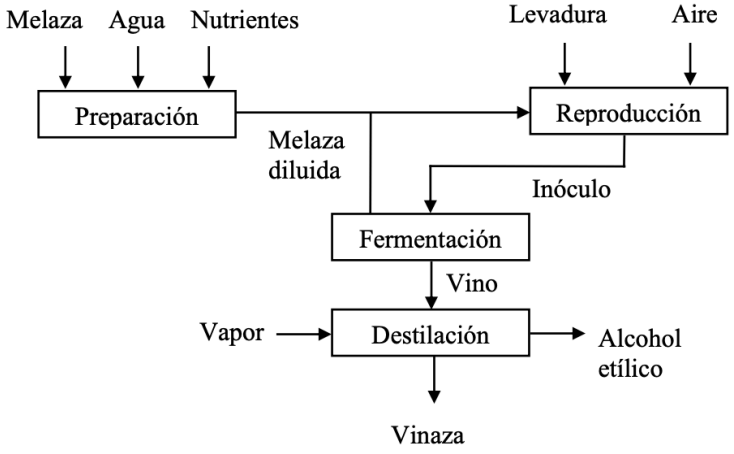
Fuente: (Dombinov et al., 2022, p.4)

Un ejemplo de su potencial es que cenizas procedentes de industrias madereras han sido empleadas para disminuir la acidez y como fertilizante de suelos ácidos. El aporte de las cenizas produjo un aumento del pH del suelo y la fracción sólida experimentó incrementos de las concentraciones de fósforo, calcio y magnesio en formas asimilables, resultó importante además el incremento de las concentraciones de estos elementos en las plantas, lo que produjo aumentos proporcionales de la producción (Arias et al., 2021).

2. Características generales y obtención de la vinaza

La vinaza es un residuo industrial generado durante la destilación del alcohol obtenido a partir de mosto de melaza, tal como se puede visualizar mediante la *Figura 2*. Por tanto, la melaza que sale de la producción de azúcar y se dirige a la sección de destilería, en donde se produce el mosto que se obtiene diluyendo la melaza en agua caliente, y al agregar levaduras para que se lleve a cabo la fermentación. Al obtener el mosto, este es llevado a las centrífugas para realizar procesos de separación hasta que, debido a diferentes puntos de ebullición, el alcohol se separe de la vinaza; por la parte superior de la torre el alcohol, y por la parte inferior la vinaza (López y Aguilar, 2016).

Figura 2. Proceso de producción de alcohol etílico a partir de melaza



Fuente: (Vera, 2019, p.13)

En una destilería de mediano tamaño que producen diariamente 50,000 litros de alcohol base 96 °, se generan diariamente 750 m^3 de vinaza, cifra suficiente para preocupar a más de un entendido en la materia y más aún si se sabe que en la mayoría de los países y lugares

donde existen destilerías, estas son vertidas libremente sin ningún tratamiento (Conadesuca, 2016).

Es importante mencionar que este residuo es altamente corrosivo y contaminante de las fuentes de agua. Se ha demostrado que tiene un alto contenido de humedad y pH ácido con niveles de ceniza que oscilan alrededor de 3.6 %; dentro de la fracción inorgánica de la vinaza, se destaca la presencia de sales de potasio, las cuales han sido aprovechadas como fertilizantes, ya sea disponiendo de la vinaza en forma diluida o concentrada. Por otra parte, la fracción orgánica de la vinaza contiene compuestos que son de origen natural; es decir, que provienen de la caña de azúcar y otros se generan mediante acción microbiológica y transformaciones o degradaciones térmicas en el proceso agroindustrial de la caña, ya sea en el proceso azucarero o durante la obtención de etanol por vía fermentativa. Un dato relevante es que la vinaza de caña de azúcar, a diferencia de la proveniente de la remolacha azucarera, es deficiente en nitrógeno (López y Aguilar, 2020).

En el *Cuadro 3* se muestran las concentraciones de los nutrientes analizados para las vinazas de dos Complejos Agroindustriales (CAI) diferentes. Para estos se realizó un análisis estadístico en el que se demostró que existen diferencias significativas entre ellos, para un 95 % de confianza. Dichas diferencias pueden vincularse a la calidad de las materias primas, cepas empleadas, diferencias entre los procesos productivos, entre otras.

Cuadro 3. Composición química de la vinaza

Analito	CAI 1	CAI 2
Nitrógeno (N)	0.73 %	0.63 %
Sodio (Na)	45.61 ppm	48.25 ppm
Potasio (K)	67.91 ppm	69.02 ppm
Cobre (Cu)	0.567 ppm	1.213 ppm
Hierro (Fe)	33.790 ppm	33.982 ppm
Manganeso (Mn)	2.232 ppm	2.174 ppm
Zinc (Zn)	0.591 ppm	0.764 ppm

Fuente: (Camacho y Duharte, 2018, p.250)

La vinaza, por tener una elevada carga orgánica, no debe ser vertida directamente a efluentes, ya que puede producir serios impactos al ambiente (Vera, 2019). Es por ello que recientemente se ha buscado la manera de tratar este residuo, con el fin de disminuir su carga orgánica; ya existen varias tecnologías para el manejo y aprovechamiento de las vinazas de una destilería, y es dependiendo de los requerimientos del mercado cuál es mejor aplicar. Estas pueden ser la materia prima para otros procesos fermentativos como la producción de proteínas o la producción de gas metano, así como producción de levadura forrajera, utilización agrícola o incluso producción de dióxido de carbono (Conadesuca, 2016).

D. Aprovechamiento de residuos y economía circular

El modelo económico lineal, que aún está vigente en la actualidad, confía en la disposición de grandes cantidades baratas y fácilmente accesibles de materiales y energía, además de medios baratos para deshacerse de lo que ya no interesa a la industria; sin embargo, está alcanzando sus límites físicos. Por tal razón, dicho modelo no es sostenible y el concepto de economía circular surge como una alternativa atractiva y viable, que se propone mantener siempre los productos, componentes y materiales en sus niveles de uso más altos. De esta manera, constituye un ciclo de desarrollo continuo positivo que preserva y aumenta el capital natural, optimiza los rendimientos de los recursos y funciona a cualquier escala (Cerdá y Khalilova, 2016).

Este estudio aborda un problema ambiental al ofrecer una alternativa de fertilización que aprovecha recursos locales, disminuye la dependencia de insumos químicos y contribuye al manejo responsable de residuos industriales que tradicionalmente han sido tratados de forma inadecuada y que pueden ser perjudiciales para el medio ambiente. La implementación de esta tecnología no solo mejora el aprovechamiento de los subproductos, sino también busca reducir la logística asociada al transporte del fertilizante.

La relevancia de este trabajo en el ámbito biotecnológico radica en que establece un precedente para el desarrollo de nuevas líneas de investigación centradas en el aprovechamiento de subproductos como la vinaza y la ceniza del bagazo de caña de azúcar, abriendo camino a futuras innovaciones que integren procesos industriales y agrícolas con un enfoque sostenible. Esta investigación es de gran importancia no solamente por sus beneficios directos, sino porque responde a la creciente necesidad global de buscar soluciones para problemas ambientales y económicos en sectores clave como la agricultura.

E. Diseño del experimento

1. Análisis factorial 2^n

Son denominados diseño factorial 2^n los diseños en los que los factores cuentan con dos niveles, es decir cuando se realiza un experimento con un número de factores n en el que este puede adoptar dos niveles, ya sea cuantitativo o cualitativo, como lo es "alto" o "bajo". Una réplica completa de dicho diseño requiere realizar 2^n combinaciones; de esta manera, este describe cómo realizar experimentos de la forma más adecuada para conocer simultáneamente qué efecto tienen n factores sobre una respuesta (Fernández, 2020).

Ecuación 1. Diseño factorial

$$N = 2^n$$

Donde:

N = número total de combinaciones o tratamientos

n = número de factores a estudiar

2. Tamaño de muestra

Para obtener una buena aproximación a los intervalos de confianza, a continuación, se describe cómo elegir un tamaño de muestra suficiente para obtener un margen de error deseado. E es el margen de error que el usuario está dispuesto a aceptar, y el valor $z_{\alpha/2}$ es consecuencia directa del nivel de confianza que se utilizará para calcular la estimación por intervalo, en donde 95 % de confianza es el valor más frecuentemente elegido ($z_{0.025}$ = 1.96). Por último, debe contarse con el valor de la desviación estándar poblacional σ, y en

caso de no conocer este valor, es válido utilizar valores preliminares o teóricos para calcularlo (Anderson, Sweeney, y Thomas, 2008).

Ecuación 2. Tamaño de muestra para una estimación por intervalo de la media poblacional

$$n = \left(\frac{z_{\alpha/2} * \sigma}{E}\right)^2$$

Donde:
n = número de muestras
$z_{\alpha/2}$ = nivel de confianza
σ = desviación estándar
E = margen de error

F. Métodos analíticos

1. Método de Kjeldahl

Diversos elementos importantes que se encuentran en los sistemas orgánicos y biológicos son determinados por métodos que incluyen la valoración ácido/base como último paso. Usualmente, los elementos susceptibles a este tipo de análisis son no metales, como carbono, nitrógeno, cloro, bromo flúor, entre otros; el pretratamiento convierte el elemento en un ácido o base inorgánicos que luego es titulado.

Como se mencionó anteriormente, el nitrógeno es un ejemplo aplicable a estos métodos. Este se encuentra en una gran variedad de sustancias de interés en la industria y en la agricultura, que incluyen aminoácidos, proteínas, fármacos sintéticos, fertilizantes, explosivos, suelos, suministros de agua potable y colorantes. El método más común para determinar nitrógeno orgánico es el método de Kjeldahl, un procedimiento estándar para cuantificar el contenido de proteínas en granos, carne y materiales biológicos y que está basado en una valoración de neutralización. Este fue desarrollado por el químico danés Johan Kjeldahl para determinar el contenido de proteínas en varios granos utilizados en la elaboración de cerveza, quien primero lo describió en 1883, cuando trabajaba en el laboratorio de Carlsberg. En este método, la muestra es descompuesta en ácido sulfúrico caliente y concentrado para convertir la unión de nitrógeno a ion amonio; la disolución resultante es enfriada, diluida y se hace básica, un proceso que convierte los iones amonio

en amoniaco, el cual es destilado de la disolución básica, recolectado en una disolución ácida y determinado mediante una titulación de neutralización.

El paso crucial en el método de Kjeldahl es la descomposición con ácido sulfúrico y es frecuentemente el que más tiempo consume, pues algunas muestras pueden requerir periodos de calentamiento superiores a una hora. Se han propuesto numerosas modificaciones del procedimiento original con el objetivo de reducir el tiempo de digestión; de hecho, en la modificación más utilizada, una sal neutra es añadida para incrementar el punto de ebullición de la disolución de ácido sulfúrico y, por tanto, la temperatura a la que ocurre la descomposición. En otra modificación, se añade una solución de peróxido de hidrógeno después de que la digestión ha descompuesto la mayor parte de la matriz orgánica. Otras sustancias catalizan la descomposición de compuestos orgánicos con ácido sulfúrico, como el mercurio, cobre y selenio, tanto en su estado elemental como combinados. Es importante destacar que, a pesar de ser un método lento y engorroso, se caracteriza por su alta precisión y exactitud, además de que ha sido el método de referencia con el que se comparan todos los demás métodos, históricamente. De manera general, el método de Kjeldahl se puede resumir en 3 etapas principales, que se muestran a continuación (ITW Reagents, 2018).

Figura 3. Esquema general de las tres etapas de las que consta el método de Kjeldahl



Fuente: (ITW Reagents, 2018, p.2)

Ecuación 3. Reacción de digestión de la muestra

$$Proteína\ (-N) + H_2SO_4 \rightarrow (NH_4)_2SO_4 + CO_2 + H_2O$$

Durante el proceso de destilación, los iones amonio (NH_4^+) se convierten en amoniaco (NH_3) mediante la adición de un álcali (NaOH). El amoniaco (NH_3) es arrastrado al vaso receptor mediante una corriente de vapor de agua, el cual se llena con una solución absorbente para capturar el gas amoniaco disuelto (ITW Reagents, 2018).

Ecuación 4. Reacción de conversión de iones amonio en amoniaco durante la destilación

$$(NH_4)_2SO_4 + NaOH \rightleftharpoons 2NH_3(gas) + Na_2SO_4 + 2H_2O$$

Cabe mencionar que la solución absorbente más común es el ácido bórico [$B(OH)_3$] en solución acuosa al 2-4 %, en donde el amoniaco es capturado cuantitativamente por la solución de ácido bórico formando iones amonio solvatados (ITW Reagents, 2018).

Ecuación 5. Reacción de formación de iones amonio mediante la captura de amoniaco usando ácido bórico

$$B(OH)_3 + NH_3 + H_2O \rightleftharpoons NH_4^+ + B(OH)_4^-$$

También pueden utilizarse otros ácidos, dosificados con precisión, como el ácido sulfúrico o clorhídrico para capturar el amoniaco en forma de iones de amonio solvatados (ITW Reagents, 2018).

Ecuación 6. Reacción de formación de iones amonio mediante la captura de amoniaco usando otros ácidos

$$H_2SO_4(total) + 2NH_3 \rightarrow SO_4^{2-} + 2NH_4^+$$

Finalmente, la concentración de los iones amonio capturados puede determinarse por medio de dos tipos de valoración:

- Cuando se utiliza ácido bórico como solución absorbente, posteriormente se lleva a cabo una valorización ácido-base utilizando una solución estandarizada de ácido sulfúrico o clorhídrico y una mezcla de indicadores. El punto final de la valoración también se puede determinar potenciométricamente con un electrodo de pH. Esta valoración se llama valoración directa (ITW Reagents, 2018).

Ecuación 7. Determinación de concentración de iones amonio capturados mediante valoración directa

$$B(OH)_4 + HX \rightleftharpoons X + B(OH)_3 + H_2O$$
$$HX = \acute{a}cido\ fuerte\ (X = Cl, etc.)$$

- Cuando se utiliza una solución valorada de ácido sulfúrico como solución absorbente, el ácido sulfúrico residual (el exceso que no reacciona con NH_3) se valora con una solución estandarizada de hidróxido de sodio y la cantidad de amoniaco se calcula por diferencia. Esta valoración se denomina valoración indirecta o por retroceso (ITW Reagents, 2018).

Ecuación 8. Determinación de concentración de iones amonio capturados mediante valoración indirecta o por retroceso

$$H_2SO_4\ (residual) + 2NaOH \rightarrow SO_4^{-2} + 2Na^+ + 2H_2O$$

Es importante mencionar que los cálculos para el porcentaje de nitrógeno o de proteína deben tener en cuenta qué tipo de solución receptora se utilizó y qué factores de dilución se emplearon durante el proceso de destilación.

- Cuando se utiliza ácido bórico como solución receptora:

Ecuación 9. Determinación de porcentaje de nitrógeno presente en una muestra al utilizar ácido bórico como solución receptora en la valoración

$$\%\ Nitrógeno = \frac{(mL\ ácido\ valorante - mL\ blanco) * N\ del\ ácido * 1.4}{peso\ de\ la\ muestra\ en\ gramos}$$

- Cuando se utiliza una solución valorada de ácido como solución receptora:

Ecuación 10. Determinación de porcentaje de nitrógeno presente en una muestra al utilizar una solución valorada de ácido como solución receptora en la valoración

$$\%\ Nitrógeno = \frac{[(mL\ ácido\ valorante * N\ ácido) - (mL\ blanco * N\ álcali)] - (mL\ álcali * N\ álcali) * 1.4}{peso\ de\ la\ muestra\ en\ gramos}$$

(ITW Reagents, 2018)

2. Espectroscopía de absorción atómica

   La espectroscopía se refiere a una gama de diversas técnicas que emplean la radiación para obtener datos sobre la estructura y las propiedades de la materia, que se utiliza para resolver una amplia variedad de problemas analíticos, por medio de la medición e interpretación de los espectros que se presentan de la acción recíproca de la radiación electromágnetica (una forma de la energía propagada bajo la forma de ondas electromagnéticas) con la materia (Meštrović, 2019).

   En la actualidad, la espectroscopia de absorción atómica (AAS, por sus siglas en inglés) es uno de los métodos más utilizados debido a su simplicidad, eficiencia y bajo costo relativo. La técnica fue introducida en 1955 por Walsh en Australia y por Alkernade y Milartz en los Países Bajos, y ha sido el método más ampliamente utilizado durante casi medio siglo para la determinación de elementos en muestras analíticas; además, es eficiente y precisa para el análisis de elementos trazas, siendo capaz de determinar concentraciones en la escala de partes por billón ppb en una muestra (Skoog, West y Holler, 1997).

El método de absorción atómica se fundamenta en la aplicación de una fuente de radiación conocida, mientras los analitos están siendo atomizados y excitados en una llama, o bien, con vaporizadores electrotérmicos, pues estas son las técnicas más habituales de introducción y atomización de la muestra (Skoog, West y Holler, 1997). También es importante mencionar que en este método se emplean lámparas específicas según el elemento que se desea analizar y estas son capaces de emitir una línea atómica característica; existen dos tipos principales, que son las lámparas de cátodo hueco y las lámparas de descarga sin electrodos. Por un lado, las lámparas de cátodo hueco facilitan la espectroscopía atómica y existen de alrededor de 70 elementos disponibles a través de algunos distribuidores comerciales y, por otro lado, las lámparas de descarga sin electrodos son frecuentemente uno o dos órdenes de magnitud más intensas que sus contrapartes de cátodo hueco y son particularmente útiles para determinar elementos como Arsénico, Selenio y Telurio (Skoog, West, Holler y Crouch, 2015).

Ventajas del método

- Es un método que se caracteriza por su simplicidad, eficiencia y bajo costo relativo.
- Debido a que se trabaja con líneas que tienen origen en átomos libres, la técnica es muy selectiva y precisa.
- Para el análisis de fluidos biológicos, sangre y orina, estos pueden ser introducidos directamente en la llama después de una simple dilución

(Universidad Nacional Autónoma de México [UNAM], 2019)

Desventajas del método

- Es un método que se limita prácticamente a metales o metaloides.
- El uso de radiación que ha sido aislada de una fuente continua de un monocromador inevitablemente causa desviaciones instrumentales de la ley de Beer.
- Debido a que la fracción de radiación absorbida de este tipo de haz es pequeña, el transductor recibe una señal que es poco atenuada, por lo que la sensibilidad de la medición se reduce.

(Skoog, West, Holler y Crouch, 2015)

Es importante mencionar que en los métodos de absorción atómica se presentan dos tipos de interferencia, que son las interferencias espectrales y las interferencias químicas. Las interferencias espectrales se producen cuando la absorción o la emisión de una especie interferente se solapa o aparece muy próxima a la absorción o emisión del analito, de modo que su resolución por el monocromador resulta imposible; y las interferencias químicas se producen como consecuencia de diversos procesos químicos que ocurren durante la atomización y alteran las características de absorción del analito (Skoog, West y Holler, 1997).

En cuanto al equipo, este tiene la función de hacer incidir las radiaciones características sobre los átomos en estado fundamental del elemento de interés para que se produzca la absorción, y se pueden utilizar fotómetros o espectrofotómetros. La mayoría de las mediciones de AAS son realizadas con instrumentos equipados con un monocromador de rejilla para aislar radiación UV/VIS, como lo es un espectrofotómetro típicamente de doble haz (Skoog, West, Holler y Crouch, 2015). Su funcionamiento consiste en lo siguiente: el haz emitido por la fuente atraviesa el sistema de atomización que contiene la muestra en estado de gas atómico, esta llega al monocromador que elimina la radiación que no interesa para el estudio, pasando así al revelador o detector de la radiación absorbida, que luego es procesada y amplificada, dando como resultado una lectura de salida (Gallegos, Vega y Noriega, 2012).

G. Análisis comparativo entre mezclas formuladas

1. Análisis de varianza de un factor (Anova de un factor)

   Es una extensión de la prueba t de muestras independientes y se utiliza cuando se comparan más de dos grupos independientes. Este indica si existen diferencias estadísticas significativas entre los grupos. La forma en que esto se lleva a cabo es comparando las medias de los grupos de interés mediante un estudio de varianzas; específicamente, se pone a prueba la hipótesis nula, que establece que la media de la variable estudiada es la misma en los diferentes grupos, en contraposición a la hipótesis alternativa, que indica que al menos un par de medias difieren de forma significativa (Kent State University, 2024).

El funcionamiento básico de un Anova consiste en calcular la media de cada uno de los grupos para luego comparar la varianza de estas medias (intervarianza) frente a la varianza promedio de los grupos (intravarianza). Bajo la hipótesis nula de que las observaciones de los distintos grupos proceden todas de la misma población, tienen la misma media y varianza), la varianza ponderada entre grupos será la misma que la varianza promedio dentro de los grupos. Conforme las medias de los grupos estén más alejadas las unas de las otras, la varianza entre medias se incrementará y dejará de ser igual a la varianza promedio dentro de los grupos (Kent State University, 2024).

Una herramienta ampliamente utilizada para realizar este tipo de análisis es Microsoft Excel, debido a su accesibilidad y simplicidad de uso, ya que se realiza fácilmente al tener los datos de interés y definir un nivel de significancia. Para el nivel de significancia es comúnmente aceptado utilizar $\alpha = 0.05$, ya que asegura un equilibrio entre el riesgo de cometer errores tipo I, que implica rechazar una hipótesis nula verdadera, y la capacidad de detectar diferencias significativas reales entre los grupos analizados.
El software mencionado cuenta con las herramientas necesarias para automatizar los cálculos y genera una tabla con los siguientes componentes clave:

- Suma de cuadrados (SS): representa la variabilidad total, entre grupos y dentro de los grupos.
- Grados de libertad (df): define la cantidad de datos utilizados para estimar cada componente de la variabilidad.
- Media de los cuadrados (MS): es el cociente entre la suma de cuadrados y los grados de libertad.
- Estadístico F: corresponde al cociente entre la variabilidad entre grupos (MS entre grupos) y la variabilidad dentro de los grupos (MS dentro de los grupos).
- Valor-P: indica la probabilidad de que las diferencias observadas sean aleatorias.
- Valor crítico F: representa el umbral contra el que se compara el estadístico F.

(JMP Statistical Software, 2024)

Finalmente, respecto a la interpretación de los resultados obtenidos, los valores estadístico y crítico de F, así como el valor-P, son los más relevantes. Si el estadístico F es mayor que

el valor crítico de F, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa. Del mismo modo, si el valor-P es menor o igual al nivel de significancia definido, se concluye que al menos uno de los grupos difiere significativamente de los demás, lo que lleva también a rechazar la hipótesis nula y aceptar la alternativa (Kent State University, 2024).

H. Operaciones unitarias involucradas en el proceso

1. Evaporación

   La evaporación es una operación unitaria que tiene como fin concentrar una solución consistente en un soluto no volátil y un solvente volátil, en donde la mayoría de veces el solvente utilizado es agua; en otras palabras, lo que permite que ocurra la separación es que el solvente es más volátil que el soluto. La evaporación se realiza vaporizando una parte del solvente para producir una solución concentrada de licor espesa (McCabe, Smith, Harriot, 2007).

   Por otro lado, es importante reconocer la diferencia entre este proceso y otros que se podrían llegar a confundir, como lo es secado, destilación y cristalización. La evaporación difiere del secado porque el residuo es un líquido, a veces altamente viscoso, y no un sólido; también difiere de la destilación, pues en esta el vapor es generalmente un solo componente y, aun cuando el vapor sea una mezcla, en la evaporación no se intenta separar el vapor en fracciones; finalmente, es diferente de la cristalización porque su interés reside en concentrar una solución y no en formar cristales (McCabe, Smith y Harriot, 2007).

   Factores que influyen en la evaporación

   La solución a un problema de evaporación está estrechamente relacionada con el carácter del líquido que se concentra. Es la gran variedad de licores que requieren de criterio y experiencia en el diseño de un evaporador, ampliando esta operación desde una sencilla transferencia de calor hasta un arte separado. Algunas de las propiedades más importantes de los líquidos que se evaporan serán descritas a continuación (McCabe, Smith y Harriot, 2007).

- Concentración: aunque la solución de alimentación entra como licor a un evaporador y puede estar suficientemente diluida teniendo muchas de las propiedades físicas del agua, a medida que aumenta la concentración la solución adquiere cada vez un carácter propio. La densidad y viscosidad aumentan con el contenido de sólidos hasta que la solución se transforma en saturada o el licor se vuelve demasiado viscoso para una transferencia de calor adecuada. Cabe mencionar que la ebullición continuada de una solución saturada da lugar a la formación de cristales, que deben ser separados, ya que de lo contrario los tubos se obstruyen. La temperatura de ebullición de la solución puede aumentar en forma considerable al aumentar el contenido de sólidos, por lo que esta podría ser mucho mayor que la del agua a la misma presión.
- Formación de espuma: algunos materiales, especialmente las sustancias orgánicas, forman espuma durante la vaporización. Una espuma estable acompaña al vapor que sale del evaporador, causando un fuerte arrastre.
- Sensibilidad a la temperatura: muchos productos químicos, productos farmacéuticos y alimentos se deterioran cuando se calientan a temperaturas moderadas durante tiempos relativamente cortos. En la concentración de estos materiales se necesitan técnicas especiales para reducir tanto la temperatura del líquido como el tiempo de calentamiento.
- Incrustaciones: algunas soluciones depositan costras sobre la superficie de calentamiento. En estos casos, el coeficiente global disminuye progresivamente hasta que llega un momento en que es preciso interrumpir la operación del evaporador y limpiar los tubos.
- Materiales de construcción: cuando es posible, los evaporadores se construyen con algún acero. Sin embargo, muchas soluciones atacan a los metales ferrosos y se produce contaminación. En estos casos se utilizan materiales especiales como cobre, níquel, acero inoxidable, aluminio, grafito y plomo. Debido a que los materiales tienen altos costos, lo más deseable es alcanzar altas velocidades de transferencia de calor con el fin de minimizar los costos del equipo.

(McCabe, Smith y Harriot, 2007)

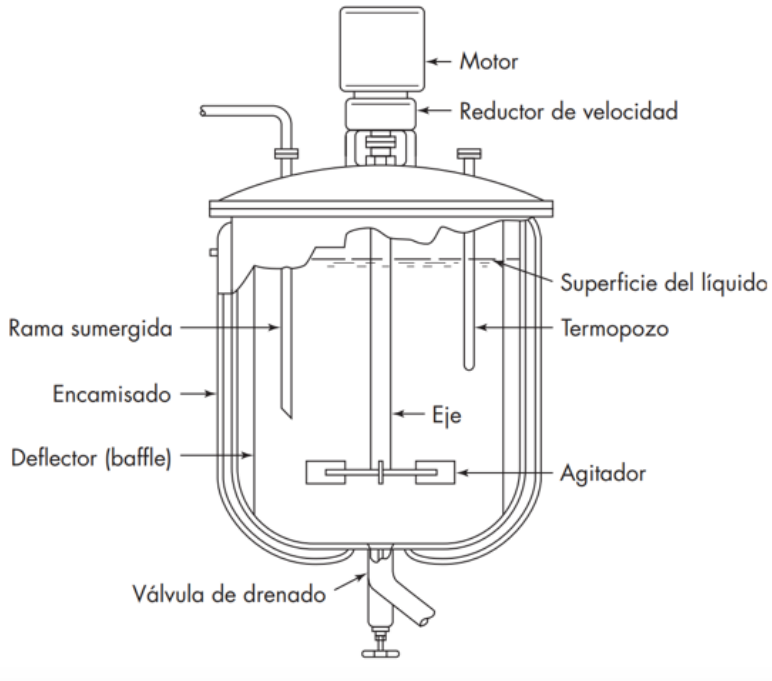
Otras características se deben de tener en cuenta al diseñar un evaporador. Algunas de ellas son el calor específico, calor de concentración, temperatura de congelación, liberación de gas durante la ebullición, toxicidad, peligros de explosión, radioactividad y necesidad de operación estéril. Es debido a la variedad de propiedades entre soluciones, que se han desarrollado diferentes tipos de evaporadores (McCabe, Smith y Harriot, 2007).

2. Mezclado

En la industria química y en la biotecnológica, muchas operaciones dependen fundamentalmente del grado de agitación y mezclado, ya que esto favorece la reacción. Se puede definir la agitación como el forzar a los líquidos o gases a adquirir movimiento a través de una fuerza que generalmente, es mecánica. El mezclado implica que a partir de fases individuales ya sea de líquidos o gases con un sólido o no, se alcance una solución homogénea. La agitación se refiere al movimiento inducido de un material en una manera específica, normalmente en un patrón circulatorio dentro de algún tipo de contenedor. La mezcla es una distribución aleatoria, dentro y a través una de otra, de dos o más fases inicialmente separadas (McCabe, Smith y Harriot, 2007).

Los líquidos se agitan con más frecuencia en algún tipo de tanque o recipiente, por lo general de forma cilíndrica y provisto de un eje vertical. La parte superior del tanque puede estar abierta al aire; pero generalmente está cerrada. Las proporciones del tanque varían bastante, dependiendo de la naturaleza del problema de agitación. Sin embargo, en muchas situaciones se utiliza un diseño estandarizado como el que se muestra en la *Figura 4*. El fondo del tanque es redondeado, no plano, para eliminar las esquinas o regiones agudas en las que no penetrarían las corrientes de fluido. La profundidad (o altura) del líquido es aproximadamente igual al diámetro del tanque. Un agitador va instalado sobre un eje suspendido, es decir, un eje sostenido en la parte superior, y este provoca que el líquido circule a través del tanque y eventualmente regrese él mismo. Los deflectores con frecuencia se incluyen para reducir el movimiento tangencial. El eje es accionado por un motor, a veces directamente conectado al eje, pero es más común que se encuentre conectado a éste, a través de una caja reductora de velocidad (McCabe, Smith y Harriot, 2007).

Figura 4. Tanque típico del proceso con agitación



Fuente: (McCabe, Smith y Harriot, 2007, p.260)

3. Secado

El proceso de secado es una operación en la cual se elimina la humedad que tiene una sustancia, es decir se desea eliminar el líquido contenido en un sólido, pero se diferencia por no usar operaciones mecánicas como exprimido o centrifugado. Operaciones como una evaporación que utiliza corriente gaseosa, se considera un secado. En este caso, ocurre una transferencia de masa externa entre el sólido que tiene el líquido y la corriente de gas que estará fluyendo sobre la sustancia, arrastrando las partículas de líquido para sí. Asimismo, se generan ocasiones en las cuales la transferencia de calor también es importante, por las diferencias entre las presiones de vapor del líquido y gas, sin embargo, no se provoca un cambio de fase. Por otro lado, esta operación unitaria, se puede clasificar según su diseño continuo o por lotes (Treybal, 1997).

Equilibrio en un proceso de secado

El equilibrio en esta operación unitaria depende del grado de presiones de vapor, principalmente entre la que tiene el sólido húmedo, su naturaleza y temperatura. Por ejemplo, si el sólido tiene una presión parcial que es mayor que el gas fresco que recorre

el sólido entonces este perderá humedad por evaporación hasta llegar al punto en donde el contenido de humedad queda constante. Para llegar al equilibrio en un sólido insoluble, cada sólido suele tener su propio comportamiento y curva, tomando en cuenta el tamaño de partícula o su superficie específica. Por otro lado, los sólidos solubles tienen contenidos muy bajos de humedad en el equilibrio al ser expuestos a gases con menores presiones parciales de vapor (Treybal, 1997).

Métodos de operación de un proceso de secado

Las operaciones de secado pueden clasificarse ampliamente según que sean por lotes o continuas. Estos términos pueden aplicarse específicamente desde el punto de vista de la sustancia que está secando. Así, la operación denominada *secado por lotes,* generalmente es un proceso en semilotes, en donde cierta cantidad de sustancia que se va a secar se expone a una corriente de aire que fluye continuamente, en la cual se evapora la humedad. En las operaciones continuas, tanto la sustancia que se va a secar, como el gas pasan continuamente a través del equipo. Generalmente, no se utilizan métodos normales por etapas; en todas las operaciones ocurre el contacto continuo entre el gas y la sustancia que se seca. El equipo que se utiliza para el secado se puede clasificar de acuerdo con el tipo del equipo y por la naturaleza del proceso de secado. La siguiente clasificación es útil para delinear las teorías de secado y los métodos de diseño.

- Método de operación (por lotes o continuo): el equipo por lotes, o semilotes, se opera intermitente en condiciones de estado no estacionario: el secador se carga con la sustancia, que permanece en el equipo hasta que se seca; entonces, el secador se descarga y se vuelve a cargar con un nuevo lote. Los secadores continuos generalmente se operan en estado estacionario.
- Método de obtención del calor necesario para la evaporación de humedad: en los secadores directos, el calor se obtiene completamente por contacto directo de la sustancia con el gas caliente en el cual tiene lugar la evaporación. En los secadores indirectos, el calor se obtiene independientemente del gas que se utiliza para acarrear la humedad evaporada. Por ejemplo, el calor puede obtenerse por conducción a través de una pared metálica en contacto con la sustancia o, con menos frecuencia, por exposición de la sustancia a radiación infrarroja o

calentamiento dieléctrico. En este último caso, el calor se genera dentro del sólido mediante un campo eléctrico de alta frecuencia.

- Naturaleza de la sustancia que se va a secar: la sustancia puede ser un sólido rígido como madera o triplay, un material flexible como tela o papel, un sólido granular, como una masa de cristales, una pasta ligera o un lodo ligero, o una solución. Si es un sólido, puede ser frágil o fuerte. La forma física de la sustancia y los diferentes métodos de manejo necesarios tienen tal vez, la mayor influencia sobre el secador que se va a utilizar.

(Treybal, 1997)

4. Molienda

La reducción de tamaños se puede realizar a través de distintas técnicas entre las cuales destaca la trituración y molienda. El proceso de molienda se realiza mediante molinos, los cuales pueden trabajar en seco o en húmedo. Existen distintos tipos de molinos, entre los cuales se encuentran los molinos de martillos, de discos, de bolas, entre otros. Se diferencian por su fuerza de reducción de tamaño de partícula y por el tamaño de reducción. El objetivo de la trituración y la molienda es producir pequeñas partículas a partir de otras más grandes. Las partículas más pequeñas son deseadas por su gran superficie o bien, por su forma, tamaño y número. Una medida de la eficiencia de la operación se basa en la energía requerida para crear una nueva superficie, ya que el área de superficie de una unidad de masa de partículas aumenta en forma considerable a medida que se reduce el tamaño de partícula (Blanco, 2024).

Características importantes que se deben de conocer de la sustancia a fragmentar

- Molturabilidad o dureza: facilidad para la fragmentación, se relaciona con la energía necesaria o dificultad para su fragmentación. Influye en el tipo de equipo que se debe utilizar.
- Pegajosidad y humedad: cualidad de adherencia de los materiales en función de la humedad, afecta el rendimiento del proceso debido a que materiales húmedos pueden pegarse y obstruir el equipo.
- Tamaño de partícula: para determinar el tiempo y energía necesaria para alcanzar el tamaño de partícula deseado.

- Composición química: para evitar reacciones durante la molienda.
- Propiedades abrasivas: algunos materiales pueden desgastar rápidamente el equipo.

(Blanco, 2024)

Fuerzas que participan en el proceso de molienda

- Compresión: se puede aplicar de manera continua o discontinua
    - Compresión discontinua: cada bloque se somete a compresión varias veces. Estos molinos utilizan mandíbulas, trituradoras giratorias y cono triturador.
    - Compresión continua: el bloque sufre una única compresión variando la intensidad. Generalmente son cilindros o rodillos y se utilizan para minerales poco abrasivos y no muy duros como el carbón.
- Cizallamiento: la flexión y el cizallamiento, acompañados por compresión adicional, son las fuerzas predominantes. Se utilizan trituradoras de cilindros dentados o acanalados, y trituradores de cilindro y placa. Son adecuados para materiales tenaces pero poco abrasivos.
- Impacto:
    - Impacto: cada bloque recibe una energía elevada de forma brusca (choque). Se usan trituradoras de impactos, de martillos y de caída libre o cascada. Generalmente, no son aptas para materiales muy abrasivos.
    - Choque: esta fuerza es importante en los molinos cuando operan a altas velocidades, cercanas a la velocidad crítica. Las bolas describen trayectorias parabólicas y golpean en la zona del pie de carga, donde el molino recibe la alimentación.
- Frotación/rozamiento: mediante esta aplicación de fuerzas se obtienen principalmente partículas finas.
- Corte: a través de esta operación se obtienen sólidos de una tamaño y forma definida.

(Blanco, 2024)

Partes fundamentales de un molino

- Carcasa: estructura exterior resistente, generalmente cilíndrica, a la que se fijan los revestimientos interiores.
- Cabezas laterales: superficies circulares con ligeras curvaturas que deben soportar grandes esfuerzos.
- Boca de carga y boca de descarga: aberturas axiales donde se colocan los rodamientos. La carga puede realizarse mediante diferentes métodos:
    - Admisión directa: consiste en un tubo acoplado a la boca de entrada, donde la alimentación es impulsada por una bomba o ventilador.
    - Tambor de alimentación: una hélice en movimiento rotatorio introduce la carga en el molino.
    - Alimentador de cuchara: alimenta el molino y eleva la carga. Se utiliza comúnmente en circuitos cerrados junto con clasificadores de tornillo o racletas.
- Rodamientos: componentes que facilitan el giro del molino, reduciendo fricción.
- Piñon de ataque o sistema de accionamiento
- Rejilla: elemento interno de clasificación, que puede estar presente o no, dependiendo del tipo y modelo del molino.
- Rejilla de salida: para evitar que cuerpos grandes o no triturables ingresen al clasificador evitando daños.

(Blanco, 2024)

VI. METODOLOGÍA

A. Determinación de propiedades físicas de la vinaza y la ceniza del bagazo de caña

Materiales y equipo:

- Vinaza
- Ceniza de bagazo de caña de azúcar
- Balanza de humedad Ohaus MB120
- Platillo para balanza de humedad
- Papel aluminio
- Espátula
- 3 probetas de 10 mL
- Balanza analítica Ohaus Explorer E02140

Procedimiento:

1. Determinación de humedad: vinaza y ceniza de bagazo
   1.1. Encender la balanza de humedad y crear un nuevo método, asegurándose de definir una temperatura de 105 °C.
   1.2. Levantar la tapa de la balanza de humedad y colocar el platillo.
   1.3. Tarar el pesado.
   1.4. Situar una cantidad suficiente de la muestra de interés en el platillo (mayor a 5 g, normalmente) de manera uniforme y tomar el peso inicial.
   1.5. Presionar el botón de "start".
   1.6. Una vez finalizado el proceso, realizar la lectura correspondiente del porcentaje de humedad y peso final de la muestra.
   1.7. Apagar la balanza de humedad.

2. Determinación de densidad: ceniza de bagazo
   2.1. Llenar una probeta de 10 mL con la muestra de ceniza de bagazo.
   2.2. Pesar en una balanza analítica.
   2.3. Calcular la densidad de interés.

B. Diseño del experimento

1. Análisis factorial para la cantidad de mezclas requeridas

Debido a que solamente se varió un único factor en el experimento, el cual era la proporción de mezcla, se determinó que se requerían 2 mezclas de vinaza y ceniza de bagazo de caña. Esto para obtener un valor "alto" y un valor "bajo"; sin embargo, por tratarse de un estudio exploratorio, se decidió realizar una tercera mezcla de proporción intermedia.

2. Determinación de las proporciones de mezcla entre vinaza y ceniza de bagazo de caña

Para determinar la proporción de mezcla entre las materias primas se tomó como base el estudio realizado por López y Aguilar (2020), en donde se concluyó que es posible producir un fertilizante orgánico sólido a partir de vinaza, utilizando una mezcla de pajilla de arroz y ceniza de pajilla de arroz como aditivo, en proporciones de 45, 50 y 55 % del aditivo con respecto a la cantidad de vinaza agregada. Por lo que se tomaron las proporciones mencionadas como referencia para la realización del presente estudio.

3. Determinación del tamaño de la muestra para cada mezcla

De acuerdo con valores teóricos para la composición química de otros fertilizantes orgánicos elaborados a partir de residuos industriales de la misma naturaleza (López y Aguilar, 2020; Martínez, 2012), se determinó que el número mínimo apropiado para obtener un margen de error aceptable según el tipo de nutriente y con un nivel de 95 % de confianza, se debían realizar 2 réplicas de cada mezcla para la determinación de nitrógeno y 1 para minerales como potasio, calcio y magnesio. Se dio especial importancia a los macronutrientes debido a la composición de las materias primas y a que, para los fertilizantes orgánicos, dichos nutrientes tienen mayor relevancia para los cultivos.

C. Elaboración de granulados de diferentes mezclas

Materiales y equipo:

- 5 L vinaza
- 1 olla de peltre
- 187.5 g Ceniza de bagazo de caña de azúcar
- 2 paletas de cocina

- Machacador de madera
- Báscula de mesa Ohaus Valor 3000 Xtreme V31XH2
- Báscula industrial Ohaus 3000 Series T31P
- Estufa Indurama Oviedo
- Medidor de luz Extech Instruments EasyView EA30
- 3 recipientes plásticos
- 1 espátula analítica
- 1 espátula de mango de madera
- 3 bandejas metálicas
- Molinillo de cuchillas Black + Decker

Procedimiento:

1. Concentración de vinaza
   1.1. Pesar el equivalente a 5 L de vinaza (6.1215 kg, según la densidad de la vinaza empleada), utilizando una báscula industrial.
   1.2. Colocar 5 L de vinaza en una olla de peltre.
   1.3. Encender la estufa y colocar la olla con la vinaza en una de las hornillas.
   1.4. Controlar el proceso hasta que la vinaza alcance alrededor de 25 % de humedad.
   1.5. Dejar enfriar hasta alcanzar temperatura ambiente.
   1.6. Pesar productos finales en una báscula de mesa.
   1.7. Almacenar en un cuarto frío.

2. Mezclado de vinaza con ceniza de bagazo de caña
   2.1. Limpiar el aditivo (ceniza de bagazo de caña) para eliminar materiales extraños.
   2.2. Tomar 3 muestras 125 g de vinaza concentrada en cada recipiente plástico.
   2.3. Verter el aditivo en las muestras de vinaza concentrada, en un porcentaje de 45, 50 y 55 % en peso respecto a la vinaza.

Cuadro 4. Proporciones de mezcla para la formulación de los fertilizantes orgánicos

Producto final	Proporción de mezcla
Fertilizante 45 %	125 g de vinaza + 56.25 g de ceniza
Fertilizante 50 %	125 g de vinaza + 62.5 g de ceniza
Fertilizante 55 %	125 g de vinaza + 68.75 g de ceniza

Fuente: elaboración propia

Notas: en el cuadro anterior se muestran las cantidades de materia prima utilizadas para la elaboración de los fertilizantes orgánicos, en donde se utilizó una cantidad fija de vinaza y diferentes porcentajes respecto a la vinaza para determinar la cantidad de ceniza. En el presente trabajo serán nombrados y diferenciados haciendo referencia a dicho porcentaje.

2.4. Realizar mezclado permanente de la vinaza y el aditivo, utilizando una paleta de cocina y un machacador de madera, hasta lograr una mezcla homogénea.

2.5. Pesar productos finales en una báscula de mesa.

3. Secado de la mezcla

3.1. Distribuir cada mezcla en las 3 bandejas metálicas y exponer a la luz solar.

3.2. Controlar el proceso hasta reducir humedad significativamente y retirar de las bandejas.

3.3. Pesar productos finales en una báscula de mesa.

3.4. Almacenar cada mezcla en su recipiente correspondiente.

4. Medición de intensidad de la luz solar

4.1. Oprimir el botón de encendido o apagado. El medidor correrá una breve prueba interna al activarse.

4.2. Retirar la capucha protectora del foto sensor blanco abombado y apuntar hacia la fuente que se desea medir. La luz debe cubrir todo el domo blanco del sensor de luz.

4.3. Leer el nivel de luz en la pantalla LCD. Si la luz estuviese fuera de la escala, aparecerá una indicación “OL”, y se debe seleccionar otra escala presionando el botón RANGE.

5. Molienda de mezclas

5.1. Colocar la mezcla, poco a poco, en el recipiente del molinillo de cuchillas.

5.2. Cerrar la tapa y presionar hacia abajo para dar inicio al proceso, y detener cuando se obtenga el tamaño deseado.

5.3. Recolectar nuevamente la mezcla en su recipiente correspondiente.

5.4. Repetir los pasos del 1 al 3 para cada mezcla.

D. Determinación de propiedades físicas de las mezclas para fertilizante orgánico sólido

Materiales y equipo:

- Balanza de humedad Ohaus MB120
- Platillo para balanza de humedad
- Papel aluminio
- Espátula con mango de madera
- 3 probetas de 10 mL
- Balanza analítica Ohaus Explorer E02140

Procedimiento:

1. Determinación de humedad
   1.1. Encender la balanza de humedad y crear un nuevo método, asegurándose de definir una temperatura de 105 °C.
   1.2. Abrir la tapa de la balanza de humedad y colocar el platillo.
   1.3. Tarar el pesado.
   1.4. Situar la muestra de interés en el platillo de manera uniforme y tomar el peso inicial.
   1.5. Presionar el botón “Start”.
   1.6. Una vez finalizado el proceso, realizar la lectura correspondiente del porcentaje de humedad y peso final de la muestra.

2. Determinación de densidad
   2.1. Llenar una probeta de 10 mL con las diferentes mezclas obtenidas.
   2.2. Pesar en una balanza analítica.
   2.3. Calcular la densidad de interés.

E. Caracterización química de las mezclas para fertilizante orgánico sólido

Materiales y equipo:

- Balanza analítica Ohaus Explorer E02140
- Espátula analítica
- Papel encerado
- Pastilla reactiva de Kjeldahl
- Ácido sulfúrico 65 %
- 3 Erlenmeyer de 250 mL
- Ácido bórico y rojo de metilo
- Hidróxido de sodio al 40 %
- Ácido clorhídrico 0.1 N
- 1 bureta de 50 mL
- Unidad de destilación Büchi K-350
- Lavador de gases Büchi K-415
- Digestor Büchi K-425
- Cristalería y equipo para armar el sistema en el digestor
- Espátula con mango de madera
- Varilla de vidrio
- Pizeta
- Agua desmineralizada
- Cilindro de acetileno grado absorción atómica
- Espectrofotómetro de absorción atómica PerkinElmer PinAAcle 900F
- Campana de extracción de gases
- Estándares para curva de calibración
- 3 balones aforados de 500 mL
- 9 balones aforados de 25 mL
- 3 balones aforados de 100 mL
- 15 tapas para balones aforados (según tamaño del balón)
- 3 beakers de 25 mL
- 6 puntas de pipeta (según tamaño de la pipeta)

- Pipeta automática de 100 a 1000 uL
- Pipeta automática de 0.5 mL a 5 mL
- 2 Erlenmeyer de 125 mL

Procedimiento:

1. Determinación de nitrógeno
   1.1. Pesar 0.25 g de la muestra a analizar sobre papel encerado.
   1.2. Doblar el papel encerado que contiene la muestra e introducirlo en el tubo de vidrio debidamente rotulado, y colocarlo en el digestor.
   1.3. Agregar media pastilla reactiva de Kjeldahl (catalizador).
   1.4. Agregar 6 mL de ácido sulfúrico al 65 %.
   1.5. Encender el equipo elevando la temperatura a 600 °C.
   1.6. Encender la campana de extracción de gases para evitar contaminación dentro del laboratorio.
   1.7. Llevar a cabo el proceso durante 2 h (1 h 45 min para incinerar, y 15 min de enfriamiento).
   1.8. Al finalizar el paso anterior, encender la unidad de destilación y esperar a que alcance la temperatura adecuada para su uso.
   1.9. Realizar un lavado del equipo presionando el botón “Start”.
   1.10. Al finalizar, agregar 10 mL de ácido bórico con rojo de metilo a cada Erlenmeyer para colocarlo en la unidad de destilación.
   1.11. Los tubos del equipo deben colocarse en el equipo de destilación, asegurando que queden fijos.
   1.12. Accionar presionando el botón “Reagent”, el cual agrega 40 mL de hidróxido de sodio al 40 % y se detendrá al terminar este proceso.
   1.13. Presionar el botón “Start” para agregar aproximadamente 20 mL de agua destilada.
   1.14. El destilado es depositado en el Erlenmeyer que contiene el reactivo mencionado anteriormente, tomando una coloración amarillenta. Cada muestra toma un tiempo de 4 minutos.
   1.15. Agregar ácido clorhídrico 0.1 N en una bureta de 50 mL y realizar una titulación que exhiba un viraje al color “baby pink”, anotando el volumen inicial contenido en la bureta y el volumen final después de la titulación.

2. Determinación de minerales (K, Ca, Mg, Zn, Mn, Fe, Cu)
    2.1. Preparar las soluciones de las muestras, utilizando como referencia un valor esperado para la realización de los cálculos.
    2.2. Asegurarse de que la válvula del cilindro de acetileno esté abierta y el regulador de presión esté ajustado a 15 psi.
    2.3. Encender el espectrofotómetro de absorción atómica, así como la campana de extracción.
    2.4. Utilizando el software del equipo, encender las lámparas de los analitos de interés.
    2.5. Permitir que las lámparas se calienten durante aproximadamente 15 minutos.
    2.6. Crear la secuencia para los estándares y las muestras que se analizarán, para cada elemento.
    2.7. Sumergir el capilar del equipo en el Erlenmeyer de 125 mL que contiene el blanco y realizar la lectura.
    2.8. Retirar el capilar y sumergirlo en agua desmineralizada contenida en otro Erlenmeyer de 125 mL.
    2.9. Realizar el mismo procedimiento de los pasos 5 al 8 para cada estándar del elemento de interés, y muestras por analizar, verificando que al realizar las lecturas, todas entren en el rango de medición de la curva de calibración realizada.
    2.10. Guardar y analizar los resultados obtenidos.

Notas: Las cantidades descritas en el procedimiento pueden variar de acuerdo con las características de cada materia prima.

VII. RESULTADOS

Cuadro 5. Propiedades físicas de las materias primas y productos finales de fertilizante orgánico sólido

Vinaza	
* Densidad	1.224 g/cm^3
* pH	5.245
* °Brix	40.06
Humedad	55.01 ± 0.01 %
Ceniza de bagazo de caña	
Densidad	0.25209 ± 0.00434 g/cm^3
Humedad	1.23 ± 0.01 %
Fertilizante orgánico 1 (45 % ceniza)	
Densidad	0.564 ± 0.010 g/cm^3
Humedad	3.17 ± 0.01 %
Fertilizante orgánico 2 (50 % ceniza)	
Densidad	0.647 ± 0.011 g/cm^3
Humedad	2.43 ± 0.01 %
Fertilizante orgánico 3 (55 % ceniza)	
Densidad	0.587 ± 0.010 g/cm^3
Humedad	3.51 ± 0.01 %

Fuente: elaboración propia e ingenio
*Los datos fueron proporcionados por el ingenio.

Cuadro 6. Propiedades químicas de los productos finales de fertilizante orgánico sólido

Fertilizante orgánico 1 (45 % ceniza)	
Nitrógeno	1.23 ± 0.003 %
Potasio	3.99 ± 0.035 %
Calcio	1.12 ± 0.009 %
Magnesio	0.378 ± 0.002 %
Cobre	9.26 ± 0.14 ppm
Hierro	465 ± 216 ppm
Manganeso	47.4 ± 1.1 ppm
Zinc	120 ± 1 ppm
Fertilizante orgánico 2 (50 % ceniza)	
Nitrógeno	1.19 ± 0.057 %
Potasio	4.12 ± 0.036 %
Calcio	1.15 ± 0.010 %
Magnesio	0.375 ± 0.002 %
Cobre	12.2 ± 0.1 ppm
Hierro	318 ± 148 ppm
Manganeso	46.8 ± 0.8 ppm
Zinc	97.5 ± 1.4 ppm
Fertilizante orgánico 3 (55 % ceniza)	
Nitrógeno	1.16 ± 0.018 %
Potasio	3.46 ± 0.030 %
Calcio	1.17 ± 0.010 %
Magnesio	0.374 ± 0.002 %
Cobre	15.61 ± 0.09 ppm
Hierro	302 ± 140 ppm
Manganeso	44.5 ± 0.5 ppm
Zinc	103 ± 2 ppm

Fuente: elaboración propia

Notas: los datos se obtuvieron mediante el análisis de las muestras utilizando el equipo de espectroscopía de absorción atómica PerkinElmer PinAAcle 900F.

Cuadro 7. Comparación de las propiedades químicas de los productos finales de fertilizante orgánico sólido con valores teóricos para la caña de azúcar

Fertilizantes orgánicos		**Rangos teóricos**	
Fertilizante orgánico 1 (45 % ceniza)		**Florida, EE. UU.**	**Brasil**
Nitrógeno	1.23 %	2.00-2.60 %	1.80-2.50 %
Potasio	3.99 %	1.00-1.60 %	1.00-1.60 %
Calcio	1.12 %	0.20-0.45 %	0.20-0.80 %
Magnesio	0.378 %	0.15-0.32 %	0.10-0.30 %
Cobre	9.26 ppm	4-8 ppm	6-15 ppm
Hierro	465 ppm	50-105 ppm	40-250 ppm
Manganeso	47.4 ppm	12-100 ppm	25-250 ppm
Zinc	120 ppm	16-32 ppm	10-50 ppm
Fertilizante orgánico 2 (50 % ceniza)		**Florida, EE. UU.**	**Brasil**
Nitrógeno	1.19 %	2.00-2.60 %	1.80-2.50 %
Potasio	4.12 %	1.00-1.60 %	1.00-1.60 %
Calcio	1.15 %	0.20-0.45 %	0.20-0.80 %
Magnesio	0.375 %	0.15-0.32 %	0.10-0.30 %
Cobre	12.2 ppm	4-8 ppm	6-15 ppm
Hierro	318 ppm	50-105 ppm	40-250 ppm
Manganeso	46.8 ppm	12-100 ppm	25-250 ppm
Zinc	97.5 ppm	16-32 ppm	10-50 ppm
Fertilizante orgánico 3 (55 % ceniza)		**Florida, EE. UU.**	**Brasil**
Nitrógeno	1.16 %	2.00-2.60 %	1.80-2.50 %
Potasio	3.46 %	1.00-1.60 %	1.00-1.60 %
Calcio	1.17 %	0.20-0.45 %	0.20-0.80 %
Magnesio	0.374 %	0.15-0.32 %	0.10-0.30 %
Cobre	15.6 ppm	4-8 ppm	6-15 ppm
Hierro	302 ppm	50-105 ppm	40-250 ppm
Manganeso	44.5 ppm	12-100 ppm	25-250 ppm
Zinc	103 ppm	16-32 ppm	10-50 ppm

Fuente: elaboración propia; (McCray y Mylavarapu, 2010, sec. Nutrientes)

Notas: los datos de la columna *Rangos teóricos* fueron tomados de información disponible en la literatura y se presentaron como un rango comparativo para cada fertilizante orgánico sólido producido.

Cuadro 8. Comparación de las propiedades químicas de los productos finales de fertilizante orgánico sólido con fertilizantes comerciales para la caña de azúcar

Fertilizantes orgánicos		**Otros fertilizantes**		
Fertilizante orgánico 1 (45 % ceniza)		**Orgánico**	**Triple 14**	**Triple 20**
Nitrógeno	1.23 %	1.14 %	14 %	20 %
Potasio	3.99 %	6.17 %	14 %	20 %
Calcio	1.12 %	2.92 %	-	-
Magnesio	0.378 %	1.01 %	2 %	0.20 %
Cobre	9.26 ppm	35.43 ppm	-	200 ppm
Hierro	465 ppm	5000 ppm	-	500 ppm
Manganeso	47.4 ppm	298.11 ppm	-	500 ppm
Zinc	120 ppm	285.40 ppm	1000 ppm	1000 ppm
Fertilizante orgánico 2 (50 % ceniza)		**Orgánico**	**Triple 14**	**Triple 20**
Nitrógeno	1.19 %	1.14 %	14 %	20 %
Potasio	4.12 %	6.17 %	14 %	20 %
Calcio	1.15 %	2.92 %	-	-
Magnesio	0.375 %	1.01 %	2 %	0.20 %
Cobre	12.2 ppm	35.43 ppm	-	200 ppm
Hierro	318 ppm	5000 ppm	-	500 ppm
Manganeso	46.8 ppm	298.11 ppm	-	500 ppm
Zinc	97.5 ppm	285.40 ppm	1000 ppm	1000 ppm
Fertilizante orgánico 3 (55 % ceniza)		**Orgánico**	**Triple 14**	**Triple 20**
Nitrógeno	1.16 %	1.14 %	14 %	20 %
Potasio	3.46 %	6.17 %	14 %	20 %
Calcio	1.17 %	2.92 %	-	-
Magnesio	0.374 %	1.01 %	2 %	0.20 %
Cobre	15.6 ppm	35.43 ppm	-	200 ppm

Hierro	302 ppm	5000 ppm	-	500 ppm
Manganeso	44.5 ppm	298.11 ppm	-	500 ppm
Zinc	103 ppm	285.40 ppm	1000 ppm	1000 ppm

Fuente: elaboración propia; (Martínez, 2012, p.8); (Portal TecnoAgrícola, 2024); (Semiagro, 2017)

Notas: los datos de la columna *Otros fertilizantes* fueron tomados de la información que proporcionan los proveedores de los mismos y se presentaron como un dato comparativo para cada fertilizante orgánico sólido producido.

Cuadro 9. Análisis de varianza (Anova) para los productos finales de fertilizante orgánico sólido

Parámetro	**Valor**
H_0	No existen diferencias estadísticas significativas entre las composiciones de los fertilizantes orgánicos sólidos.
H_1	Al menos dos de los fertilizantes orgánicos sólidos presentan diferencias estadísticas en su composición.
Nivel de significancia (α)	0.05
Valor-P	0.928
F	0.075
$F_{crítico}$	3.467

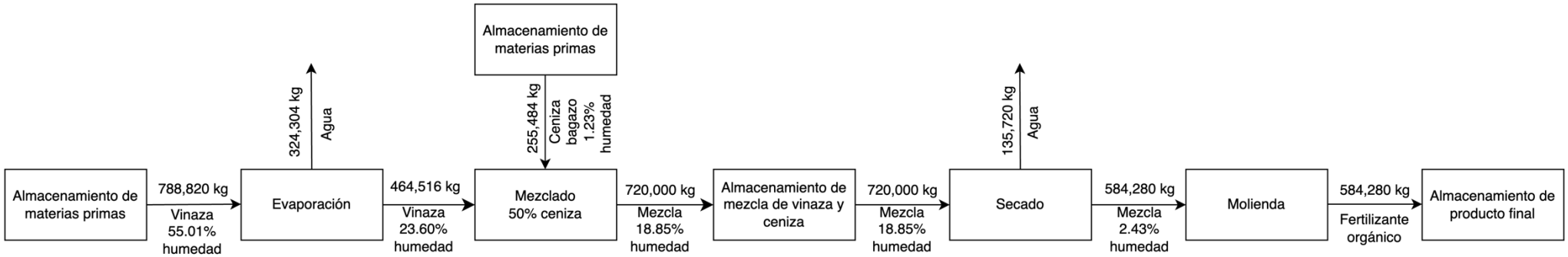
Fuente: elaboración propia

Cuadro 10. Propuesta de operaciones unitarias y equipos correspondientes para producir el fertilizante orgánico sólido a mayor escala

Operación unitaria	**Equipo**
Almacenamiento	Bodega de materia prima, bodega de producto semi-terminado y bodega de producto final
Evaporación	Evaporador de circulación forzada con promotor de turbulencia
	Equipos auxiliares: caldera, intercambiadores de calor, torre de enfriamiento, bombas, trampas de vapor, manómetros, termocuplas, tuberías, válvulas, manifold
Mezclado	Tanque agitado con agitador helicoidal
	Equipos auxiliares: motor
Secado	Secador rotatorio
Molienda	Molino de martillos

Fuente: elaboración propia

Figura 5. Diagrama de bloques de las operaciones unitarias propuestas para el proceso de producción de fertilizante orgánico sólido



Fuente: elaboración propia

Notas: los datos presentados en el diagrama de bloques anterior son teóricos, con base a una estimación de cómo se llevaría a cabo el proceso de interés a mayor escala.

VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El objetivo principal de la presente investigación consistió en realizar una propuesta de mejora de un fertilizante orgánico líquido mediante su modificación a forma granulada a partir de la mezcla en distintas proporciones de vinaza y ceniza de bagazo de caña de azúcar. Los objetivos secundarios planteados fueron determinar las propiedades fisicoquímicas de 3 formulaciones de fertilizante orgánico sólido, comparar las características químicas de estos con las de fertilizantes comerciales y realizar una propuesta técnica para la puesta en marcha del proceso a mayor escala. Para llevarlo a cabo, se analizaron las propiedades físicas y químicas tanto de las materias primas como de las mezclas resultantes.

En el *Cuadro 3* se pueden observar los resultados de las propiedades físicas analizadas, en donde se tomaron en cuenta las materias primas para poder comparar las características iniciales de cada una, con los resultados de las mezclas. Respecto a la densidad, se puede observar que la densidad de la vinaza (1.224 g/cm^3) es más alta en comparación con la de la ceniza del bagazo de caña (0.252 g/cm^3), lo que concuerda con lo esperado, considerando que la vinaza es un líquido concentrado con un alto contenido de sólidos, evidenciado de acuerdo con la determinación de 40.06 °Brix.

Asimismo, al comparar las densidades de los fertilizantes orgánicos con estas, se puede observar que el resultado fue un dato intermedio entre ambas materias primas. En el caso de los productos finales, se observó que la densidad fue mayor para el fertilizante 50 % (0.647 g/cm^3), que para el fertilizante 45 % (0.564 g/cm^3); sin embargo, para el de 55 % se obtuvo un dato menor en comparación al de 50 %, siendo este de 0.587 g/cm^3. Si bien se esperaba que, a medida que se agregaba mayor cantidad de ceniza aumentara la densidad, esto también pudo verse afectado por la distribución de las partículas al interactuar con la vinaza concentrada. Estos resultados son relevantes, ya que la densidad impacta directamente en términos de manejo, almacenamiento y transporte del fertilizante, e incluso para asegurar una dosificación precisa durante su aplicación.

La humedad es uno de los parámetros que demuestra que el proceso para obtener los fertilizantes orgánicos fue el adecuado para lograr los resultados deseados, puesto que después del proceso de evaporación, mezclado y secado, en los productos finales se redujo el porcentaje de humedad provenientes de las materias primas. En el caso de la vinaza, la humedad fue de 55.01 % y para la ceniza de bagazo de caña de 1.23 %, mientras que en los fertilizantes orgánicos de 45, 50 y 55 % se obtuvieron porcentajes de humedad de 3.17, 2.43 y 3.51 %, respectivamente. Esta reducción del porcentaje de humedad es beneficiosa para los ingenios que deseen implementar esta propuesta, puesto que podrían incluso comercializar este producto como un fertilizante orgánico de mejor apariencia, reduciendo los costos de transporte, ya que estos productos también son menos densos, en comparación a la vinaza.

Por otra parte, mediante el *Cuadro 4* se muestran las propiedades químicas determinadas para cada fertilizante orgánico, que incluyen macronutrientes como nitrógeno, potasio, calcio y magnesio, y micronutrientes como cobre, hierro, manganeso y zinc. Los porcentajes de nitrógeno fueron determinados por el método de Kjeldahl, mientras que el resto de los minerales por el método de espectroscopía de absorción atómica. Por medio del *Cuadro 5* es posible visualizar una comparación de los fertilizantes orgánicos elaborados, con rangos teóricos requeridos para el cultivo de caña de azúcar en dos países distintos: Estados Unidos, específicamente el estado de Florida, y Brasil. Esto debido a que la caña de azúcar es el cultivo agrícola más valioso de Florida, teniendo un mayor valor económico respecto a otros, incluido el maíz, el algodón y la soja y el tabaco juntos (Universidad de Florida, 2023); por otro lado, Brasil es uno de los mayores productores y exportadores de azúcar a nivel mundial, principalmente por su industria de caña de azúcar, uno de los cultivos más productivos del país (Efeagro, 2024).

Respecto a los niveles de nitrógeno, que varían entre 1.16 y 1.23 %, estos se encuentran ligeramente por debajo de los requerimientos teóricos (1.80 - 2.60 %); aunque esta podría ser una limitación en la formulación, a diferencia de los fertilizantes químicos, los fertilizantes orgánicos permiten que los nutrientes se liberen de manera lenta y continua, lo que puede ser de beneficio para la planta al estar disponible a largo plazo, reduciendo el riesgo de pérdidas por lixiviación. Es importante señalar que los valores utilizados en este análisis son referenciales, ya que las necesidades nutricionales del cultivo de caña pueden variar según la disponibilidad de nutrientes

en el suelo. Aunque se puedan hacer recomendaciones generales, las concentraciones requeridas de nutrientes dependen de las condiciones específicas de cada suelo. En caso de presentar deficiencia de nitrógeno podría ser necesario recurrir a fuentes adicionales de este nutriente (urea, por ejemplo), ya que este es un componente esencial en los aminoácidos, ácidos nucleicos, clorofila y otros pigmentos, además de ser importante en todo proceso enzimático, por lo que la escasez de este podría manifestarse en un débil crecimiento de la planta, afectando la productividad del cultivo (Melgar, Meneses, Orozco y Pérez, 2014).

Los contenidos de potasio, calcio y magnesio, por el contrario, fueron más altos de los requerimientos reportados en la literatura, lo que era esperable debido a que son los minerales que se encuentran presentes en mayor concentración en la vinaza. Los valores de potasio varían entre 3.46 y 4.12 %, mientras que los rangos teóricos oscilaban entre 1.00 y 1.60 %; esto podría representar una ventaja en suelos deficientes de este nutriente, que es crucial para el transporte de agua y nutrientes de la caña de azúcar, además de ser un elemento esencial en la osmorregulación, activación de enzimas y regulación de pH; sin embargo, debe cuidarse que no se encuentre en exceso ya que incrementa el contenido de ceniza en el jugo de la caña, lo que causa problemas en la cristalización de azúcar. Respecto al calcio, los valores se encuentran entre 1.12 y 1.17 %, superando los valores teóricos que están entre 0.20 y 0.80 %, pero el exceso de calcio es de beneficio en suelos ácidos, ya que funciona como regulador de pH, es un constituyente importante de la pared celular y tiene un rol importante en el crecimiento estructural de la caña.

En Guatemala, podría darse el caso de disponer de suelos ricos en potasio y calcio, por lo que sería necesario realizar un ajuste previo a la aplicación del fertilizante, pues es importante mantener un equilibrio entre los tres nutrientes mencionados para evitar interferencias en la absorción de los otros (Melgar, Meneses, Orozco y Pérez, 2014). Por otro lado, el contenido de magnesio superaba ligeramente los rangos esperados, encontrándose los valores experimentales entre 0.374 y 0.478 %, y los datos teóricos entre 0.10 y 0.32 %, lo que sugiere que los fertilizantes podrían brindar un suministro adecuado de este nutriente que es esencial en la fotosíntesis, pues al ser un constituyente de la clorofila está involucrado en la asimilación de CO_2 y la síntesis de proteínas.

En el caso de los micronutrientes, el contenido de cobre presente en los fertilizantes orgánicos se encuentra entre 9.26 y 15.6 ppm, lo que está levemente por encima de los rangos teóricos que van desde 4 hasta 15 ppm. Por otra parte, tanto el hierro como el zinc sobrepasan los niveles, ya que presentan niveles de hierro entre 302 y 465 ppm, siendo los teóricos entre 50 y 250 ppm, y en el caso del zinc se determinaron niveles entre 97.5 y 120 ppm, mientras que los teóricos oscilan entre 10 y 50 ppm. Pese a que el cobre desempeña un rol importante en la síntesis de enzimas y el metabolismo de las plantas, su exceso podría ser tóxico en suelos que alcanzan los niveles necesarios del mismo. De la misma manera sucede con el hierro y el zinc, pues, a pesar de ser importantes en la fotosíntesis y en el crecimiento y desarrollo de la caña de azúcar, en concentraciones elevada podrían ser tóxicos o competir con otros nutrientes. En caso de que el suelo presente las cantidades necesarias de estos nutrientes, el fertilizante debería ser aplicado en dosis menores o ser alternado con otras fuentes de nutrientes (Melgar, Meneses, Orozco y Pérez, 2014).

Por último, en el caso del manganeso, los fertilizantes contienen niveles aceptables de este nutriente, pues los rangos teóricos esperados van de 12 a 100 ppm y estos contienen entre 44.5 y 47.4 ppm. Estos niveles podrían ser beneficiosos en suelos que presentan un pH elevado, y aquellos que tengan una deficiencia de manganeso, sin riesgo de ser tóxicos para el cultivo (Melgar, Meneses, Orozco y Pérez, 2014).

Por medio del *Cuadro 6*, al comparar con los resultados obtenidos, se observa que los fertilizantes comerciales para la caña de azúcar presentan variaciones entre sí, y la diferencia respecto a las formulaciones analizadas es significativa; sin embargo, como se mencionó anteriormente, esto depende de los requerimientos del suelo en el que serán aplicados y del cultivo del que se busca propiciar el crecimiento (Agrosavia, 1970). Un aspecto que es importante destacar es la similitud al comparar con otros fertilizantes orgánicos sólidos elaborados con componentes derivados de la agroindustria, razón por la que fue posible determinar que la mezcla de ceniza de bagazo de caña de azúcar y de vinaza como materias primas para la elaboración de un fertilizante da lugar a la obtención de valores esperados según lo que se reporta en la literatura (Martínez, 2012).

Ahora bien, los valores presentados fueron los que se obtuvieron de las mezclas de vinaza y ceniza en las proporciones mencionadas, de acuerdo con la consistencia final deseada. Sin embargo, para estudios posteriores se recomienda analizar el suelo del cultivo, de manera que se conozcan específicamente las necesidades del suelo y, con base a eso y a los valores proporcionados a raíz de esta investigación, definir cuál es la composición de vinaza y ceniza de bagazo de caña de azúcar adecuada para que se desarrolle el cultivo. En caso de que no se alcanzaran los valores requeridos, o bien, de superarlos significativamente, se podrían realizar ajustes agregando los compuestos necesarios in situ al fertilizante previo a su aplicación, ya sea añadiendo los nutrientes faltantes de manera química, o agregando algún material inerte para reducir la concentración de estos. Pese a la posibilidad de requerir alguna modificación, es importante destacar que en la elaboración de estos fertilizantes se incorporan residuos orgánicos industriales, promoviendo la economía circular y reduciendo el uso de productos químicos.

Mediante el *Cuadro 7*, por su parte, se muestra el análisis de varianza (Anova) de un único factor realizado en *Microsoft Excel* para comparar la composición de cada uno de los productos finales de fertilizante orgánico sólido, en donde se utilizó un nivel de significancia de 0.05 para evaluar cuál de las hipótesis planteadas sería aceptada. La hipótesis nula (H_0) establecía que la diferencia entre la composición de las mezclas no era significativa, mientras que la hipótesis alternativa (H_1) establecía a que al menos una de las mezclas difería con respecto a las otras en cuanto a su composición. De acuerdo con el análisis estadístico realizado, al ser el valor F (0.075) menor al de F crítico (3.467), se demostró que las diferencias entre los grupos no son estadísticamente significativas. Asimismo, debido a que el valor-P (0.928) fue mayor al nivel de significancia predefinido (0.05), se aceptó la hipótesis nula y se rechazó la hipótesis alternativa. Es decir que, en conjunto, ambos resultados indicaron que no hay evidencia suficiente para concluir que las diferencias entre los fertilizantes analizados son significativas. Por esta razón, entre las mezclas formuladas y basado únicamente en la composición de las mismas, se sugeriría implementar la producción del fertilizante 55 %, puesto que permite un mayor aprovechamiento y mejor manejo de residuos agroindustriales, dando como resultado una composición semejante a la de los fertilizantes que contienen dichos residuos en menores cantidades. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, esto dependerá de los requerimientos específicos del suelo en el que será cosechado el cultivo de interés.

En el *Cuadro 8* se presenta la propuesta de equipos, según la operación unitaria, para la puesta en marcha del proceso a una mayor escala, y en la *Figura 5* se muestra un esquema del proceso mediante un diagrama de bloques. En el caso de la evaporación se eligió un evaporador de circulación forzada con promotor de turbulencia ya que este sería capaz de remover la cantidad de agua deseada, logrando concentrar la vinaza sin afectar negativamente la superficie de transferencia, pese a la elevada viscosidad que alcanza el producto, y con un menor coste operativo. En caso de utilizar otro tipo de evaporador, existe un alto riesgo de que estos presenten graves incrustaciones por precipitación de sales, principalmente cálcicas, pues la vinaza contiene componentes de elevado poder incrustante, que en conjunto con la alta viscosidad del producto a altas concentraciones da lugar a bajos rendimientos, escasa disponibilidad, extensos períodos de limpieza y numerosos problemas operativos (Martínez, 2012). Lo anteriormente mencionado complicaría que la vinaza redujese su porcentaje de humedad de 55 hasta un 25 %, aproximadamente, lo que también impactaría en la concentración de sólidos.

Para que sea posible instalar un evaporador de este tipo, es indispensable contar con una caldera para el suministro de vapor, que es necesario para que se lleve a cabo el proceso de interés, así como una torre de enfriamiento para disipar el calor del condensado que regresa al sistema. También se requiere de bombas, principalmente la de recirculación para garantizar que el líquido se mantenga en movimiento a alta velocidad, promoviendo la turbulencia en el sistema. Es importante considerar intercambiadores de calor para incrementar la eficiencia del proceso, como puede ser para precalentar la solución de alimentación o para condensar el vapor generado, de manera que pueda ser reutilizado en otro punto de la producción; asimismo, se requieren trampas de vapor para eliminar el condensado que se pueda formar en las líneas de vapor, sensores de temperatura y presión como termocuplas y manómetros, válvulas, tuberías y un manifold para la distribución de vapor en el sistema, permitiendo movilizarlo de un punto a otro, y que puede ramificar a diferentes destinos.

Para la etapa de mezclado se seleccionó un tanque agitado con agitador helicoidal debido a la consistencia de la mezcla, para evitar la generación de vórtices y asegurar un mezclado homogéneo. Este tipo de agitador permite la mezcla de materiales con alta viscosidad y hacerlo de manera uniforme, pues el diseño de estos equipos facilita el flujo de los materiales densos desde

el centro del tanque hacia los bordes, y viceversa. Además, este permite generar un flujo axial en toda la mezcla, de manera que las partículas capaces de sedimentarse se puedan mantener en suspensión durante todo el tiempo de mezclado, y así garantizar una mezcla más consistente (McCabe, Smith y Harriot, 2007).

En el caso del secado, en este estudio se utilizó la energía solar; sin embargo, esto no es eficiente a mayor escala, puesto que la irradiación solar es altamente variable según las condiciones meteorológicas, lo que podría extender el tiempo de secado o impedirlo directamente. Esto evita que el proceso sea homogéneo y que, por el contrario, sea altamente inestable e impredecible. Por lo anterior, se decidió que la mejor opción es un secador rotatorio, puesto que este está diseñado para manejar grandes volúmenes de material de forma continua, lo que reduce el desperdicio energético al no existir interrupciones frecuentes para cargar o descargar material como sucede en un proceso por lotes; a su vez, se asegura un secado homogéneo y se garantiza el suministro de la energía necesaria de manera estable durante todo el tiempo de secado, pues estos giran constantemente, por lo que todo el material se encuentra en contacto con el aire de manera uniforme, mejorando la transferencia de calor y reduciendo el tiempo necesario de secado (Treybal, 1997). A diferencia de un secador rotatorio, el uso de un secador de bandejas podría presentar dificultades debido a la naturaleza del equipo, especialmente por operar en un sistema por lotes, lo que implica tiempo muerto entre ciclos y un mayor consumo de energía, además de que tiene un diseño menos flexible para integrar y aprovechar fuentes de calor residual que suelen estar disponibles a partir de procesos de combustión o calderas de los ingenios.

Para la etapa de molienda se escogió un molino de martillos, puesto que este es una opción que permite manejar materiales mixtos, en este caso, la vinaza y la ceniza de bagazo. Además, este tipo de molino es versátil y permite ajustar el tamaño de partícula deseado mediante el uso de cribas, propiciando la obtención de un producto final más uniforme, que es ideal para aplicaciones agrícolas, ya que se busca facilitar la dispersión del fertilizante; en dichas aplicaciones, no es imprescindible que las partículas tengan exactamente el mismo tamaño, sino mantenerlas dentro de un rango definido, siendo entre 1 y 4 mm uno aceptable para fertilizantes granulados (Universidad Zamorano, 2016). Es importante considerar que este también es capaz de procesar grandes volúmenes de material, debido a que tienen capacidades que oscilan entre 10,000 y 50,000

kg/h, lo cual es ventajoso al llevar a cabo el proceso en una mayor escala (McCabe, Smith y Harriot, 2007).

Finalmente, mediante la *Figura 5* se muestra un diagrama de bloques representativo para la línea de producción que se implementaría en los ingenios. En este caso, se colocó un punto de almacenamiento, además del de materias primas, el cual se encuentra luego del proceso de mezclado y antes del secado, puesto que esto dependerá de la capacidad del secador. Sin embargo, es importante hacer la aclaración de que esto se realizó considerando una línea destinada exclusivamente a la producción de fertilizantes, pero el ingenio en el que se implemente el proceso será el que defina la manera de incluirlos dentro del resto de operaciones que llevan a cabo normalmente. Por esta razón, es recomendable y necesario también evaluar la capacidad y disponibilidad tanto de recursos como de los equipos dentro del ingenio, para definir la manera más eficiente de incluir la producción de fertilizantes en la planta.

Tomando en consideración que el secador corresponde al cuello de botella de este proceso productivo, se estimaron también valores para un balance de masa de la producción de fertilizantes llevada a cabo a una mayor escala, partiendo de la premisa mencionada. De manera que, si se tratara aproximadamente un 85.9 % de la cantidad de vinaza que puede producirse diariamente en una destilería de mediano tamaño (788,820 kg) y utilizando una composición de 55 % (% m/m) de ceniza de bagazo de caña (255,484 kg) respecto a la vinaza concentrada (464,516 kg), que equivale a alrededor del 57.4 % de la cantidad que se estima que se produce diariamente de ceniza, se pueden producir 584,280 kg de fertilizante orgánico sólido en un día. Esto corresponde a la necesidad de disponer de 1 secador rotatorio con una capacidad de 30,000 kg/h; sin embargo, el cálculo realizado corresponde solamente a la estimación de cómo se llevaría a cabo el proceso de interés, por lo que para escalarlo y en caso de variar la cantidad producida o el porcentaje que se desea tratar de vinaza y ceniza, sería necesario realizar el dimensionamiento de todos los equipos. Asimismo, es importante aclarar que en el punto de almacenamiento agregado en este diagrama de bloques, la misma cantidad que entra pasa al secador; no obstante, esto cambiará cuando el secador esté en uso a su capacidad máxima, pues lo que acabe de mezclarse deberá ser almacenado hasta que termine el ciclo de secado y pueda continuar con las etapas posteriores.

Cabe destacar que, para establecer un punto de comparación se realizó un cálculo similar si se escogiese un secador de bandejas; en este caso, utilizando 4 secadores con capacidad de 480 kg/h, se conseguiría tratar 5.5 y 3.7 % de la vinaza y de la ceniza producidas, respectivamente. Dichas cifras contribuyen a evidenciar que un secador rotatorio con las características descritas anteriormente es una mejor opción en comparación a uno de bandejas, principalmente por la industria de la que se trata, la cantidad de residuos que consiguen manejarse y los costos. Si bien al utilizar un secador rotatorio no se consigue tratar el 100 % de los residuos generados cada día, la producción de etanol a partir de caña de azúcar se encuentra estrechamente vinculada con la temporada de zafra, por lo que al terminar este período, se podrían tratar aquellos residuos acumulados que no fueron procesados hasta convertir la totalidad de estos en el producto final deseado.

Los resultados discutidos anteriormente demuestran que se logró explorar una alternativa que permite valorizar tanto la vinaza como la ceniza de bagazo de caña de azúcar. De esta manera se incrementó el valor del bagazo de caña, ya que no se utilizaría solamente para la generación de energía, sino que la ceniza resultante de este proceso puede emplearse como materia prima de otro producto. No resulta viable considerar la distribución de vinaza o de ceniza sin un tratamiento previo, como el propuesto en este trabajo, dado que el alto contenido de agua de la vinaza eleva los costos de transporte y que la ceniza carece de las características necesarias para su comercialización. Por lo tanto, para futuras investigaciones se sugiere complementar el análisis de suelos con pruebas de campo que permitan evaluar si la formulación final del fertilizante causa el efecto esperado en los cultivos de acuerdo con las necesidades agronómicas.

IX. CONCLUSIONES

1. Se realizó una propuesta de mejora de un fertilizante orgánico mediante su elaboración en forma granulada, utilizando mezclas en diferentes proporciones de vinaza y ceniza de bagazo de caña de azúcar. Esto con el propósito de que un ingenio pueda revalorizar sus residuos orgánicos, creando un producto comercializable y de interés para la agroindustria.

2. Se determinaron propiedades fisicoquímicas de tres formulaciones de fertilizante orgánico sólido. Los resultados mostraron densidades entre 0.564 y 0.647 g/cm^3, humedades de 2.43 a 3.51 % y se registraron concentraciones de macronutrientes como nitrógeno (1.16 – 1.23 %), potasio (3.46 – 4.12 %), calcio (1.12 – 1.17 %) y magnesio (0.374 – 0.378 %); en cuanto a micronutrientes, se identificaron concentraciones de cobre (9.26 – 15.6 ppm), hierro (302 – 465 ppm), manganeso (44.5 – 47.4 ppm) y zinc (97.5 – 120 ppm).

3. Al comparar los contenidos de nutrientes de los fertilizantes orgánicos formulados con los de fertilizantes comerciales, se observó que existe diferencia entre estos; sin embargo, al compararlos con otros elaborados a partir de residuos agroindustriales, se obtuvieron datos similares a los reportados en la literatura. Es necesario el estudio de los suelos para determinar si al agregar el fertilizante en estos se alcanza la concentración de nutrientes requerida para el desarrollo del cultivo de caña de azúcar o si se debe realizar un ajuste previo a su aplicación.

4. Se propusieron las operaciones unitarias de evaporación, mezclado, secado, molienda y diferentes puntos de almacenamiento. Dentro de la propuesta se incluyeron equipos necesarios como un evaporador de circulación forzada con promotor de turbulencia, un tanque agitado con agitador helicoidal, un secador de bandejas y un molino de martillos, para la puesta en marcha del proceso de producción del fertilizante orgánico a mayor escala.

X. RECOMENDACIONES

1. Realizar un análisis de suelo previo a la aplicación de cualquier fertilizante, pues se deben ajustar los nutrientes de acuerdo con las concentraciones que este tenga y asegurarse de alcanzar los requerimientos para que el cultivo se desarrolle adecuadamente.

2. Realizar pruebas de campo de la aplicación de los fertilizantes orgánicos sólidos formulados a partir de vinaza y ceniza de bagazo de caña de azúcar para la determinación de los efectos que estos tienen en los cultivos, principalmente en la caña de azúcar.

3. Evaluar la capacidad y disponibilidad tanto de recursos como de los equipos dentro del ingenio, para definir la manera de incluir la producción de fertilizantes en la planta en conjunto con el resto de operaciones que llevan a cabo normalmente.

XI. BIBLIOGRAFÍA

Agrosavia. (1970). *Fertilización*. https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/1533/25975_11786.pdf?sequence=1yisAllowed=y

Alfaro, R. y Alfaro, J. (1996). Evaluación de la vinaza como fertilizante potásico en la caña de azúcar y su efecto sobre las propiedades químicas de un suelo de Atenas, Alajuela. p. 175. En: Resúmenes X Congreso Nacional Agronómico y II Congreso de Suelos, San José, Costa Rica.

Anderson, D. R., Sweeney, D. y Thomas, W. (2008). *Estadística para la administración y economía*. Cengage Learning.

Arias-Cedeño, Q., López-Sánchez, R., Sainz-Rosales, L. R., Verdecia-CasAnova, M. V. y Eichler-Löbermann, B. (2021). Potencial fertilizante de cenizas de bagazo de caña de azúcar de industrias azucareras. *Revista Cubana de Química*, *33*(3), 452-466.

Asociación de Combustibles Renovables [ACR]. (2020). *Reporte final de resultados proyecto piloto movilidad verde*. Retrieved from https://acrguatemala.com/wp-content/uploads/2021/04/BID-Informe_final_Etanol_REDD_Enero2020.pdf

Barahona, C. A. Z., Rodríguez, X. E. S., Ponce, G. I. A. y Zorrila, M. C. T. (2019). El abono elaborado del bagazo de caña de azúcar como alternativa para la generación de ingresos para los habitantes del sitio San Carlos. *Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional*, *4*(6), 335-351.

Bermúdez, I. P. y Carralero, N. G. (2006). Aprovechamiento integral de vinazas de destilerías: Una revisión actual. *Ingeniería química*, (435), 129-133.

Blanco, E. (2024). Universidad de Vantabria. Open Course Ware: https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2439/course/section/2474/8._molienda.pdf

Camacho, R. I. y Duharte, L. L. (2018). Caracterización químico-física de vinazas de destilerías. *Ciencia en su PC*, *1*(2), 1-13.

Carbonero Zalduegui, P. (1984). Química del suelo y los fertilizantes. Universidad Politécnica de Madrid, Cátedra XVI, Bioquímica y Química Agrícola.

Çengel, Y. y Ghajar, A. (2020). *Heat and Mass Transfer.* New York: McGraw Hill.

Cerdá, E. y Khalilova, A. (2016). Economía circular. *Economía industrial*, *401*(3), 11-20.

Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar [CONADESUCA]. (2016). *Vinazas: alternativas de uso*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/171932/Nota_Informativa_Septiembre_Vinazas.pdf

Diez, F. y Garrido, N. (2012). *Bagazo de caña de azúcar: ¿energía o etanol carburante?* https://siiba.conadesuca.gob.mx/siiaca/Consulta/verDoc.aspx?num=532

Dombinov, V., Herzel, H., Meiller, M., Müller, F., Willbold, S., Zang, J. W. ... y Schrey, S. D. (2022). Sugarcane bagasse ash as fertilizer for soybeans: Effects of added residues on ash composition, mineralogy, phosphorus extractability and plant availability. *Frontiers in plant science*, *13*, 1041924.

Durazo, R. (2016). *Propagación del error*. http://rdurazo.ens.uabc.mx/educacion/labfis/sesion2.pdf

Efeagro. (2024). *Brasil prevé una producción histórica de caña de azúcar*. https://efeagro.com/brasil-azucar/

Fernández, S. (2020). *Diseño de experimentos: diseño factorial*. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/339723/TFM_Fernandez_Bao_Sheila.pdf?sequence=1

Gallegos, W., Vega, M. y Noriega, P. (2012). *Espectroscopía de absorción atómica con llama y su aplicación para la determinación de plomo y control de productos cosméticos*. https://www.redalyc.org/pdf/4760/476047399003.pdf

González, P. (2019). *Consecuencias ambientales de la aplicación de fertilizantes*. https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/27059/1/Consecuencias_ambientales_de_la_aplicacion_de_fertilizantes.pdf

ITW Reagents. (2018). *Determinación de Nitrógeno por el Método Kjeldahl*. https://www.itwreagents.com/uploads/20180122/A173_ES.pdf

JMP Statistical Software. (2024). *One-Way Anova*. https://www.jmp.com/en_us/statistics-knowledge-portal/one-way-Anova.html

Kent State University. (2024). *One-Way Anova*. https://libguides.library.kent.edu/spss/onewayAnova

López, U. y Aguilar, J. (2020). *Producción de fertilizante sólido a partir de vinazas de destilación de alcohol etílico*. https://1library.co/document/8ydnrj6q-produccion-fertilizante-solido-partir-vinazas-destilacion-alcohol-etilico.html

Martínez, I. (2012). *Procedimiento para obtener un producto sólido fertilizante y biocombustible a partir de vinazas de caña de azúcar y producto sólido fertilizante y biocombustible obtenido mediante dicho procedimiento*. https://patents.google.com/patent/WO2012069665A1/es

McCabe, W., Smith, J. y Harriot, P. (2007). Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. Ciudad de México: McGraw Hill.

McCray, J. M. y Mylavarapu, R. (2010). Sugarcane Nutrient Management Using Leaf Analysis: SS-AGR-335/AG345, 7/2010. *EDIS*, *2010*(4).

Melgar, M., Meneses, A., Orozco, H. y Pérez, O. (2014). *El Cultivo de la Caña de Azúcar en Guatemala*. https://cengicana.org/files/20170103101309141.pdf

Meštrović, T. (2019). *What is Spectroscopy?* https://www.news-medical.net/health/What-is-Spectroscopy.aspx

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación [MAPA]. (2021). *Sector agrícola en Guatemala*. https://www.mapa.gob.es/es/ministerio/ministerio-exterior/america-central-caribe/2021fichaicexagricolaguatemala_tcm30-576578.pdf

Millones-Chapoñan, M., Muñoz-Pérez, S. P. y Villanueva-Meza, C. D. (2023). La ceniza de bagazo de caña de azúcar como aditivo estabilizador en suelos arcillosos con fines de pavimentación: una Revisión Literaria. *Ingeniería y competitividad*, *25*(1).

Paz, K. (2007). *Media Aritmética Simple*. http://www.editorialkamar.com/et/archivo11.pdf

Pérez, O. F. A., Varela, K. A. D. y Mena, J. D. C. (2023). Efecto de la incorporación de ceniza de bagazo de caña en las propiedades mecánicas y las emisiones de dióxido de carbono del hormigón preparado con residuos de vidrio. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, *62*(5), 443-451.

Portal TecnoAgrícola. (2024). *NUTRIMON® 14-14-14*. https://www.buscador.portaltecnoagricola.com/vademecum/col/producto/NUTRIMON%C2%AE%2014-14-14-2

Refinadora Costarricense de Petróleo [RCP]. (2023). *Análisis del Proyecto Gasolina con Etanol (Primer informe de avance)*. https://www.recope.go.cr/wp-content/uploads/2023/09/Informe-Etanol-I-avance-2023.pdf

Rojas, M., Izquierdo, J. y Álvarez, M. (2019). *Uso de la ceniza de bagazo de caña (CBC) como reemplazo parcial del cemento Portland: Caso Colombia*. https://perfilesycapacidades.javeriana.edu.co/es/publications/uso-de-la-ceniza-de-bagazo-de-ca %C3 %B1a-cbc-como-remplazo-parcial-del-

Romero, E., Olea, I., Alonzo, D., Scandaliaris, J., Alonso, J., Digonzelli, P. . . . y Leggio, M. (2004). *Recomendaciones para fertilización de la caña de azúcar*. https://www.profertil.com.ar/wp-content/uploads/2020/08/fertilizacion-de-cana-de-azucar.pdf

Semiagro. (2017). *Triple 20 hormonal 800g*. https://supersemiagro.com/productos/triple-20-hormonal-800-gr/

Sotomayor, C., Morandini, M., Sanzano, G. A. y Rojas Quinteros, H. C. (2018). Efecto de la aplicación de vinaza en propiedades químicas y físicas del suelo. *Revista industrial y agrícola de Tucumán*, *95*(1), 27-33.

Skoog, D. A., West, D. M. y Holler, F. J. (1997). *Fundamentos de Química Analítica. Tomo II.* Barcelona: Editorial Reverté.

Skoog, D., West, D., Holler, J. y Crouch, S. (2015). *Fundamentos de química analítica.* Cengage Learning.

Treybal, R. (1997). Operaciones de Transferencia de Masa. Segunda Edición, McGraw-Hill. Nueva York, Estados Unidos.

United Nations [UN]. (2018). *Gestión de Residuos*. https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/dsd/dsd_aofw_ni/ni_pdfs/NationalReports/guatemala/waste.pdf

Universidad de Florida. (2023). *Florida Crop/Pest Profile: Sugarcane*. https://edis.ifas.ufl.edu/publication/PI207

Universidad Nacional Autónoma de México [UNAM]. (2019). *Espectroscopía Atómica de Absorción*. http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/exposicion_absorcion_atomica_5045.pdf

Universidad Zamorano. (2016). *Características de lo fertilizantes y enmiendas*. https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/1b28480c-2924-42a4-867b-c2bf13e6d8ff/content

Upadhyay, B. (2018). *How to convert solar intensity in LUX to watt per meter square for sunlight?* https://www.researchgate.net/post/Howto_convert_solar_intensity_in_LUX_to_watt_per_meter_square_for_sunlight

Vera, S. M. P. (2019). Elaboración de fertilizante orgánico a partir de vinaza producida en Industrias Agrícolas de Bermejo S.A. Departamento de Tarija: Proyecto de grado, modalidad (investigación aplicada). Repositorio UAJMS.

XII. ANEXOS

A. DATOS DE PLACA

Cuadro 11. Datos de placa de la cocina de inducción con horno eléctrico

Parámetro	Especificación
Marca	Indurama
Modelo	Oviedo
Voltaje	220 VCA
Frecuencia	50/60 Hz
Potencia Hor. Grill	1600 W
Potencia Hor. Suelo	2000 W
Potencia Nominal Tableta	7200 W
Potencia máxima artefacto	9246 W
Corriente máxima artefacto	42.0 A
Consumo de energía	960 kWh/año

Cuadro 12. Datos de placa de la báscula industrial

Parámetro	Especificación
Marca	Ohaus 3000 Series
Modelo	T31P
Capacidad total	5 – 20.000 kg
Unidades de pesaje	kg, lb, g, oz, lb:oz
Tiempo de estabilización	2 segundos
Alimentación	9 V CC, 0.5 A, adaptador CA
Intervalo de temperatura funcional	-10 °C a 40 °C
Intervalo de humedad	80 % para temperaturas hasta 31 °C, reducción lineal a 50 % a 40 °C, sin condensación
Dimensiones (ancho x profundidad x alto)	210 x 71 x 500 mm
Peso neto	3.6 lb / 1.6 kg

Cuadro 13. Datos de placa de la balanza de humedad

Parámetro	Especificación
Marca	Ohaus
Modelo	MB120
Capacidad	120 g
Programas de secado	Estándar, Rápido, Rampa, Etapas
Alimentación	120 VAC

Intervalo de temperatura funcional	40 °C a 230 °C
Elemento calefactor	Halógeno
Intervalo de humedad	0.01 a 100 % (0.01 a 1000 % en modo de recuperación)
Resultados mostrados en pantalla	% humedad, % sólidos, % recuperación, temperatura, peso, nombre del método, curvas de secado y estadísticas
Criterios de apagado	Temporizador, Automático, Manual
Dimensiones (An x Al x Lo)	210 x 180 x 350 mm
Peso neto	5.23 kg
Condiciones ambientales admisibles	Para uso exclusivo en interiores
	Temperatura: 10 °C a 40 °C
	Altitud: hasta 4000 m
	Humedad: humedad relativa máxima del 80 % para temperaturas hasta 31°C decreciendo linealmente hasta un 50 % de humedad relativa a 40 °C
	Fluctuaciones de voltaje: 10 % del voltaje nominal
	Potencia eléctrica: máx. 450 W durante el proceso de secado

Cuadro 14. Datos de placa de la báscula de mesa

Parámetro	**Especificación**
Marca	Ohaus Valor 3000 Xtreme
Modelo	V31XH2
Capacidad	2000 g
Sensibilidad	0.1 g
Tiempo de estabilización	≤ 3 segundos
Unidades de pesaje	Lb, oz decimal o fraccional, lb:oz, oz para líquidos (de agua), kg, g
Alimentación	Adaptador CA mural de 9 V CC, 0.5 A, 50/60 Hz o 4 pilas tipo C de 1.5 V
Intervalo de temperatura funcional	0 °C a 40 °C
Intervalo de humedad	10 - 95 %, sin condensación, hasta 4000 m por encima del nivel del mar
Tamaño del plato (Lo x An)	146 x 158 mm
Dimensiones (Lo x An x Al)	218 x 186 x 77 mm
Peso neto	1.3 kg

Cuadro 15. Datos de placa de la balanza analítica

Parámetro	Especificación
Marca	Ohaus Explorer
Modelo	E02140
Capacidad	210 g
Linealidad	± 0.2 mg
Tiempo de estabilización	≤ 4 segundos
Unidades de pesaje	g, mg, oz, oz t, ct, dwt
Alimentación	Adaptador externo, 100-120 VAC, 220-240 VAC, 50/60 Hz
Intervalo de temperatura funcional	10 °C a 40 °C
Tamaño del plato (diámetro)	8.9 cm
Dimensiones (ancho x alto x profundidad)	228 x 387 x 355 mm
Peso neto	1.3 kg

Cuadro 16. Datos de placa del medidor de luz

Parámetro	Especificación
Marca	Extech Instruments EasyView
Modelo	EA30
Rangos de medición	Lux: 40, 400, 4000, 40000, 400000 Lux Foot candles: 40, 400, 4000, 40000 Fc
Alimentación	6 baterías AAA (1.5 V)
Precisión básica	± 3 % de lectura + 0.5 % de escala completa
Dimensiones	150 x 72 x 33 mm
Peso	235 g

Cuadro 17. Datos de placa de la unidad de digestión del Kjeldahl

Parámetro	Especificación
Marca	Büchi
Modelo	K-425
Consumo de energía	1280 W
Tensión de operación	110-120 V ± 10 % / 220-240 V ± 10 %
Frecuencia	50/60 Hz
Rango de temperatura	70 – 580 °C
Dimensiones (ancho x profundidad x alto)	310 x 620 x 540 mm
Peso	12 kg

Cuadro 18. Datos de placa del lavador de gases del Kjeldahl

Parámetro	Especificación
Marca	Büchi
Modelo	K-415
Consumo de energía	1280 W
Tensión de operación	110-120 V ± 10 % / 220-240 V ± 10 %
Tensión del sistema de alimentación / frecuencia / consumo / fusible	230V ± 10 % / 50/60 Hz / 140 W / T1A L 250 V 120V ± 10 % / 50/60 Hz / 140 W / T2A L 250 V 100V ± 10 % / 50/60 Hz / 140 W / T2A L 250 V
Lugar de instalación	Solo para uso interior
Rango de temperatura	5 – 40 °C
Altitud	Hasta 2000 m por encima del nivel del mar
Humedad	Humedad relativa máxima del 80 % para temperaturas hasta 31 °C decreciendo linealmente hasta un 50 % de humedad relativa a 40 °C
Capacidad de aspiración de la bomba (máx)	32 L/min
Capacidad de aspiración del sistema	Ajustable aproximadamente entre 100 y 400 mbar por debajo de la presión atmosférica
Dimensiones (ancho x alto x profundidad)	248 x 412 x 526 mm
Peso	10.1 kg
Categoría de resistencia	II
Nivel de contaminación	2

Cuadro 19. Datos de placa de la unidad de destilación del Kjeldahl

Parámetro	Especificación
Marca	Büchi
Modelo	K-350
Consumo de energía	máx. 2.2 kW
Tensión de conexión	230 V ± 10 % / 200 V ± 10 %
Frecuencia	50/60 Hz
Consumo de corriente (230 V)	8.5 A
Conexión a red	tripolar (P, N, T) vía cable de conexión a la red
Tasa de recuperación	≥ 99.5 %
Reproductibilidad (RSD)	≤ 1 %
Límite de detección	≥ 0.1 mg de nitrógeno
Condiciones ambientales	Para uso exclusivo en interiores
	Temperatura: 5-35 °C
	Altitud: hasta 2000 m
	Humedad: humedad relativa máxima del 80 % para temperaturas hasta 31°C decreciendo

	linealmente hasta un 67 % de humedad relativa a 35 °C
Categoría de resistencia	II
Nivel de contaminación	2
Dimensiones (ancho x alto x profundidad)	400 x 600 x 360 mm
Peso	16.5 kg

Cuadro 20. Datos de placa del espectrofotómetro de absorción atómica

Parámetro	**Especificación**
Marca	PerkinElmer
Modelo	PinAAcle 900F
Energía eléctrica	207-253 VAC, 30 A, 47-63 Hz (bajo carga completa del instrumento), monofásica
Condiciones ambientales	Temperatura: 15 - 35 °C con máxima tasa de cambio de 3 °C
	Humedad: 20-80 % sin condensar
Potencia	800 VA
Dimensiones (ancho x alto x profundidad)	95 x 64 x 68 cm
Peso	94 kg

B. DATOS ORIGINALES

Cuadro 21. Datos originales de la concentración de macronutrientes obtenida en fertilizantes orgánicos formulados en otros estudios

Nutriente	**Concentración (%)**		
Nitrógeno	1.20	1.16	1.14
Potasio	2.28	2.23	2.20
Calcio	0.71	0.69	0.72
Magnesio	0.87	0.90	0.86

Fuente: (López y Aguilar, 2020, p.53-55); (Martínez, 2012, p.8)

Cuadro 22. Certificado de análisis de calidad de vinaza concentrada

Parámetro	**Resultados**
Apariencia	Líquido
Color	Café
Olor	Característico
Brix refractométrico	40.06 °Brix
pH	5.245
Densidad	1.2243 g/cm^3

Fuente: ingenio

Cuadro 23. Datos experimentales para determinar la densidad de una de las materias primas (ceniza de bagazo de caña de azúcar) y de los productos finales de fertilizante orgánico

Muestra		Masa total (± 0.0001 g)	Masa probeta (± 0.0001 g)	Masa muestra (± 0.0001 g)
Ceniza de bagazo de caña de azúcar	1	37.2952	34.8063	2.4889
	2	37.4051	34.8062	2.5989
	3	37.2812	34.8064	2.4748
Fertilizante 45 %	1	46.1376	40.3302	5.8074
	2	45.7471	40.3302	5.4169
	3	46.0130	40.3302	5.6828
Fertilizante 50 %	1	47.1322	40.3302	6.8020
	2	46.4934	40.3302	6.1632
	3	46.7897	40.3302	6.4595
Fertilizante 55 %	1	45.9440	40.3302	5.6138
	2	46.4532	40.3302	6.1230
	3	46.2014	40.3302	5.8712

Fuente: elaboración propia

Cuadro 24. Datos experimentales de intensidad lumínica utilizando un medidor de luz

Medición	Intensidad lumínica (± 0.1 Klux)
1	108.4
2	103.8
3	104.6
4	107.6

Fuente: elaboración propia

Cuadro 25. Parámetros estadísticos de los datos experimentales de intensidad lumínica utilizando un medidor de luz

Parámetro	Intensidad lumínica
Media (Klux)	106.1 ± 0.2
Desviación estándar (Klux)	1.3
CV (%)	1.2

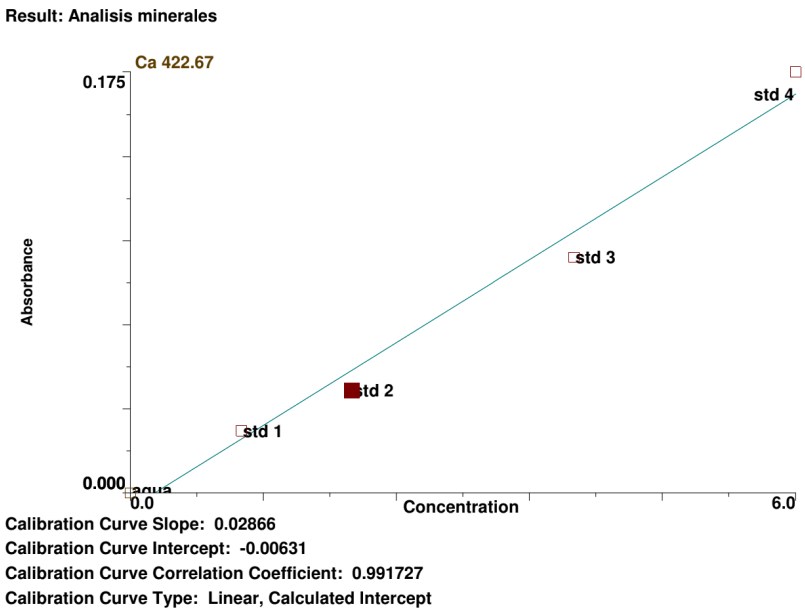
Fuente: elaboración propia

Cuadro 26. Datos experimentales para determinar el porcentaje de nitrógeno presente en las materias primas y de los productos finales de fertilizante orgánico por el método de Kjeldahl

Muestra		Peso de muestra (± 0.0001 g)	Volumen empleado en la titulación (± 0.07 mL)
Vinaza	1	0.2513	1.60
	2	0.2515	1.50
Ceniza de bagazo de caña de azúcar	1	0.2500	0.30
	2	0.2505	0.20
Fertilizante 45 %	1	0.2500	2.20
	2	0.2508	2.20
Fertilizante 50 %	1	0.2507	2.20
	2	0.2501	2.10
Fertilizante 55 %	1	0.2504	2.10
	2	0.2509	2.10

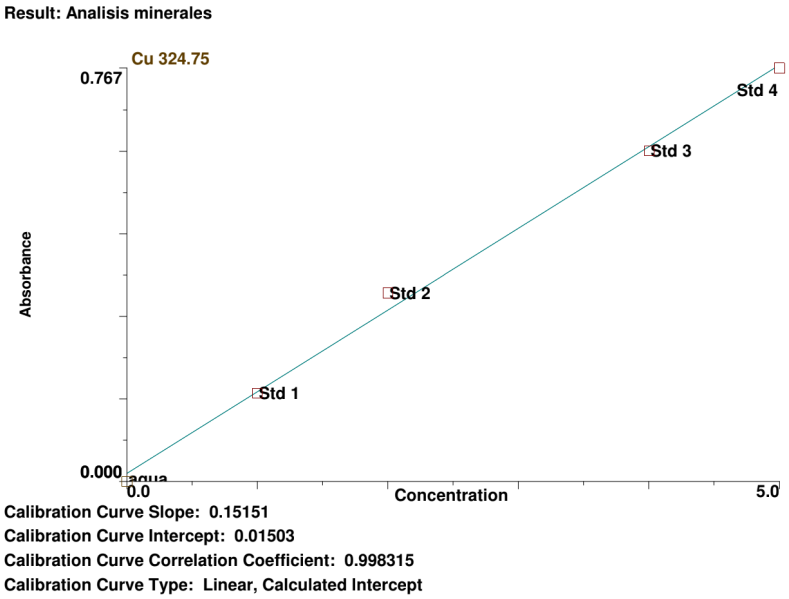
Fuente: elaboración propia

Figura 6. Curva de calibración de calcio realizada en el equipo de espectroscopía de absorción atómica PerkinElmer PinAAcle 900F



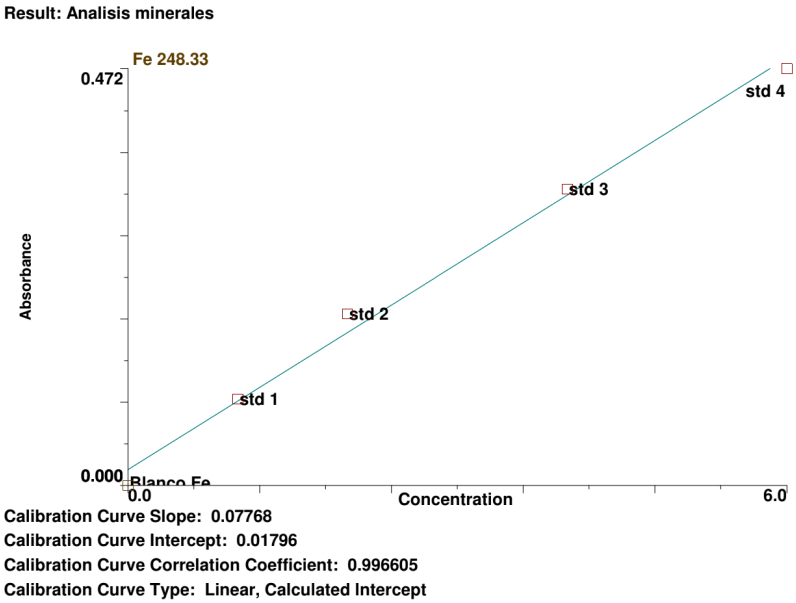
Fuente: elaboración propia

Figura 7. Curva de calibración de cobre realizada en el equipo de espectroscopía de absorción atómica PerkinElmer PinAAcle 900F



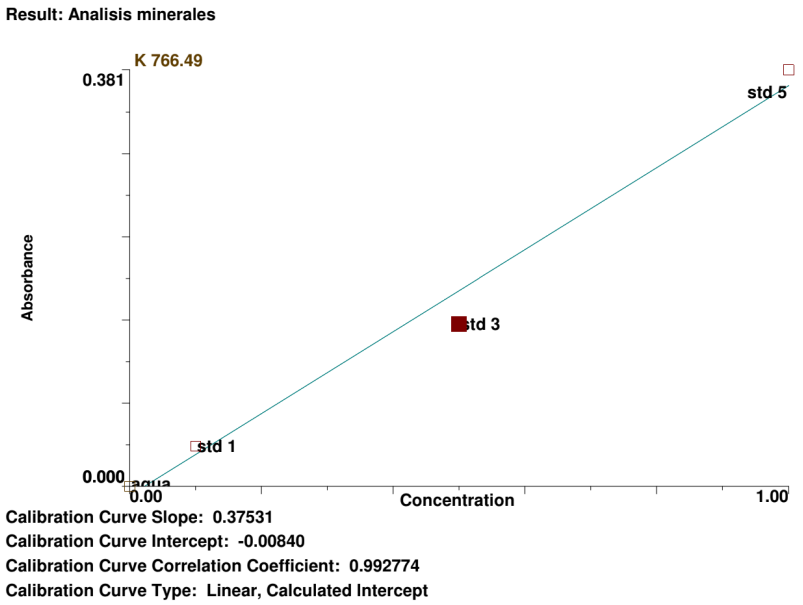
Fuente: elaboración propia

Figura 8. Curva de calibración de hierro realizada en el equipo de espectroscopía de absorción atómica PerkinElmer PinAAcle 900F



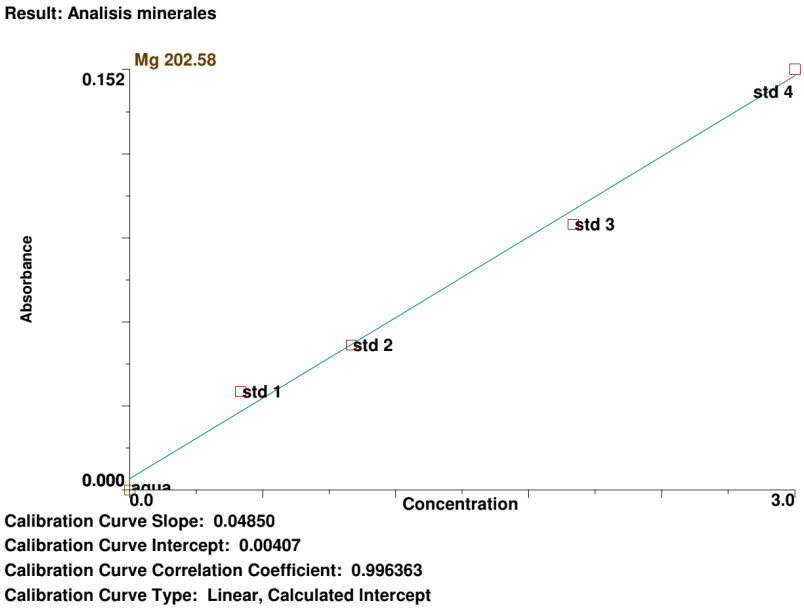
Fuente: elaboración propia

Figura 9. Curva de calibración de potasio realizada en el equipo de espectroscopía de absorción atómica PerkinElmer PinAAcle 900F



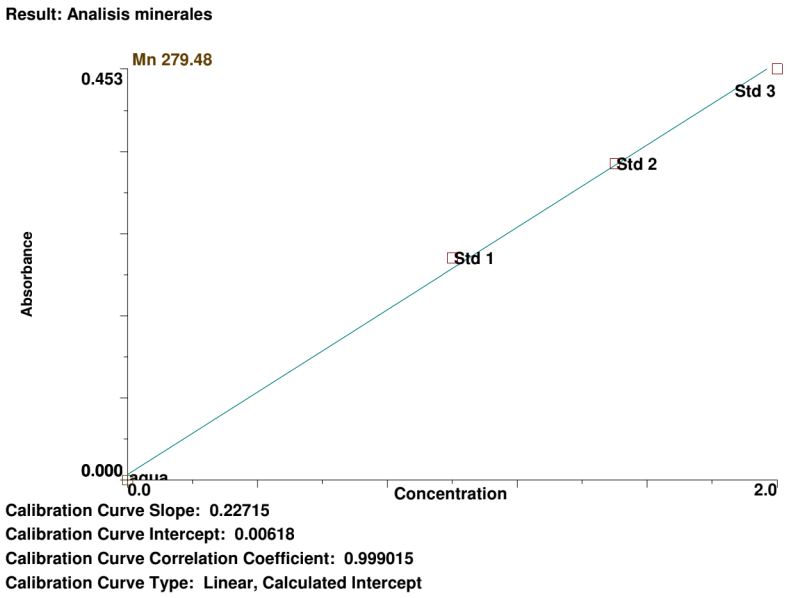
Fuente: elaboración propia

Figura 10. Curva de calibración de magnesio realizada en el equipo de espectroscopía de absorción atómica PerkinElmer PinAAcle 900F



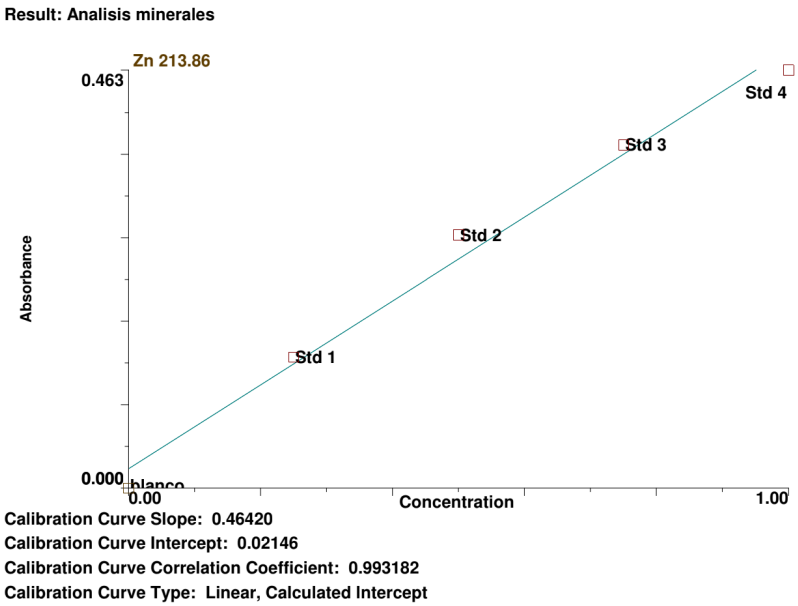
Fuente: elaboración propia

Figura 11. Curva de calibración de manganeso realizada en el equipo de espectroscopía de absorción atómica PerkinElmer PinAAcle 900F



Fuente: elaboración propia

Figura 12. Curva de calibración de zinc realizada en el equipo de espectroscopía de absorción atómica PerkinElmer PinAAcle 900F



Fuente: elaboración propia

Cuadro 27. Datos experimentales para determinar la cantidad de calcio presente en los fertilizantes orgánicos utilizando el método de espectroscopía de absorción atómica

Réplica	Analito: Calcio. Concentración de muestra (± 0.001 mg/L)		
	Fertilizante 45 %	Fertilizante 50 %	Fertilizante 55 %
1	0.952	0.962	0.995
2	0.937	0.966	0.987
3	0.955	0.986	0.986

Fuente: elaboración propia

Cuadro 28. Datos experimentales para determinar la cantidad de cobre presente en los fertilizantes orgánicos utilizando el método de espectroscopía de absorción atómica

Réplica	Analito: Cobre. Concentración de muestra (± 0.001 mg/L)		
	Fertilizante 45 %	Fertilizante 50 %	Fertilizante 55 %
1	0.6601	0.8551	1.0946
2	0.6576	0.8687	1.1042
3	0.6417	0.8613	1.1060

Fuente: elaboración propia

Cuadro 29. Datos experimentales para determinar la cantidad de hierro presente en los fertilizantes orgánicos utilizando el método de espectroscopía de absorción atómica

Réplica	Analito: Hierro. Concentración de muestra (± 0.001 mg/L)		
	Fertilizante 45 %	Fertilizante 50 %	Fertilizante 55 %
1	0.283	0.195	0.181
2	0.276	0.191	0.185
3	0.286	0.194	0.182

Fuente: elaboración propia

Cuadro 30. Datos experimentales para determinar la cantidad de potasio presente en los fertilizantes orgánicos utilizando el método de espectroscopía de absorción atómica

Réplica	Analito: Potasio. Concentración de muestra (± 0.001 mg/L)		
	Fertilizante 45 %	Fertilizante 50 %	Fertilizante 55 %
1	0.673	0.671	0.567
2	0.662	0.675	0.557
3	0.607	0.660	0.559

Fuente: elaboración propia

Cuadro 31. Datos experimentales para determinar la cantidad de magnesio presente en los fertilizantes orgánicos utilizando el método de espectroscopía de absorción atómica

Réplica	Analito: Magnesio. Concentración de muestra (± 0.001 mg/L)		
	Fertilizante 45 %	Fertilizante 50 %	Fertilizante 55 %
1	2.467	2.368	2.390
2	2.127	2.357	2.074
3	2.283	2.102	2.338

Fuente: elaboración propia

Cuadro 32. Datos experimentales para determinar la cantidad de manganeso presente en los fertilizantes orgánicos utilizando el método de espectroscopía de absorción atómica

Réplica	Analito: Manganeso. Concentración de muestra (± 0.001 mg/L)		
	Fertilizante 45 %	Fertilizante 50 %	Fertilizante 55 %
1	0.085	0.082	0.077
2	0.082	0.083	0.079
3	0.082	0.081	0.077

Fuente: elaboración propia

Cuadro 33. Datos experimentales para determinar la cantidad de zinc presente en los fertilizantes orgánicos utilizando el método de espectroscopía de absorción atómica

Réplica	Analito: Zinc. Concentración de muestra (± 0.001 mg/L)		
	Fertilizante 45 %	Fertilizante 50 %	Fertilizante 55 %
1	0.210	0.169	0.176
2	0.212	0.171	0.183
3	0.208	0.174	0.182

Fuente: elaboración propia

C. DATOS CALCULADOS

Cuadro 34. Datos calculados para determinar el tamaño de muestra necesario para cada nutriente

Nutriente	Media (%)	Desviación estándar (%)	Margen de error	Tamaño de muestra	# muestras requeridas
Nitrógeno	1.17	0.0003055	0.0005833	1.05	2
Potasio	2.24	0.0004041	0.0011183	0.50	1
Calcio	0.71	0.0001528	0.0003533	0.72	1
Magnesio	0.88	0.0002082	0.0004383	0.87	1

Fuente: elaboración propia

Cuadro 35. Datos calculados de la ceniza de bagazo de caña de azúcar

Réplica	Densidad (g/mL)
1	0.24889 ± 0.00249
2	0.25989 ± 0.00260
3	0.24748 ± 0.00247

Fuente: elaboración propia

Cuadro 36. Parámetros estadísticos de los datos experimentales de densidad de la ceniza de bagazo de caña de azúcar

Parámetro	Densidad
Media (g/mL)	0.25209 ± 0.00434
Desviación estándar (g/mL)	0.00480
CV (%)	1.90588

Fuente: elaboración propia

Cuadro 37. Datos calculados de la densidad de los fertilizantes orgánicos

Muestra	Densidad promedio (g/mL)	Desviación estándar (g/mL)	CV (%)
Fertilizante 45 %	0.56357 ± 0.00977	0.01410	2.50267
Fertilizante 50 %	0.64749 ± 0.01122	0.02260	3.49112
Fertilizante 55 %	0.58693 ± 0.01017	0.01800	3.06774

Fuente: elaboración propia

Cuadro 38. Datos calculados del porcentaje de nitrógeno presente en las materias primas y de los productos finales de fertilizante orgánico utilizando el método de Kjeldahl

Muestra		Porcentaje de Nitrógeno (± 0.039 %)	Porcentaje de Nitrógeno promedio (%)
Vinaza	1	0.891	0.863 ± 0.040
	2	0.835	
Ceniza de bagazo de caña de azúcar	1	0.168	0.140 ± 0.040
	2	0.112	
Fertilizante 45 %	1	1.232	1.23 ± 0.003
	2	1.228	
Fertilizante 50 %	1	1.229	1.19 ± 0.057
	2	1.148	
Fertilizante 55 %	1	1.146	1.16 ± 0.018
	2	1.172	

Fuente: elaboración propia

Cuadro 39. Parámetros estadísticos de datos experimentales en determinación de calcio presente en los fertilizantes orgánicos utilizando el método de espectroscopía de absorción atómica

Parámetro	Analito: Calcio		
	Fertilizante 45 %	**Fertilizante 50 %**	**Fertilizante 55 %**
Media	0.948 mg/L	0.972 mg/L	0.990 mg/L
Desviación estándar	0.0094 mg/L	0.0130 mg/L	0.0050 mg/L
CV (%)	0.99 %	1.34 %	0.50 %

Fuente: elaboración propia

Cuadro 40. Parámetros estadísticos de datos experimentales en determinación de cobre presente en los fertilizantes orgánicos utilizando el método de espectroscopía de absorción atómica

Parámetro	Analito: Cobre		
	Fertilizante 45 %	**Fertilizante 50 %**	**Fertilizante 55 %**
Media	0.6531 mg/L	0.8617 mg/L	1.1016 mg/L
Desviación estándar	0.00995 mg/L	0.00682 mg/L	0.00613 mg/L
CV (%)	1.52 %	0.79 %	0.56 %

Fuente: elaboración propia

Cuadro 41. Parámetros estadísticos de los datos experimentales en determinación de hierro presente en fertilizantes orgánicos utilizando el método de espectroscopía de absorción atómica

Parámetro	Analito: Hierro		
	Fertilizante 45 %	**Fertilizante 50 %**	**Fertilizante 55 %**
Media	0.282 mg/L	0.193 mg/L	0.183 mg/L
Desviación estándar	0.0052 mg/L	0.0021 mg/L	0.0022 mg/L
CV (%)	1.85 %	1.11 %	1.23 %

Fuente: elaboración propia

Cuadro 42. Parámetros estadísticos de los datos experimentales en determinación de potasio presente en fertilizantes orgánicos utilizando el método de espectroscopía de absorción atómica

Parámetro	Analito: Potasio		
	Fertilizante 45 %	**Fertilizante 50 %**	**Fertilizante 55 %**
Media	0.647 mg/L	0.669 mg/L	0.561 mg/L
Desviación estándar	0.0356 mg/L	0.0076 mg/L	0.0053 mg/L
CV (%)	5.50 %	1.14 %	0.95 %

Fuente: elaboración propia

Cuadro 43. Parámetros estadísticos de los datos experimentales en determinación de magnesio presente en fertilizantes orgánicos utilizando el método de espectroscopía de absorción atómica

Parámetro	Analito: Magnesio		
	Fertilizante 45 %	**Fertilizante 50 %**	**Fertilizante 55 %**
Media	2.292 mg/L	2.276 mg/L	2.267 mg/L
Desviación estándar	0.1698 mg/L	0.1505 mg/L	0.1694 mg/L
%RSD	7.41 %	6.61 %	7.47 %

Fuente: elaboración propia

Cuadro 44. Parámetros estadísticos de los datos experimentales en determinación de manganeso presente en fertilizantes orgánicos utilizando el método de espectroscopía de absorción atómica

Parámetro	Analito: Manganeso		
	Fertilizante 45 %	**Fertilizante 50 %**	**Fertilizante 55 %**
Media	0.083 mg/L	0.082 mg/L	0.078 mg/L
Desviación estándar	0.0019 mg/L	0.0013 mg/L	0.0008 mg/L
CV (%)	2.32 %	1.53 %	1.03 %

Fuente: elaboración propia

Cuadro 45. Parámetros estadísticos de los datos experimentales en determinación de zinc presente en fertilizantes orgánicos utilizando el método de espectroscopía de absorción atómica

Parámetro	Analito: Zinc		
	Fertilizante 45 %	**Fertilizante 50 %**	**Fertilizante 55 %**
Media	0.210 mg/L	0.171 mg/L	0.180 mg/L
Desviación estándar	0.0019 mg/L	0.0024 mg/L	0.0035 mg/L
CV (%)	0.91 %	1.37 %	1.97 %

Fuente: elaboración propia

Cuadro 46. Resumen de datos calculados para las propiedades químicas de los productos finales de fertilizante orgánico utilizando el método de Kjeldahl y espectroscopía de absorción atómica

Fertilizante orgánico 1 (45 % ceniza)	
Nitrógeno	1.23 ± 0.003 %
Potasio	3.99 ± 0.035 %
Calcio	1.12 ± 0.009 %
Magnesio	0.378 ± 0.002 %
Cobre	9.26 ± 0.14 ppm
Hierro	465 ± 216 ppm
Manganeso	47.4 ± 1.1 ppm
Zinc	120 ± 1 ppm

Fertilizante orgánico 2 (50 % ceniza)	
Nitrógeno	1.19 ± 0.057 %
Potasio	4.12 ± 0.036 %
Calcio	1.15 ± 0.010 %
Magnesio	0.375 ± 0.002 %
Cobre	12.2 ± 0.1 ppm
Hierro	318 ± 148 ppm
Manganeso	46.8 ± 0.8 ppm
Zinc	97.5 ± 1.4 ppm
Fertilizante orgánico 3 (55 % ceniza)	
Nitrógeno	1.16 ± 0.018 %
Potasio	3.46 ± 0.030 %
Calcio	1.17 ± 0.010 %
Magnesio	0.374 ± 0.002 %
Cobre	15.61 ± 0.09 ppm
Hierro	302 ± 140 ppm
Manganeso	44.5 ± 0.5 ppm
Zinc	103 ± 2 ppm

Fuente: elaboración propia

Cuadro 47. Resumen de los datos sometidos al análisis de varianza (Anova) de un factor realizado en Microsoft Excel

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Fertilizante 45 %	8	641.727	80.216	25925.827
Fertilizante 50 %	8	474.568	59.321	12116.777
Fertilizante 55 %	8	465.162	58.145	10998.528

Fuente: elaboración propia

Cuadro 48. Análisis de varianza (Anova) de un factor realizado en Microsoft Excel correspondiente a los 3 diferentes fertilizantes orgánicos sólidos producidos

Grupos	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Valor-P	Valor crítico F
Entre grupos	2466.915	2	1233.457	0.0755	0.928	3.467
Dentro de los grupos	343287.92	21	16347.044	N/A	N/A	N/A
Total	345754.84	23	N/A	N/A	N/A	N/A

Fuente: elaboración propia

D. CÁLCULOS

Cálculo 1. Cálculo del análisis factorial para determinar la cantidad de tratamientos necesarios

Ecuación 1. Diseño factorial

$$N = 2^n = 2^1 = 2$$

Donde:

N = número total de combinaciones o tratamientos

n = número de factores a estudiar

(Fernández, 2020)

El presente cálculo se realizó para determinar la cantidad de mezclas necesarias, para lo que se utilizó el número de factores a estudiar, que en este caso era solamente un factor, y correspondía a la proporción de mezcla.

Cálculo 2. Determinación de la cantidad de muestras de análisis necesarias para asegurar un nivel de confianza y margen de error aceptables

Ecuación 2. Tamaño de muestra para una estimación por intervalo de la media poblacional

$$n = \left(\frac{z_{\alpha/2} * \sigma}{E}\right)^2 = \left(\frac{1.96 * 0.0003055\ \%}{0.05 * 1.17\ \%}\right)^2 = 1.05 \approx 2$$

Donde:
n = número de muestras
$z_{\alpha/2}$ = nivel de confianza
σ = desviación estándar
E = margen de error

(Anderson, Sweeney, y Thomas, 2008)

El presente cálculo se realizó para determinar la cantidad de muestras necesarias de acuerdo con el nivel de confianza elegido, que fue de 95 % ($z_{0.025} = 1.96$). Asimismo, se utilizó la desviación estándar calculada a partir de datos teóricos reportados en otros estudios y para el margen de error se utilizó la media de los datos mencionados, con una variación aceptada del 5 %. El resultado de este cálculo se ejemplificó para el nitrógeno; todos los cálculos de determinación del tamaño de muestra se realizaron con el mismo procedimiento.

Cálculo 3. Ejemplo de cálculo de la preparación de soluciones para el análisis de muestras por espectroscopía de absorción atómica (solución madre)

$$\frac{1.764\ gf}{25\ mL} * \frac{35.43\ mg\ Cu}{1000\ gf} * \frac{1000\ mL}{1\ L} = 2.50\ ppm$$

El presente cálculo se realizó para determinar la forma de preparar la solución madre del análisis de minerales en las muestras de fertilizantes orgánicos, mediante estequiometría. Para ello se utilizaron datos de la concentración de nutrientes presentes en un fertilizante elaborado a partir de residuos agroindustriales, como referencia de un valor esperado en las formulaciones realizadas (Martínez, 2012). La solución madre se realizó con base al contenido de cobre presente, puesto que era el de menor concentración, en comparación al resto de minerales de análisis y lo que se buscó es que alcanzara una concentración aproximadamente en el medio de la curva de calibración para mantener los límites de linealidad. Para el cobre el límite es hasta 5 ppm, por lo que se esperaba que la concentración de la solución preparada estuviese alrededor de 2.5 ppm.

Cálculo 4. Ejemplo de cálculo de la preparación de soluciones para el análisis de muestras por espectroscopía de absorción atómica (diluciones)

$$\frac{1.764\ gf}{25\ mL} * \frac{2.92\ g\ Ca}{100\ gf} * \frac{1000\ mg\ Ca}{1\ g\ Ca} * \frac{1000\ mL}{1\ L} = 2060.4\ ppm$$

$$\frac{2.5\ mg\ Ca}{1000\ mL} * \frac{1000\ mL}{2060.4\ mg\ Ca} * 100\ mL = 0.121\ mL\ sol.madre$$

El presente cálculo se realizó para determinar la forma de preparar las diluciones necesarias a partir de la solución madre para el análisis de minerales en las muestras de fertilizantes orgánicos, mediante estequiometría. Para ello se utilizaron datos de la concentración de nutrientes presentes

en un fertilizante elaborado a partir de residuos agroindustriales, como referencia de un valor esperado en las formulaciones realizadas (Martínez, 2012). Se calculó en primer lugar la concentración del analito que se esperaría que estuviera presente en la solución madre preparada, para así después calcular la alícuota que debe tomarse de dicha solución y el volumen en el que debe ser diluido para alcanzar una concentración aproximadamente en el medio de la curva de calibración para mantener los límites de linealidad. En este se ejemplificó para el calcio, que tiene como límite 5 ppm, por lo que se esperaba que la concentración de la dilución realizada estuviese alrededor de 2.5 ppm. Todos los cálculos de diluciones se realizaron con el mismo procedimiento.

Cálculo 5. Ejemplo de cálculo de la determinación de minerales por espectroscopía de absorción atómica

$$\frac{0.948\ mg\ Ca}{1000\ mL\ dilución} * \frac{100\ mL\ dilución}{0.12\ mL\ sol.madre} * \frac{25\ mL\ sol.madre}{1.7641\ gf} * \frac{1\ g\ Ca}{1000\ mg} * 100 = 1.12\ \%\ Ca$$

El presente cálculo se realizó para determinar la concentración de minerales presentes en las muestras de fertilizantes orgánicos, mediante estequiometría. Para ello se utilizó la lectura proporcionada por el equipo de absorción atómica, el volumen del balón aforado en el que se preparó tanto la dilución como la solución madre, así como el dato de la alícuota tomada de esta y la cantidad de fertilizante empleado para preparar la solución. El resultado de este cálculo pertenece a la concentración de calcio presente en la muestra de fertilizante orgánico de 45 %. Todos los cálculos de diluciones se realizaron con el mismo procedimiento.

Cálculo 6. Ejemplo de cálculo de la determinación de densidad de la ceniza de bagazo de caña de azúcar y productos finales de fertilizante orgánico

$$\rho = \frac{masa\ de\ muestra}{volumen} = \frac{masa\ total - masa\ probeta}{volumen} = \frac{(37.2952 - 34.8063)\ g\ ceniza}{10\ mL}$$

$$= 0.24889\ g/mL$$

El presente cálculo se realizó para determinar la densidad tanto de la ceniza de bagazo de caña de azúcar, como de los productos finales de fertilizante orgánico. Para ello se requirió de la masa de la muestra, que se calculó mediante la diferencia entre la masa total (probeta + muestra) y la masa de la probeta vacía, dividido dentro del volumen de la probeta utilizada. El resultado de este cálculo

corresponde a la primera medición de densidad de la ceniza. Todos los cálculos de densidad se realizaron con el mismo procedimiento.

Cálculo 7. Ejemplo de cálculo de la determinación de porcentaje de nitrógeno

Ecuación 9. Determinación de nitrógeno utilizando ácido bórico como solución receptora en el método de Kjeldahl

$$\%\ Nitrógeno = \frac{(mL\ ácido\ valorante - mL\ blanco) * N\ del\ ácido * 1.4}{peso\ de\ la\ muestra\ en\ gramos}$$

$$= \frac{(2.2 - 0)\ mL * 0.1\ N\ HCl * 1.4}{0.2500\ g\ f} = 1.232\ \%$$

(ITW Reagents, 2018)

El presente cálculo se realizó para determinar la densidad tanto de la ceniza de bagazo de caña de azúcar, como de los productos finales de fertilizante orgánico. Para ello se utilizaron los mL necesarios en la valoración de la muestra y del blanco, así como la concentración del ácido clorhídrico empleado, y el peso de la muestra. El resultado de este cálculo corresponde a la primera medición de porcentaje de nitrógeno presente en el fertilizante 45 %. Todos los cálculos de porcentaje de nitrógeno se realizaron con el mismo procedimiento.

Cálculo 8. Balance de energía del sistema durante el proceso de evaporación de la vinaza

$$E_{suministrada} = E_{evap} + pérdidas$$

$$P * t = (m_{agua\ evap} * h_{fg,agua}) + pérdidas$$

$$(1600\ W * 10{,}800\ s)\left(\frac{1\ kJ}{1000\ J}\right) = (2.78\ kg * 2257.1\ kJ/kg) + 11{,}005.262\ kJ$$

$$17{,}280.000\ kJ = 6{,}274.738\ kJ + 11{,}005.262\ kJ$$

$$17{,}280\ kJ = \ 17{,}280\ kJ$$

Donde:
$E_{suministrada}$ = energía suministrada al sistema
E_{evap} = energía requerida para evaporar el agua
P = potencia de la estufa

t = tiempo de secado
$pérdidas$ = pérdidas en el proceso de evaporación
$m_{agua\ evap}$ = masa de agua evaporada
$h_{fg,agua}$ = calor latente de vaporización del agua

El presente cálculo corresponde al balance de energía del sistema durante la concentración de la vinaza mediante el proceso de evaporación. Para ello se calculó la energía suministrada de acuerdo con la potencia de la estufa y el tiempo de evaporación, así como la energía requerida para evaporar el agua utilizando la masa de agua evaporada y el calor latente de vaporización del agua. En el sistema se consideraron también las pérdidas energéticas.

Cálculo 9. Determinación de la irradiación solar a partir de la intensidad lumínica del sol

$$106.1\ Klux * \frac{1000\ lux}{1\ Klux} * \frac{0.0079\ W/m^2}{1\ lux} = 838.19\ W/m^2$$

El presente cálculo se realizó para determinar la irradiación solar a partir de la intensidad lumínica del sol, en donde el factor de conversión utilizado fue tomado de la literatura (Upadhyay, 2018). Este dato fue necesario para realizar el balance de energía del proceso de secado.

Cálculo 10. Determinación del área de secado en bandejas expuestas al sol

$$A = largo * ancho = 0.80\ m * 0.48\ m = 0.384\ m^2$$

Donde:
A = área de las bandejas
$largo$ = largo de las bandejas
$ancho$ = ancho de las bandejas

El presente cálculo se realizó para determinar el área de las bandejas donde los fertilizantes orgánicos sólidos fueron dispersados para reducir la humedad contenida en estos. Este dato fue necesario para realizar el balance de energía del proceso de secado.

Cálculo 11. Balance de energía del sistema durante el proceso de secado del producto final de fertilizante orgánico

$$E_{solar} = E_{evap} + pérdidas$$

$$Irradiación\ solar * A * t = (m_{agua\ evap} * h_{fg,agua}) + pérdidas$$

$$(838.19\ W/m^2 * 0.384\ m^2 * 10{,}800\ s)\left(\frac{1\ kJ}{1000\ J}\right) = (0.035\ kg * 2257.1\ kJ/kg) + 3{,}397.14307\ kJ$$

$$3{,}476.14157\ kJ = 78.9985\ kJ + 3{,}397.14\ kJ$$

$$3{,}476.14\ kJ = \ 3{,}476.14\ kJ$$

Donde:
E_{solar} = energía suministrada por el sol
E_{evap} = energía requerida para evaporar el agua
A = área de las bandejas
t = tiempo de secado
$pérdidas$ = pérdidas en el proceso de secado
$m_{agua\ evap}$ = masa de agua evaporada
$h_{fg,agua}$ = calor latente de vaporización del agua (Çengel y Ghajar, 2020)

El presente cálculo corresponde al balance de energía del sistema durante el proceso de secado de las mezclas de vinaza y ceniza de bagazo de caña de azúcar. Para ello se calculó la energía suministrada por el sol y el tiempo de secado, así como la energía requerida para evaporar el agua utilizando la masa de agua evaporada y el calor latente de vaporización del agua. En el sistema se consideraron también las pérdidas energéticas.

E. ANÁLISIS DE ERROR

Cálculo 12. Ejemplo de cálculo de la media de una muestra

Ecuación 11. Media aritmética

$$\bar{x} = \left(\frac{X_1 + X_2 + X_3 + \cdots + X_n}{n}\right) =$$

$$= \left(\frac{(0.24889\ g/mL) + (0.25989\ g/mL) + (0.24748\ g/mL)}{3}\right)$$

$$= 0.25209\ \text{g/mL}$$

(Paz, 2007)

Se sustituyen los datos a los que se calculará el promedio y se divide según la cantidad de datos utilizados. Este cálculo corresponde a la densidad promedio de la ceniza de bagazo de caña de azúcar. Todos los cálculos de media aritmética se realizaron con el mismo procedimiento.

Cálculo 13. Ejemplo de cálculo de incertidumbre de sumas y diferencias

Ecuación 12. Incertidumbre de sumas y diferencias

$$SR = \sqrt{(\mathrm{SX})^2 + (\mathrm{SY})^2 + (\mathrm{SZ})^2 \ldots} = \sqrt{(\pm 0.0001\ \mathrm{kg})^2 + (\pm 0.0001\ \mathrm{kg})^2} = \pm\ 0.00014\ \mathrm{g}$$

Donde:
SR = Incertidumbre del resultado (suma/diferencia)
SX, SY, SZ ... = Incertidumbre de cada cantidad X, Y, Z, etc.

(Durazo, 2016)

Se utiliza para determinar la incertidumbre de cálculos en los que se emplearon sumas y restas, empleando todas las incertidumbres involucradas para realizar las mediciones correspondientes. El resultado de este cálculo pertenece a la diferencia entre la masa total (probeta + muestra) y la masa de la probeta vacía en la primera medición para determinar la densidad de la ceniza. Todos los cálculos de incertidumbre para sumas y diferencias se realizaron con el mismo procedimiento.

Cálculo 14. Ejemplo de cálculo de incertidumbre de divisiones y multiplicaciones

Ecuación 13. Incertidumbre para operaciones con división y multiplicación

$$S_R = |R| * \sqrt{\left(\frac{S_X}{X}\right)^2 + \left(\frac{S_Y}{Y}\right)^2 + \left(\frac{S_Z}{Z}\right)^2 \ldots} = |0.24889\ g/mL| * \sqrt{\left(\frac{\pm 0.00014\ \mathrm{g}}{2.4889\ g}\right)^2 + \left(\frac{\pm 0.1\ \mathrm{mL}}{10\ mL}\right)^2}$$
$$= \pm\ 0.00249\ \mathrm{g/mL}$$

Donde:
S_R= Incertidumbre del resultado (multiplicación/división)
R = Valor del resultado del cálculo
X, Y, Z… = Valor de cada cantidad
$S_{X,Y,Z\ldots}$= Incertidumbre de cada cantidad X, Y, Z, etc.

(Durazo, 2016)

Se utiliza para determinar la incertidumbre de cálculos en los que se emplearon multiplicaciones y divisiones, empleando todas las incertidumbres involucradas para realizar las mediciones correspondientes. El presente cálculo de incertidumbre corresponde a la primera medición de densidad de la ceniza. Todos los cálculos de incertidumbre para multiplicaciones y divisiones se realizaron con el mismo procedimiento.

Cálculo 15. Ejemplo de cálculo de la desviación estándar

Ecuación 14. Desviación estándar

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_1 - \bar{x})^2}{N-1}} =$$

$$= \sqrt{\frac{\left((0.24889\ g/mL) - (0.25209\ \text{g/mL})\right)^2 + \left((0.25989\ g/mL) - (0.25209\ \text{g/mL})\right)^2 + \left((0.24748\ g/mL) - (0.25209\ \text{g/mL})\right)^2}{3-1}}$$

$$= 0.00480\ g/mL$$

Donde:
$\bar{x}$ = media
x_1 = datos que forman parte del conjunto de mediciones de réplicas
N = número de mediciones

(Skoog, West, Holler y Crouch, 2015)

El cálculo es una demostración de la forma en que se calculó la desviación estándar a lo largo del informe. Este consiste en la raíz de la suma del cuadrado de las restas entre cada valor que compone el conjunto de datos y la media dividido (N-1); el resultado corresponde a la desviación estándar de las mediciones de densidad de la ceniza de bagazo de caña de azúcar. Todos los cálculos de desviación estándar se realizaron con el mismo procedimiento.

Cálculo 16. Ejemplo de cálculo del coeficiente de variación

Ecuación 15. Coeficiente de variación

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} * 100 = \frac{0.00480\ g/mL}{0.25209\ g/mL} * 100 = 1.90588\ \%$$

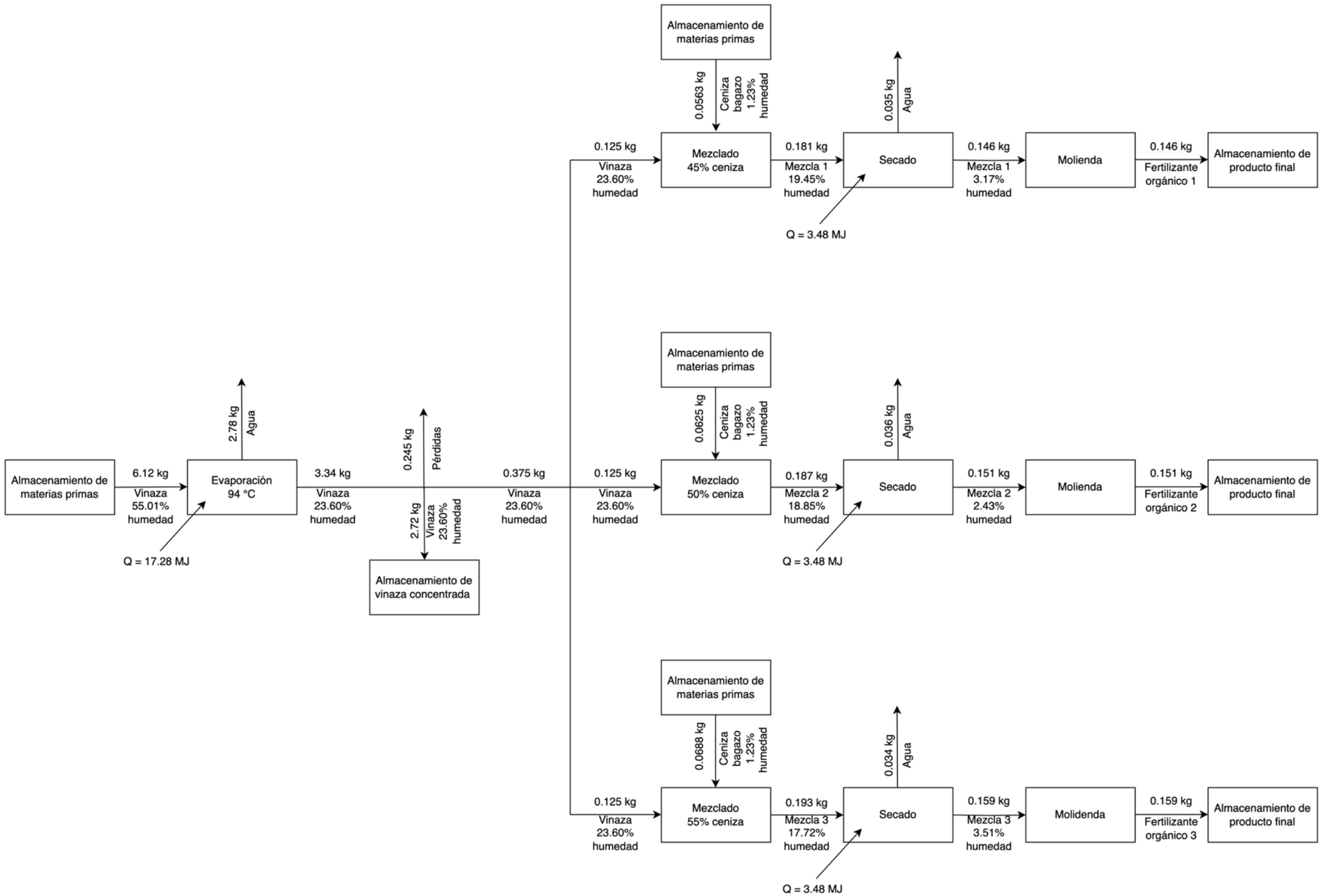
Donde:
$\bar{x}$ = media
s = desviación estándar

(Skoog, West, Holler y Crouch, 2015)

Cálculo realizado utilizando los datos de desviación estándar y media aritmética multiplicado por 100, con el fin de determinar el coeficiente de variación resultante de la forma en la que se llevó a cabo la práctica. El resultado del cálculo corresponde al coeficiente de variación de la determinación de densidad de la ceniza de bagazo de caña de azúcar. Todos los cálculos de coeficiente de variación se realizaron con el mismo procedimiento.

F. BALANCE DE MASA Y ENERGÍA

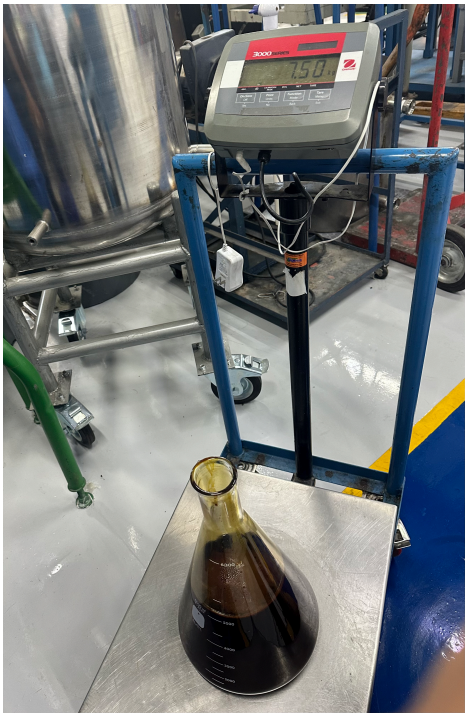
Figura 13. Diagrama de bloques de la producción del fertilizante orgánico sólido utilizando distintas proporciones de vinaza y ceniza de bagazo de la industria azucarera



Fuente: elaboración propia

G. ILUSTRACIONES

Figura 14. Vinaza previo al proceso de evaporación



*Realizado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad Del Valle de Guatemala.

Figura 15. Vinaza durante el proceso de evaporación



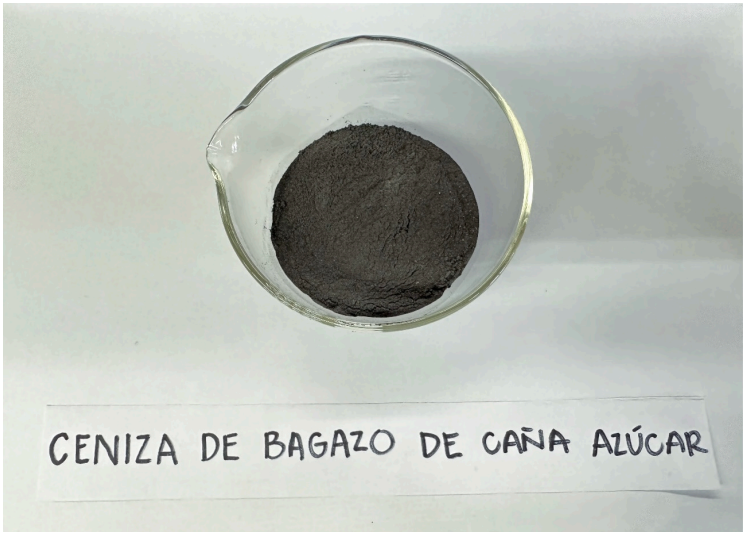
*Realizado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad Del Valle de Guatemala.

Figura 16. Vinaza concentrada luego del proceso de evaporación



*Realizado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad Del Valle de Guatemala.

Figura 17. Ceniza de bagazo de caña de azúcar previo a ser mezclada con la vinaza concentrada



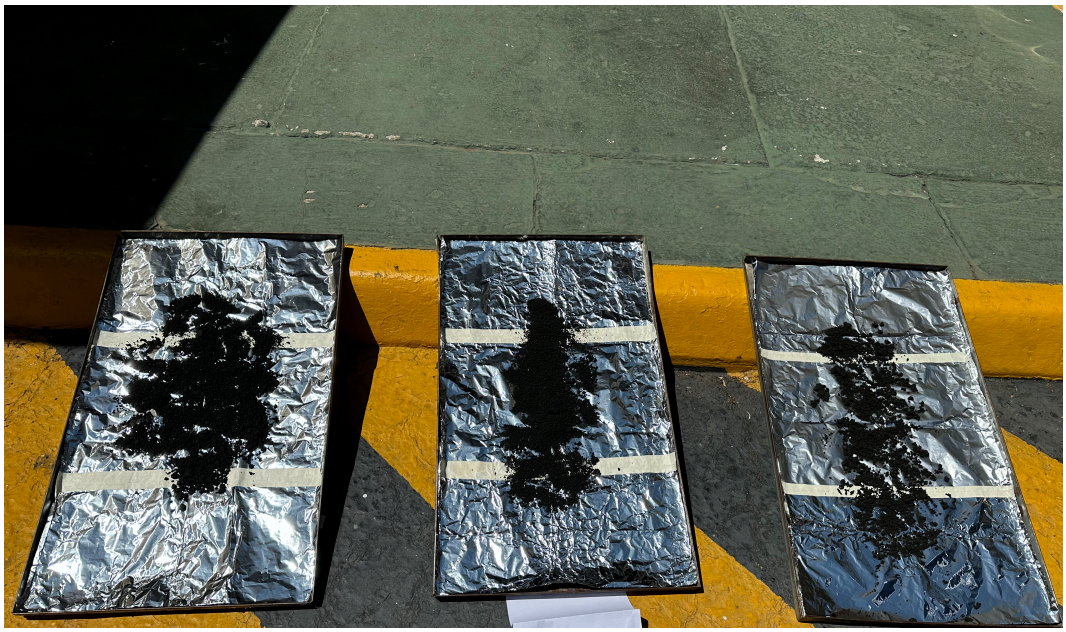
*Realizado en el Laboratorio de Instrumentación Química Avanzada de la Universidad Del Valle de Guatemala.

Figura 18. Ejemplo de mezcla resultante entre la vinaza concentrada y la ceniza de bagazo de caña de azúcar



*Realizado en el Laboratorio de Instrumentación Química Avanzada de la Universidad Del Valle de Guatemala.

Figura 19. Mezclas de diferentes proporciones de vinaza y ceniza de bagazo de caña de azúcar (productos finales de fertilizante orgánico sólido) durante el proceso de secado



*Realizado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad Del Valle de Guatemala.

Figura 20. Sistema para el análisis de nitrógeno por el método de Kjeldahl (digestor y lavador de gases)



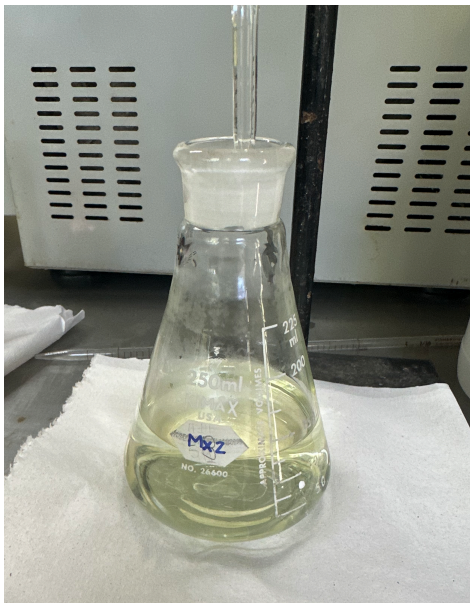
*Realizado en el Laboratorio del Programa en Ciencia y Tecnología de Alimentos (PECTA) de la Universidad Del Valle de Guatemala.

Figura 21. Sistema para el análisis de nitrógeno por el método de Kjeldahl (unidad de destilación)



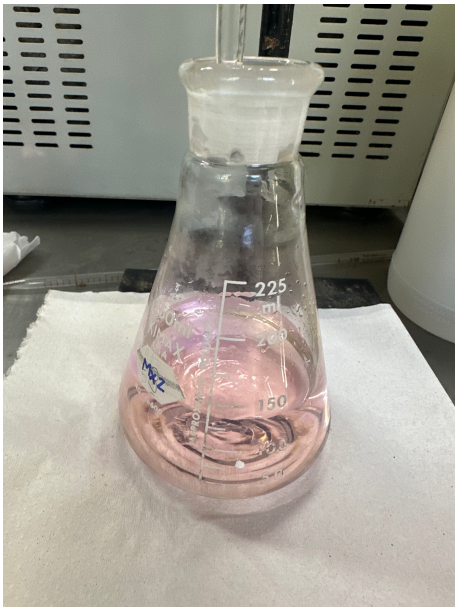
*Realizado en el Laboratorio del Programa en Ciencia y Tecnología de Alimentos (PECTA) de la Universidad Del Valle de Guatemala.

Figura 22. Ejemplo de coloración de la muestra de análisis previo a la titulación utilizando ácido clorhídrico para determinación de nitrógeno por el método de Kjeldahl



*Realizado en el Laboratorio del Programa en Ciencia y Tecnología de Alimentos (PECTA) de la Universidad Del Valle de Guatemala.

Figura 23. Ejemplo del viraje de color de la muestra de análisis luego de la titulación utilizando ácido clorhídrico para determinación de nitrógeno por el método de Kjeldahl



*Realizado en el Laboratorio del Programa en Ciencia y Tecnología de Alimentos (PECTA) de la Universidad Del Valle de Guatemala.

Figura 24. Viraje de color hacia "*baby pink*" de las muestras de análisis luego de ser tituladas para la determinación de nitrógeno por el método de Kjeldahl de materias primas



*Realizado en el Laboratorio del Programa en Ciencia y Tecnología de Alimentos (PECTA) de la Universidad Del Valle de Guatemala.

Figura 25. Viraje de color hacia "*baby pink*" de las muestras de análisis luego de ser tituladas para la determinación de nitrógeno por el método de Kjeldahl de productos finales de fertilizante orgánico sólido



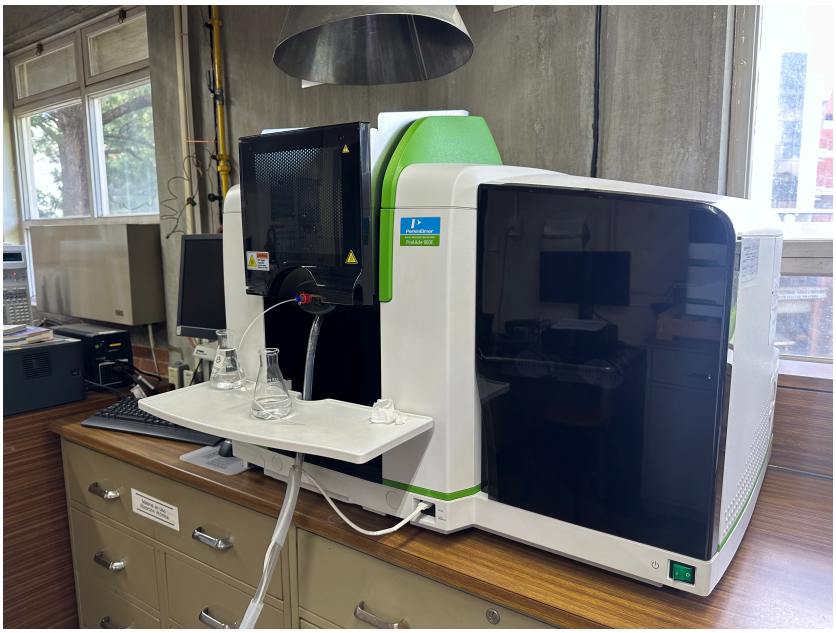
*Realizado en el Laboratorio del Programa en Ciencia y Tecnología de Alimentos (PECTA) de la Universidad Del Valle de Guatemala.

Figura 26. Soluciones preparadas para el análisis de minerales de los productos finales de fertilizante orgánico mediante espectroscopía de absorción atómica



*Realizado en el Laboratorio de Instrumentación Química Avanzada de la Universidad Del Valle de Guatemala.

Figura 27. Equipo de espectroscopía de absorción atómica para la cuantificación de minerales presentes en las muestras de análisis



*Realizado en el Laboratorio de Instrumentación Química Avanzada de la Universidad Del Valle de Guatemala.

Figura 28. Producto final de fertilizante orgánico (45 %)



*Realizado en el Laboratorio de Instrumentación Química Avanzada de la Universidad Del Valle de Guatemala.

Figura 29. Producto final de fertilizante orgánico (50 %)



*Realizado en el Laboratorio de Instrumentación Química Avanzada de la Universidad Del Valle de Guatemala.

Figura 30. Producto final de fertilizante orgánico (55 %)



*Realizado en el Laboratorio de Instrumentación Química Avanzada de la Universidad Del Valle de Guatemala.

Figura 31. Ejemplo de determinación de densidad de ceniza de bagazo de caña de azúcar y productos finales de fertilizante orgánico sólido



*Realizado en el Laboratorio de Instrumentación Química Avanzada de la Universidad Del Valle de Guatemala.

Figura 32. Cocina de inducción con horno eléctrico



*Equipo del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad Del Valle de Guatemala.

Figura 33. Medidor de luz para determinación de intensidad lumínica



*Equipo del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad Del Valle de Guatemala.

Figura 34. Balanza de humedad



*Equipo del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad Del Valle de Guatemala.

Figura 35. Ejemplo de visualización de resultados en la balanza de humedad



*Realizado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad Del Valle de Guatemala.

Figura 36. Balanza analítica



*Equipo del Laboratorio de Instrumentación Química Avanzada de la Universidad Del Valle de Guatemala.

Figura 37. Báscula de mesa



*Equipo del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad Del Valle de Guatemala.

H. GLOSARIO

Bagazo de caña de azúcar. Residuo del proceso de fabricación de azúcar a partir de la caña.

Ceniza de bagazo de caña de azúcar. Residuo agroindustrial sólido que resulta de la quema de bagazo en calderas para la cogeneración de energía.

Fertilizante orgánico. Producto que aporta nutrientes para las plantas y proceden de materiales carbonados de origen animal o vegetal.

Lux. Unidad de iluminancia del sistema internacional.

Macronutrientes. Elementos que se requieren en grandes cantidades para el desarrollo de la planta.

Metanización. Proceso biológico en el que se transforma la materia orgánica en biogás.

Micronutrientes. Elementos que se requieren en pequeñas cantidades para el desarrollo de la planta.

Vinaza. Subproducto líquido resultante de la producción de etanol en la destilación de mostos o melazas fermentados.