

Analysis of the Temporal and Geographical Influence of Sampling on the Physicochemical Properties of FORSU in Manabí, Ecuador.

Análisis de la Influencia Temporal y Geográfica del Muestreo sobre las Propiedades Fisicoquímicas de FORSU en Manabí, Ecuador.

N. Robles^{1,3} 0000-0002-6081-8213M. Herrera¹ 0000-0001-5624-7385D. Rivadeneira¹ 0000-0003-0295-1291W. Ponce² 0000-0002-4250-5184¹ Instituto de Investigación Geológico y Energético, Quito 170518, EcuadorE-mail: nilo.robles@geoenergia.gob.ec, daniel.rivadeneira@geoenergia.gob.ec,
michelle.herrera@geoenergia.gob.ec² Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias - Estación Experimental Portoviejo 130105, EcuadorE-mail: wilmer.ponce@iniap.gob.ec³ Alimentos, Compuestos Orgánicos, Materiales, Microbiología Aplicada y Energía (ACMME), Facultad de Ingeniería Química, Universidad Central del Ecuador, Quito 170129, Ecuador

Abstract

Population growth and societal development have significantly increased waste generation, whose accumulation in landfills causes environmental impacts and health risks for nearby populations. In this study, samples of the organic fraction of municipal solid waste (FORSU) were collected in five markets in different cantons of the province of Manabí, considering different time periods. Subsequently, physicochemical characterization was performed through proximal analysis and determination of the gross calorific value, complemented by statistical analysis to evaluate the influence of seasonality and geographical location on its properties. The results obtained allow criteria to be established to define the possible uses of FORSU and its potential for energy recovery through thermochemical conversion processes.

Resumen

El crecimiento demográfico y el desarrollo de la sociedad han incrementado de forma significativa la generación de residuos, cuya acumulación en vertederos ocasiona impactos ambientales y riesgos sanitarios para las poblaciones cercanas. En este estudio se recolectaron muestras de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) en cinco mercados de distintos cantones de la provincia de Manabí, considerando diferentes temporalidades. Posteriormente, se realizó la caracterización fisicoquímica mediante análisis proximal y determinación del poder calorífico superior, complementada con un análisis estadístico para evaluar la influencia de la temporalidad y la ubicación geográfica sobre sus propiedades. Los resultados obtenidos permiten establecer criterios para definir los posibles usos de la FORSU y su potencial de valorización energética a través de procesos de conversión termoquímica.

Index terms— Municipal solid waste, Physicochemical properties, Statistical analysis, Energy recovery, Thermochemical conversion.

Palabras clave— Residuos sólidos urbanos, Propiedades fisicoquímicas, Análisis estadístico, Valorización energética, Termoconversión.

Recibido: 03-12-2025, Aprobado tras revisión: 19-01-2026

Forma sugerida de citación: Robles, N.; Rivadeneira, D.; Herrera, M.; Ponce, W. (2026). "Análisis de la Influencia Temporal y Geográfica del Muestreo sobre las Propiedades Fisicoquímicas de FORSU en Manabí, Ecuador". Revista Técnica "energía". No. 22, Issue II, Pp. 146-155

ISSN On-line: 2602-8492 - ISSN Impreso: 1390-5074

Doi: <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v22.n2.2026.743>

© 2026 Autores



Esta publicación está bajo una licencia internacional Creative Commons Reconocimiento – No Comercial 4.0



1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional y urbano, junto con los hábitos de consumo y el desarrollo económico, se relacionan directamente con la creciente demanda de recursos y, en consecuencia, con la generación de residuos. Este fenómeno constituye un desafío global y una preocupación para las generaciones actuales y futuras.

En 2020 se reportaron 810 millones de toneladas de residuos sólidos urbanos (RSU) en el mundo, de los cuales el 38 % fueron vertidos, incinerados o acumulados a cielo abierto [1]. En 2016 se llevó a cabo la caracterización fisicoquímica que incluyó el análisis proximal y determinación del poder calorífico de la fracción bio-orgánica de RSU en dos vertederos de Indonesia. Los resultados reportaron un rango de humedad comprendido entre 9,13 y 12,23 %, un contenido de cenizas entre 10,44 y 17,31 %, un porcentaje de material volátil en el intervalo de 64,95 a 74,58 %, y un contenido de carbono fijo entre 14,74 y 19,47 %. Asimismo, el poder calorífico se situó entre 14,53 y 17,07 MJ kg⁻¹ [2]. No obstante, el hecho de que las muestras hayan sido recolectadas en vertederos genera una amplia variabilidad en los resultados, atribuida a la heterogeneidad y diversidad de las fuentes de emisión de estos residuos.

En otro estudio realizado en Saltillo, México por Silva R. et al. (2024), se caracterizó la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) proveniente de mercados de (CMW) donde se determinó que estaba compuesta en un 72,5 % por frutas y vegetales, mientras que el 27,5 % restante incluía carnes, huesos, lácteos y otros residuos orgánicos. A partir del análisis proximal de esta fracción se obtuvo un contenido de humedad del 89,92 %, mientras que el porcentaje de sólidos totales alcanzó el 10,08 %. De estos sólidos, el 84,45 % correspondió a material volátil y el 15,55 % a cenizas [3].

En Ecuador, para 2023, la generación promedio alcanzó 14.421,29 toneladas diarias de RSU, compuestos en un 55,3 % por residuos orgánicos y en un 44,7 % por inorgánicos [4]. En la región costa del país, el 32,1 % de los RSU son depositados en botaderos a cielo abierto, mientras que en la región sierra este valor apenas alcanza el 5,4 % [5]. Esta práctica produce contaminación de suelos, aguas y aire, afectando directamente a la salud de la población cercana [6]. Además, las condiciones climáticas de la costa ecuatoriana aceleran la descomposición de la materia orgánica y favorecen la emisión de lixiviados y metano, lo que incrementa los impactos ambientales [7]. A esto se suma el riesgo de proliferación de vectores y la posible transmisión de enfermedades al entrar en contacto con fuentes de agua [8].

En la región costera de Ecuador se encuentra Manabí, una provincia cuya actividad económica principal se centra en el sector agropecuario, ya que 1.052.342 ha de

su territorio están dispuestas para este fin [9], [10]. En el año 2020 se reportó la existencia de aproximadamente 130 centro de acopio activos [11] que abastecen a una población de 1.592.840 habitantes, lo que representa el 9,4 % de la población total del país [12].

En este estudio se utilizó FORSU de origen lignocelulósico, generada en mercados municipales. La biomasa lignocelulósica, definida como el residuo vegetal no destinado al consumo humano ni animal, se caracteriza por su elevado contenido de carbohidratos y por la presencia de componentes estructurales como celulosa, hemicelulosa y lignina [13]. Estas características junto con la alta disponibilidad de este residuo, le confieren un importante valor energético, lo que la posiciona como una materia prima adecuada para procesos de conversión termoquímica entre los que destacan la incineración, la gasificación y la pirólisis; los cuales se consideran alternativas sostenibles para la valorización energética de la FORSU [14]. A través de estas tecnologías es posible obtener bioproductos sólidos (biocarbón), líquidos (bioaceite) y gaseosos (syngas), que pueden emplearse como biocombustibles o en generación de energía, dependiendo de sus propiedades fisicoquímicas y de las condiciones de operación [15].

La elevada dependencia de los combustibles fósiles y el riesgo geopolítico asociado a sus principales proveedores resaltan la urgencia de promover fuentes de energía renovables que contribuyan a mitigar los efectos del cambio climático. Al mismo tiempo, estas alternativas permiten fortalecer la seguridad energética, entendida como el acceso ininterrumpido a fuentes de energía a precios asequibles y ambientalmente sostenibles [16]. En este contexto, adquiere especial importancia la llamada “transición energética verde”, orientada al reemplazo parcial o total de los combustibles fósiles por recursos renovables y sostenibles [17]. La integración de estas fuentes en la matriz energética no solo contribuye a reducir la exposición a la volatilidad de los mercados internacionales, sino que también impulsa la diversificación de materias primas y favorece la construcción de un modelo energético más sostenible y ambientalmente responsable.

La originalidad de este estudio radica en la caracterización de la FORSU y en la evaluación estadística del efecto de la temporalidad y la ubicación de muestreo sobre sus propiedades fisicoquímicas, con el fin de establecer criterios sólidos para la selección de biomasa y su aprovechamiento en la generación de bioproductos, optimizando así los rendimientos al aplicarla en distintos procesos. Estos resultados constituyen la base para definir criterios de representatividad de las muestras y orientar estrategias de valorización energética sostenible en la provincia de Manabí. En Ecuador, este tipo de investigaciones no se había desarrollado previamente, lo que ha limitado la disponibilidad de información de referencia y, en consecuencia, la proyección de aplicaciones de la



FORSU en el contexto nacional. Además, la falta de estudios sobre la influencia de la temporalidad y la ubicación geográfica en su composición y propiedades ha dificultado el diseño de estrategias de aprovechamiento ajustadas a las condiciones locales.

2. METODOLOGÍAS Y MÉTODOS

2.1 Muestreo y Pre-tratamiento

Las muestras fueron recolectadas durante el año 2024: F1 (24–28 de junio), F2 (26–30 de agosto), F3 (2–6 de septiembre) y F4 (9–13 de septiembre); salvo en los casos particulares en los que, por motivos de condiciones operativas de seguridad, no se pudo realizar el muestreo.

Se seleccionaron cinco mercados distribuidos en diferentes cantones de la provincia de Manabí, cuya descripción se presenta en la Tabla 1 y el mapa de su ubicación geográfica se muestra en la Fig. 1:

Tabla 1: Ubicación y Fechas de Muestreo

Cantón	Lugar	Ubicación	Fecha de muestreo
Manta*	Mercado Mayorista de Manta “El Madrugador”	S 0°57'06.3" W 80°42'19.7"	F2, F3 y F4
Sucre	Mercado Municipal de Bahía de Caráquez	S 0°36'08.7" W 80°25'32.5"	F1, F2, F3 y F4
Rocafuerte*	Mercado Central de Rocafuerte	S 0°55'07.3" W 80°26'56.6"	F2, F3 y F4
Jipijapa	Mercado Central de Jipijapa	S 1°20'52.2" W 80°34'46.1"	F1, F2, F3 y F4
Portoviejo*	Mercado Plaza Central de Portoviejo	S 1°03'24.7" W 80°27'28.9"	F2, F3 y F4

*Muestra recolectada en tres fechas por motivos de seguridad operativa.

El muestreo y la preparación de las muestras se realizaron siguiendo la norma NOM-AA-15-1985 [18]. Las muestras fueron Trituradas hasta alcanzar un tamaño de partícula inferior a 2 mm, secadas a 105 °C y trasladadas al Laboratorio de Biomasa del Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE), en Quito, para su análisis fisicoquímico. Posteriormente, se realizó la preparación de la muestra para el análisis composicional siguiendo una metodología basada en el procedimiento NREL/TP-510-42620 [19].



Figura 2: Recolección y Pre-tratamiento de FORSU

2.2 Caracterización

La FORSU recolectada fue caracterizada mediante análisis proximal y determinación del poder calorífico superior (PCS). Los ensayos se realizaron por triplicado para garantizar la reproducibilidad de los resultados, aplicando metodologías establecidas en normas internacionales: ISO 18134-2:2017 [20] para contenido de humedad (%H); UNE-EN ISO 18123 [21] para materia volátil (%MV); UNE-EN ISO 18122 [22] para cenizas (%CZ); carbono fijo (%CF) calculado por diferencia y UNE-EN ISO 18125 [23] para PCS.

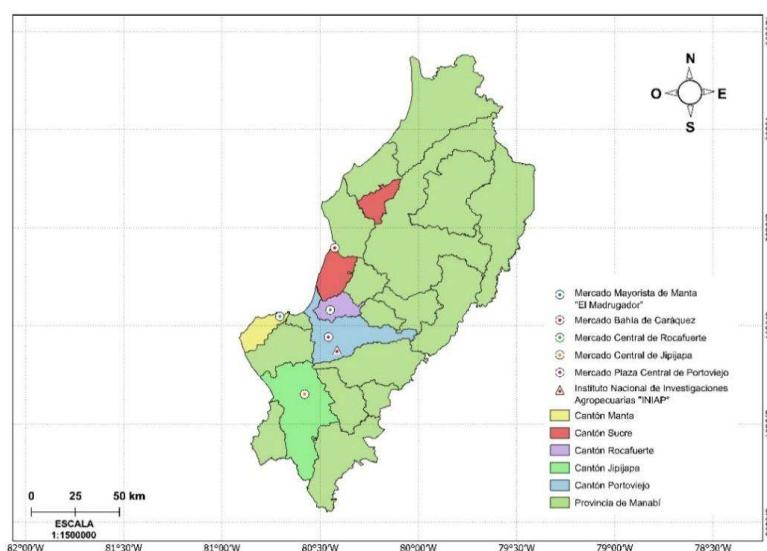


Figura 1: Lugares Geográficos de los Sitios de Muestreo



2.3 Análisis Estadístico

Se llevó a cabo un análisis estadístico de los resultados obtenidos en la caracterización fisicoquímica de las muestras, considerando las condiciones de muestreo descritas en la Tabla I. El procesamiento de los datos se realizó con el software estadístico Minitab, utilizando un nivel de confianza del 95 % ($\alpha = 0,05$).

El análisis se estructuró en dos etapas principales: (i) la evaluación del efecto de las diferencias en las fechas de muestreo sobre una misma muestra, y (ii) la comparación entre muestras provenientes de distintos orígenes.

En ambas etapas se aplicó la misma metodología:

En primer lugar, se utilizó la prueba de Anderson-Darling (AD) con el fin de determinar si los datos recolectados para cada variable continua (%H, %CZ, %MV, %CF y PCS) se ajustaban a una distribución normal. Para esta prueba se plantearon las siguientes hipótesis:

H_0 : Los datos presentan una distribución normal ($p > \alpha$).

H_1 : Los datos no presentan una distribución normal ($p < \alpha$).

La prueba estadística de AD se define como:

$$A^2 = -n - S \quad (1)$$

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{(2i-1)}{n} [\ln F(Y_i) + \ln(1 - F(Y_{n+1-i}))] \quad (2)$$

Donde n es el tamaño de la muestra

Y_i son los puntos de datos ordenados

$F(Y_i)$ es la función de distribución acumulativa de la distribución hipotética evaluada en Y_i [24].

Posteriormente, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de confianza del 95 % ($\alpha = 0,05$), con el objetivo de evaluar las diferencias entre medias entre más de dos grupos de comparación. El procedimiento se basó en el estadístico F de Fisher como criterio de decisión, bajo los supuestos de normalidad en las poblaciones analizadas y homogeneidad de varianzas (σ^2) [25].

Para este análisis se consideraron los siguientes aspectos en cada etapa:

2.3.1 Efecto de la temporalidad de muestreo

Número de muestras: 5 provenientes de distintos mercados.

Fechas de muestreo: F1, F2, F3 y F4 en los mercados de Sucre y Jipijapa ($F_c = 3,86$); F2, F3 y F4 en los mercados de Manta, Rocafuerte y Portoviejo ($F_c = 4,74$).

2.3.2 Efecto del origen de la muestra

Número de muestras: 5 correspondientes a distintos mercados.

Fechas de muestreo: 3 diferentes períodos ($F_c = 3,36$).

En ambos casos, las hipótesis planteadas fueron las siguientes [26]:

H_0 : Las medias son iguales $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$ ($F < F_c$).

H_1 : Al menos una de las medias es distinta $\mu \neq \mu_n$ ($F > F_c$).

El cálculo del ANOVA se desarrolla de la siguiente manera:

En primer lugar, se determinan los grados de libertad (GL) para cada componente del modelo:

$$\text{Factor GL} = r - 1 \quad (3)$$

$$\text{Error GL} = n_T - r \quad (4)$$

$$\text{Total} = n_T - 1 \quad (5)$$

Donde n_T es el número total de observaciones

r es el número de niveles del factor

A continuación, se obtiene la desviación media del nivel de factor estimado alrededor de la media general (Factor SC):

$$\text{Factor SC} = \sum n_i (\bar{Y}_i - \bar{Y}_{..})^2 \quad (6)$$

Donde n_i es el número de observaciones de cada muestra

\bar{Y}_i es la media de observaciones en el $i^{\text{ésimo}}$ nivel del factor

$\bar{Y}_{..}$ es la media de todas las observaciones

Seguidamente, se verifica si el Factor SC es lo suficientemente grande como para rechazar la hipótesis nula, comparándola con la suma de los cuadrados del error o residuos (Error SC):

$$\text{Error SC} = \sum_i \sum_j (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2 \quad (7)$$

Donde Y_{ij} es el valor de la $j^{\text{ésima}}$ observación al $i^{\text{ésimo}}$ nivel del factor.

Además, se calcula la variación total de los datos (SC Total):

$$\text{SC Total} = \sum_i \sum_j (Y_{ij} - \bar{Y}_{..})^2 \quad (8)$$

A continuación, se calcula el cuadrado medio (CM) del factor (Factor CM) y el cuadrado medio del error (Error CM):

$$\text{Factor CM} = \frac{\text{Factor SC}}{\text{Factor GL}} \quad (9)$$



$$\text{Error CM} = \frac{\text{Error SC}}{\text{Error GL}} \quad (10)$$

Finalmente, el estadístico F de prueba se determina como se indica en la ecuación 11:

$$F = \frac{\text{Factor CM}}{\text{Error CM}} \quad (11)$$

En los casos en que el ANOVA resultó en el rechazo de la hipótesis nula, se aplicó el método de la Diferencia Mínima Significativa (LSD de Fisher) con el propósito de comparar las medias adyacentes de una matriz previamente ordenada de mayor a menor valor [27]. En este procedimiento, se utilizó la notación con letras (ABC) para las muestras con tres fechas de muestreo y (ABCD) para aquellas con cuatro fechas. La ausencia de una misma letra entre grupos indica que las medias presentan diferencias significativas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1.1 Caracterización

Tabla 2: Resultados del Análisis Proximal de las Muestras

Muestras	%H	%CZ	%MV	%CF	PCS, MJ kg ⁻¹
Manta	1,75± 0,77	14,38± 1,49	68,88± 2,39	15,00± 2,27	16,55± 0,15
Sucre	3,02± 2,06	17,17± 2,96	67,29± 1,88	12,51± 2,42	16,46± 1,20
Rocafuerte	1,55± 1,20	10,25± 0,56	72,95± 0,81	15,24± 1,33	17,09± 0,75
Jipijapa	1,81± 0,59	14,40± 3,14	68,29± 2,32	15,50± 1,83	16,02± 0,66
Portoviejo	2,68± 0,77	13,75± 1,59	70,39± 2,64	13,18± 1,35	16,41± 1,72

En la Tabla 2 se presentan los resultados del análisis proximal y el contenido de poder calorífico superior de las muestras, expresados como la media y la desviación estándar calculadas como promedio de los ensayos realizados. De estos resultados se destaca que, para todas las muestras, el contenido de materia volátil se ubicó en el rango de 67,29 a 72,95 %. Este valor es comparable con lo reportado por [28] para muestras de frutas y vegetales (F&V), cuyo resultado fue de 62,50 %.

En cuanto al contenido energético, expresado como poder calorífico superior (PCS), los valores registrados para las distintas muestras y temporalidades oscilaron entre $16,02 \pm 0,66$ y $17,09 \pm 0,75$ MJ kg⁻¹. Estos resultados coinciden con los valores reportados por [2] para muestras orgánicas procedentes de vertederos. Asimismo, los valores de PCS de la FORSU son comparables con los obtenidos por [29] en maderas

duras, lo que respalda su viabilidad como combustible sólido en un proceso de incineración.

3.1.2 Análisis estadístico

• Efecto de la temporalidad de muestreo

En la Tabla 3 se presentan los valores de *p* mínimos y máximos obtenidos para cada variable continua en las diferentes fechas y lugares de muestreo:

Tabla 3: Resultados de Valores *P* para el Supuesto de Normalidad

Cantón	%CZ	%MV	%CF	PCS
Manta	0,256- 0,419	0,124- 0,502	0,153- 0,495	0,112- 0,251
Sucre	0,103- 0,524	0,079- 0,406	0,091- 0,630	0,073- 0,565
Rocafuerte	0,074- 0,620	0,407- 0,592	0,121- 0,417	0,076- 0,591
Jipijapa	0,119- 0,600	0,069- 0,630	0,063- 0,622	0,180- 0,489
Portoviejo	0,483- 0,626	0,083- 0,587	0,270- 0,547	0,305- 0,610

Los resultados obtenidos de la prueba de Anderson-Darling (AD), indican que en todos los casos los valores de *p* fueron superiores a ($\alpha = 0,05$), por lo que se aceptó la hipótesis nula, confirmando que las muestras siguen una distribución normal.

De acuerdo con Zhang W. y Qi Y. (2024), el análisis de varianza (ANOVA) constituye una de las herramientas estadísticas más empleadas en las ciencias experimentales para determinar la existencia de diferencias significativas entre tratamientos y factores [30]. En este estudio, la aplicación de ANOVA permitió evaluar la influencia de las diferentes fechas de muestreo sobre las propiedades fisicoquímicas de la FORSU; los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4:

Tabla 4: Resultados de Valores *F* para la Comparación de Medias entre Fechas de Muestreo

Cantón	%CZ	%MV	%CF	PCS
Manta	109,83 ABC	7,82 AB	5,48 AB	8,12 AB
Sucre	286,84 ABCD	51,57 ABC	55,90 ABCD	719,25 ABC
Rocafuerte	16,65 AB	4,48* AB	8,87 AB	66,11 ABC
Jipijapa	204,24 ABC	7,62 AB	3,21* AB	43,58 ABC
Portoviejo	55,00 ABC	7,77 AB	0,52* A	630,25 ABC

*Muestras en las que se comprueba H₀.



Los valores de F experimentales obtenidos para las diferentes temporalidades superaron el valor crítico de F en todos los casos, lo que indica diferencias significativas al comparar los muestreos en distintas fechas. Sin embargo, se identificaron excepciones: en la muestra de Rocafuerte, el contenido de materia volátil presentó un valor de F de 4,48; mientras que en los cantones de Jipijapa y Portoviejo, los valores de F para el contenido de carbono fijo fueron de 3,21 y 0,52; respectivamente. Estos resultados muestran que, en dichos casos, las medias no evidencian diferencias significativas, de acuerdo con los resultados de la prueba LSD de Fisher, donde para cada muestra y variable de respuesta se establecieron grupos de medias ordenadas de mayor a menor para las distintas fechas, siendo ‘A’ la media más alta; y se demostró que la diferencia entre sus medias no es estadísticamente significativa cuando los grupos comparten letra.

- Efecto del origen de la muestra**

En la etapa de comparación entre muestras provenientes de distintos orígenes, independientemente de las fechas de muestreo, se aplicó la prueba de Anderson-Darling (AD). Los valores de p obtenidos se presentan en la Tabla 5:

Tabla 5: Resultados de Valores P para el Supuesto de Normalidad

Cantón	%CZ	%MV	%CF	PCS
Manta	0,406	0,300	0,161	0,620
Sucre	0,844	0,484	0,692	0,149
Rocafuerte	0,533	0,555	0,608	0,322
Jipijapa	0,027*	0,024*	0,191	0,506
Portoviejo	0,624	0,060	0,314	0,399

*Valores en los que se comprueba la H_1 .

Los resultados muestran que, en la mayoría de los casos, los valores de p fueron superiores a 0,05; por lo que se aceptó la hipótesis nula, confirmando que los datos cumplen con el supuesto de normalidad. La excepción se encontró en la muestra del mercado de Jipijapa, donde no se verificó normalidad en las variables %CZ y %MV.

Ante esta situación, se analizaron de manera paralela los datos de caracterización correspondientes a dicha muestra con el fin de identificar la causa de esta desviación. En la Tabla 6 se presentan los valores obtenidos:

Tabla 6: Resultados de %CZ y %MV para la Muestra del Cantón Jipijapa

Fecha de muestreo	Muestra: Mercado Central de Jipijapa		
	%CZ ± sd	% MV ± sd	% CF ± sd
F1	15,73 ± 0,48	67,22 ± 0,17	14,29±0,44
F2	16,52 ± 0,57	67,41 ± 0,59	14,78±0,23
F3	16,08 ± 0,34	66,94 ± 0,63	15,28±0,63
F4	9,25 ± 0,16	71,59 ± 2,63	17,67±2,78

Los resultados evidencian una alta variabilidad, atribuida a que en la temporalidad F4 la muestra estuvo compuesta en un 90 % por residuos de frutas. Este predominio de un solo tipo de residuo explica las diferencias marcadas observadas en los parámetros de caracterización del Mercado Central de Jipijapa. Por esta razón, para continuar con el análisis ANOVA se decidió excluir los datos de F4 en las muestras de Jipijapa y Sucre, con el fin de garantizar el cumplimiento del supuesto de igualdad en el número de muestreos entre mercados ($n=3$).

Con esta consideración, se verificó que las muestras cumplen el supuesto de normalidad y se procedió con el análisis de varianza (ANOVA), cuyos resultados se presentan en la Tabla 7:

Tabla 7: Resultados de Valores f para la Comparación de Medias entre Lugares de Muestreo

%CZ	%MV	%CF	PCS
9,92 ABC	6,98 ABC	3,52 AB	0,87* A

*Muestras en las que se comprueba H_0 .

El análisis evidenció que existen diferencias estadísticamente significativas en tres de los parámetros evaluados entre los distintos puntos de muestreo. En la Fig. 3 se presentan los diagramas de caja y bigotes correspondientes a las variables analizadas en cada ubicación. Los resultados muestran que no se registraron diferencias significativas en las medias de los valores de PCS; sin embargo, en el caso de %CZ, %MV y %CF sí se identificaron diferencias notables entre cantones. Específicamente, las muestras de Sucre, Jipijapa y Manta presentaron los mayores valores de cenizas, mientras que Rocafuerte y Portoviejo destacaron por su mayor contenido de materia volátil.

Estos hallazgos confirman que el origen de la FORSU influye directamente en su composición fisicoquímica y, por tanto, debe ser considerado como un criterio clave en la selección de la biomasa para procesos de valorización, ya que de ello depende la eficiencia y la viabilidad del tratamiento aplicado.

3.1.3 Posibles procesos de valorización de FORSU

La caracterización fisicoquímica de las muestras (Tabla II) permite identificar los procesos termoquímicos más adecuados para el aprovechamiento energético de la FORSU. En promedio, las muestras presentaron un poder calorífico superior (PCS) de $16,51 \pm 0,90 \text{ MJ kg}^{-1}$. Entre los mercados analizados, la muestra proveniente del cantón Rocafuerte registró el valor más alto, con $17,09 \pm 0,75 \text{ MJ kg}^{-1}$ lo que la posiciona como una fuente energética comparable con biomasas lignocelulósicas comúnmente aprovechadas, como la cáscara de arroz ($15,84 \text{ MJ kg}^{-1}$), la hierba de elefantes ($17,50 \text{ MJ kg}^{-1}$) y la paja de maíz ($17,62 \text{ MJ kg}^{-1}$) [31]:

- **Pirólisis**

La pirólisis es un proceso termoquímico de descomposición térmica de la biomasa en ausencia de oxígeno [32], mediante el cual se obtienen principalmente biocarbón, bioaceite y gases volátiles. Según las condiciones de operación, se clasifica en pirólisis lenta (t: 5–30 min; T: 400–500 °C), rápida (t: 0,5–2 s; T: 400–650 °C) y flash (t: <0,5 s; T: 700–1000 °C) [33]. En un estudio realizado por Elhenawy et al. (2024), residuos de madera con 12,68 % de carbono fijo

y 80,87 % de materia volátil permitieron obtener entre 22–40 % de biocarbón [34]. Considerando que la FORSU analizada en este trabajo presentó valores medios de carbono fijo ($14,29 \pm 1,84 \%$) y materia volátil ($69,56 \pm 2,01 \%$) cercanos a los reportados, se infiere que podría ser utilizada como materia prima viable para procesos de pirólisis, especialmente por su alta disponibilidad en los mercados locales. En particular, la muestra procedente del cantón Jipijapa, con su elevado %CF ($15,50 \pm 1,83 \%$) y moderado %MV ($68,29 \pm 2,32 \%$), se perfila como la más adecuada para la producción de biocarbón, lo que contribuiría a estrategias sostenibles de valorización energética y captura de carbono.

- **Incineración**

La incineración, o combustión, consiste en la oxidación de la biomasa en una atmósfera rica en oxígeno para la generación de calor [33]. El contenido de cenizas es un indicador clave de la calidad del combustible, ya que su exceso puede provocar escoriación y corrosión en los equipos. En este estudio, La muestra de Rocafuerte, que presentó el menor contenido de cenizas ($10,25 \pm 0,56 \%$) y el mayor PCS, lo que la convierte en la muestra más prometedora como combustible sólido para combustión directa. Los valores del contenido de cenizas de las

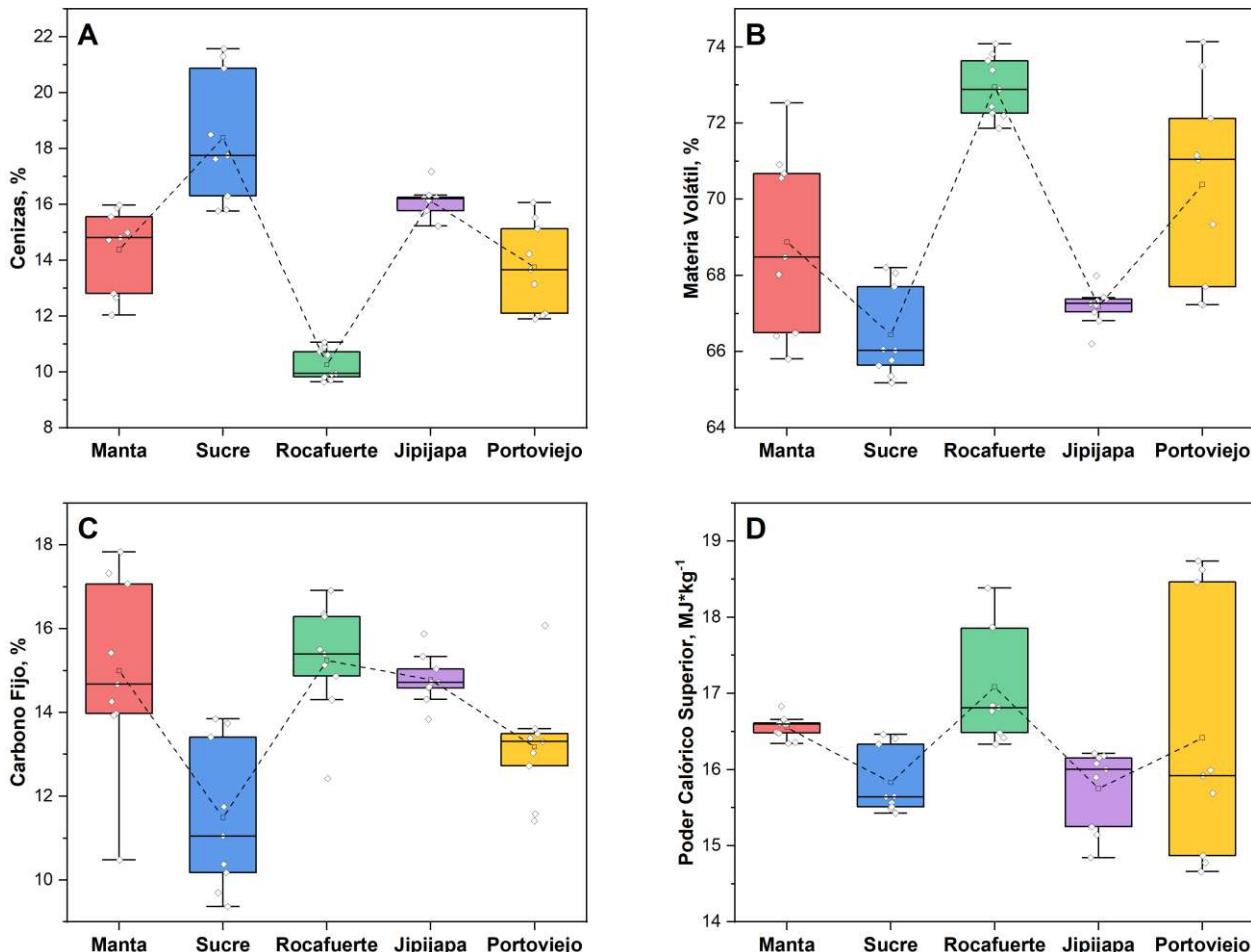


Figura 3: Diagramas de Caja y Bigotes para el Estudio de la Influencia de la Ubicación de la Muestra A) %CZ; B) %MV; C) %CF y D) PCS.

muestras son comparables con los de biomasas acuáticas (11,93–20,1 %) y residuos agroindustriales (3,38–17 %) [35], y dadas las cantidades generadas en los mercados de Manabí, la FORSU puede tener aplicaciones a pequeña escala (cocción de alimentos o calefacción) y, en escenarios industriales, como combustible en calderas para generación de energía.

• **Gasificación**

La gasificación es un proceso de conversión termoquímica que consiste en la oxidación parcial de la biomasa a temperaturas comprendidas entre 800 y 1400 °C, mediante la cual el material sólido se transforma en un gas de síntesis (syngas). Este producto está constituido principalmente por hidrógeno (H_2) y monóxido de carbono (CO), junto con menores proporciones de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y otros compuestos trazas, cuya composición depende de las condiciones de operación y de las características de la biomasa empleada. [36]. Durante el proceso, ocurren simultáneamente la pirólisis y la oxidación parcial, favoreciendo la generación de un gas con alto valor energético. De acuerdo con estudios previos, un mayor %MV se asocia con un menor %CF, relación que respalda que la muestra proveniente de Rocafuerte sea la más adecuada para este proceso, debido a su elevado %MV y bajo %CZ [37]. En consecuencia, se espera que esta biomasa genere un syngas con baja fracción de H_2 , alta concentración de CO y un poder calorífico considerable, lo que lo convierte en un insumo prometedor para aplicaciones energéticas sostenibles

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demuestran que tanto la temporalidad como el origen de muestreo influyen significativamente en las propiedades fisicoquímicas de la FORSU. Este hallazgo evidencia, por un lado, diferencias asociadas a los hábitos de consumo de los habitantes de los cantones analizados y, por otro, el efecto de la estacionalidad en la composición de los residuos generados en los mercados locales.

El poder calorífico superior (PCS) de las muestras evaluadas resultó comparable al de residuos agroindustriales como la cáscara de arroz o la paja de maíz. Sin embargo, a diferencia de estos, la FORSU presenta la ventaja de una disponibilidad constante debido a su continua generación, lo que la posiciona como una alternativa viable para su aprovechamiento energético.

La selección de la FORSU como materia prima debe orientarse según la aplicación específica y las condiciones de operación de los procesos de conversión termoquímica, a fin de maximizar la eficiencia en la producción de bioproductos o energía. En este sentido, el presente estudio establece un precedente en Ecuador, aportando información de base para el diseño de

estrategias de valorización sostenible de la FORSU, con el objetivo de potenciar su contribución como fuente renovable dentro de la matriz energética nacional.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto de Investigación geológico y Energético (IIGE) y la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID), por el financiamiento del presente trabajo.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Z. Lenkiewicz, “Global Waste Management Outlook 2024 - Beyond an age of waste: Turning rubbish into a resource,” United Nations Environ. Program., Feb. 2024, doi: 10.59117/20.500.11822/44939.
- [2] M. Gunamantha, “Prediction of Higher Heating Value Bioorganic Fraction of Municipal Solid Waste from Proximate Analysis Data,” Int. J. Eng. Res. Technol., vol. 5, no. 2, pp. 442–447, 2016, [Online]. Available: <http://www.ijert.org>
- [3] D. Martínez, L. Díaz, O. Aguilar, and S. Hernández, “Characterization of municipal solid waste with the perspective of biofuels and bioproducts recovery in Northeast Mexico,” J. Mater. Cycles Waste Manag., vol. 26, no. 6, pp. 3665–3680, Nov. 2024, doi: 10.1007/s10163-024-02069-4.
- [4] Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), “Estadística de Información Ambiental Económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales Gestión de Residuos Sólidos 2023,” 2024. [Online]. Available: https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Municipios/2023/Residuos_Solidos/Presentacion_GRS_2023.pdf
- [5] Instituto de Gobernanza del Parlamento Andino, “Diagnóstico: Situación actual de la gestión de Residuos domiciliarios sólidos en la República del Ecuador y sus principales ciudades: Guayaquil, Quito y Cuenca,” 2024. [Online]. Available: <https://lametro.edu.ec/wp-content/uploads/2024/07/GESTION-DE-RESIDUOS-DIAGNOSTICO-3.pdf>
- [6] I. Cruz, I. Campuzano, and J. Camino, “El impacto ambiental que ocasiona el basurero a cielo abierto en el recinto La Hernestina del cantón Montalvo,” Uniandes EPISTEME, vol. 7, no. Especial, pp. 643–654, 2020.
- [7] G. Kiss and G. Aguilar, “Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final,” Gac. Ecológica, vol. 79, pp. 39–51, 2006, [Online]. Available: <http://estudiosterritoriales.org/resumen.oa?id=5390>



- 7903
- [8] E. Escalona, “Daños a la salud por mala disposición de residuos sólidos y líquidos en Dili, Timor Leste,” Rev. Cubana Hig. Epidemiol., vol. 52, no. 2, pp. 270–277, 2014.
- [9] Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), “Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua, ESPAC 2023,” 2024. [Online]. Available: https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/inec/Estadisticas_agropecuarias/espac/2023/Principales_resultados_ESPAC_2023.pdf
- [10] D. L. Mantuano Garcia and J. C. Luque Vera, “Sector agropecuario y su aporte en el crecimiento económico de la provincia de Manabí – Ecuador,” Ciencias Soc. y Económicas, vol. 9, no. 1, pp. 115–128, 2025, doi: 10.18779/csye.v9i1.928.
- [11] Prefectura de Manabí, “Actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial Manabí 2030,” 2022. [Online]. Available: https://www.manabi.gob.ec/wp-content/uploads/2021/09/I_PDOT_Manabi_2030_compressed.pdf#page=175&zoom=100,109,926
- [12] Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), “Resultados Nacionales Definitivos Censo 2022,” 2024.
- [13] E. of S. Technologies, “Lignocellulosic Biomass.” [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com.translate.goog/topics/engineering/lignocellulosic-biomass?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc
- [14] L. Rodríguez, I. López, V. Ocaña, and R. Pérez, “Tendencias de investigación y desarrollo . Biomass thermo-conversion by pyrolysis . Trends in research and development .,” Cent. Azúcar, vol. 39, no. 1, pp. 27–32, 2012.
- [15] M. Fernández, J. Rodrigo, and M. Rodrigo, “Alternativas de valorización y eliminación de residuos sólidos urbanos,” Industriambiente, no. December 2014, 2014, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/303664152_Alternativas_de_valorizacion_y_eliminacion_de_residuos_solidos_urbanos/related
- [16] J. Kim, F. Jaumotte, A. J. Panton, and G. Schwerhoff, “Energy security and the green transition,” Energy Policy, vol. 198, p. 114409, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.enpol.2024.114409.
- [17] A. Vilches, J. C. Toscano, D. Gill, and Ó. Macías, “La Transición Energética. Una Nueva Cultura de la Energía,” OEI. ISBN 978-84-7666-213-7, no. January, 2014, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/302412294_La_Transicion_Energetica_Una_Nueva_Cultura_de_la_Energia
- [18] Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (SECOFI), “Norma Mexicana NMX-AA-015-1985. Protección al Ambiente - Contaminación del Suelo - Residuos Sólidos Municipales - Muestreo - Método de Cuarteo. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial,” 1985.
- [19] B. Hames, R. Ruiz, C. Scarlata, A. Sluiter, J. Sluiter, and D. Templeton, “Preparation of Samples for Compositional Analysis: Laboratory Analytical Procedure (LAP); Issue Date 08/08/2008,” no. August, 2008.
- [20] ISO/TC 238, Norma ISO 18134-2:2017 “Solid biofuels — Determination of moisture content — Oven dry methodPart 2: Total moisture — Simplified method,” 2nd ed. 2017. [Online]. Available: https://www.iso.org/translate.goog/standard/71536.html?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc
- [21] ISO/TC 238, Norma UNE-EN ISO 18123 “Solid biofuels — Determination of volatile matter,” 2nd ed. 2023. [Online]. Available: <https://www.iso.org/es/contents/data/standard/08/31/83192.html?browse=tc>
- [22] ISO/TC 238, Norma ISO 18122:2015 “Solid biofuels — Determination of ash content,” 1st ed. 2015. [Online]. Available: <https://www.iso.org/es/contents/data/standard/06/15/61515.html>
- [23] ISO/TC 238, Norma ISO 18125:2017 “Solid biofuels — Determination of calorific value,” 1st ed. 2017. [Online]. Available: https://www.iso.org/translate.goog/standard/61517.html?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc
- [24] SixSigma, “A Complete Guide to the Anderson-Darling Normality Test.” [Online]. Available: <https://www.6sigma.us/six-sigma-in-focus/anderson-darling-normality-test/>
- [25] W. Navidi, Statistics for Engineers and Scientists. Colorado, EEUU: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2006.
- [26] Soporte de Minitab, “Métodos y fórmulas para el análisis de varianza en ANOVA de un solo factor.” [Online]. Available: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/help-and-how-to/statistical-modeling/anova/how-to/one-way-anova/methods-and-formulas/analysis-of-variance/>
- [27] K. Moore, R. Mowers, M. L. Harbur, L. Merrick, and A. Assibi, “Mean Comparisons,” in Quantitative Methods for Plant Breeding, 2023, ch. 10. [Online]. Available: <https://iastate-pressbooks-pub.translate.goog/quantitativeplantbreeding/chapter-10/mean-comparisons/>



- r/mean-comparisons/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc
- [28] M. I. Awad, Y. Makkawi, and N. M. Hassan, "Yield and Energy Modeling for Biochar and Bio-Oil Using Pyrolysis Temperature and Biomass Constituents," ACS Omega, vol. 9, no. 16, pp. 18654–18667, Apr. 2024, doi: 10.1021/acsomega.4c01646.
- [29] B. Esteves, U. Sen, and H. Pereira, "Influence of Chemical Composition on Heating Value of Biomass: A Review and Bibliometric Analysis," Energies, vol. 16, no. 10, p. 4226, May 2023, doi: 10.3390/en16104226.
- [30] W. Zhang and Y. Qi, "ANOVA-nSTAT: ANOVA methodology and computational tools in the paradigm of new statistics," vol. 14, pp. 48–67, Mar. 2024.
- [31] D. J. Horst, J. J. Ramírez Behainne, P. P. de Andrade Júnior, and J. L. Kovaleski, "An experimental comparison of lignin yield from the Klason and Willstatter extraction methods," Energy Sustain. Dev., vol. 23, pp. 78–84, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.esd.2014.07.005.
- [32] A. G. Jardón-Medina and A. Ortiz-Fernández, "Obtención y caracterización de biocarbón a partir de Eichhornia crassipes usando un prototipo de reactor de pirólisis solar," Rev. Ciencias Ambient., vol. 57, no. 1, pp. 1–23, Dec. 2022, doi: 10.15359/rca.57-1.13.
- [33] College of Earth and Mineral Sciences. The Pennsylvania State University, "Lesson 4: Biomass Pyrolysis and Pretreatment Overview," EGEE 439: Alternative Fuels from Biomass. [Online]. Available: <https://courses.ems.psu.edu/egee439/node/525>
- [34] Y. Elhenawy et al., "Experimental analysis and numerical simulation of biomass pyrolysis," J. Therm. Anal. Calorim., vol. 149, no. 19, pp. 10369–10383, 2024, doi: 10.1007/s10973-024-12987-y.
- [35] L. F. Pintor-ibarra and F. D. Mendez, "Capítulo 5: Caracterización proximal de los biocombustibles sólidos," no. April 2024, 2023.
- [36] S. Gundekari, J. Mitra, and M. Varkolu, "Classification, characterization, and properties of edible and non-edible biomass feedstocks," in Advanced Functional Solid Catalysts for Biomass Valorization, Elsevier, 2020, pp. 89–120. doi: 10.1016/B978-0-12-820236-4.00004-0.
- [37] Y. Gao et al., "Syngas Production from Biomass Gasification: Influences of Feedstock Properties, Reactor Type, and Reaction Parameters," ACS Omega, vol. 8, no. 35, pp. 31620–31631, Sep. 2023, doi: 10.1021/acsomega.3c03050.



Nilo M. Robles Carrillo.- Nació en Loja en 1991. Recibió su título de Ingeniero Químico de la Universidad Central del Ecuador (UCE) en 2020. Sus campos de investigación están relacionados con aprovechamiento integral de biomasa y energía.



Daniel A. Rivadeneira Rivera.- Nació en Quito en 1987. Recibió su título de Ingeniero Mecánico de la Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE) en 2014. Master en Dirección y Gestión de Proyectos por la Universidad Benito Juárez G en 2023, Master en Ingeniería Energética por la Universidad de Oviedo-España en 2025. Actualmente se encuentra cursando sus estudios de Doctorado en la Universidad de Alcalá, en Tecnologías de la Información y Comunicación enfocadas a la Eficiencia Energética en la Industria.



Michelle E. Herrera Balseca.- Nació en Quito en 1995. Recibió su título de Ingeniera Química de la Universidad Central del Ecuador (UCE) en 2022. Sus áreas de investigación incluyen la síntesis orgánica y la valorización de biomasa orientada a procesos de remediación ambiental.



Wilmer Ponce. - Nació en Manabí en 1984. Recibió su título de Ingeniero Químico de la Universidad Técnica de Manabí en 2011. Magister en Ingeniería Agrícola por la Universidad Técnica de Manabí.