

Poder calorífico de la fracción orgánica biodegradable de los residuos sólidos urbanos generados en el sector sur de la ciudad de Quito

Calorific Power of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste Generated in the South of Quito city

Luis Clavijo-Ayala^{a, b*}, Walter Pillajo^{a*}

RESUMEN

Se determinó el poder calorífico de la fracción orgánica biodegradable de los residuos sólidos urbanos (FOBR-SU) generados en el sector sur de la ciudad de Quito, una zona representada en las subzonas residenciales de estrato socioeconómico medio, medio-bajo, bajo y en la zona de mercados y ferias, con el fin de hallar una diferente alternativa de disposición final mediante incineración. Los puntos de muestreo se obtuvieron con un análisis estadístico que determinó la necesidad de muestrear 21 puntos en las subzonas residenciales, igualmente se decidió muestrear los 5 mercados más grandes y representativos del sector. Se realizó un trabajo de campo para determinar los mayores porcentajes de orgánicos biodegradables. Se determinó el poder calorífico a través del método de análisis próximos y bomba calorimétrica. Se estimó que el porcentaje de reducción de volumen de los residuos que llegarán al relleno sanitario "El Inga" es 95,82%. Asimismo, la vida útil del relleno se alargaría en 4,9 años si se emplea la idea propuesta. La generación de energía mediante incineración de los FOBRSU requiere de una fuerte inversión inicial pero también generaría importantes beneficios para el municipio y abastecería de energía a 19.806 hogares.

PALABRAS CLAVE: residuos urbanos; estratos socioeconómicos; muestreo; incineración; disposición final.

ABSTRACT

We determine the calorific value generated from biodegradable organic fraction of municipal solid waste (BOFMSW) located in the south region of the city of Quito. The region is comprised of residential sub-zones of medium, medium-low, and low socioeconomic strata, as well as local produce markets. We aim to find an alternative to the ultimate disposal of waste by controlled incineration. The sampling points were determined by performing a statistical analysis and revealed the need to sample 21 points within the residential sub-zones. Following the same process, it was decided to sample 5 of the major local produce markets. Field work was carried out to determine the highest percentages of organic biodegradable waste. Calorific value was determined by using the Nearby Analysis method and the use of a calorimeter. It was estimated that the volume for waste disposal at sanitary landfill "El Inga" can see a 95.82% reduction. It was also estimated that, should this proposal be implemented, the utility lifespan of the landfill could increase by 4.9 years. Producing energy through controlled incineration of BOFMSW requires a high initial investment however it would bring substantial revenue to the municipality and provide of power for up to 19,806 homes.

KEY WORDS: urban waste; socioeconomic strata; sampling; incineration; final disposal.

a Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental. Quito, Ecuador. ORCID Clavijo-Ayala, L.: <https://orcid.org/0000-0003-3899-5827>; ORCID Pillajo, W.: <https://orcid.org/0000-0001-8272-5280>

b Autor de correspondencia: lclavijog3@hotmail.com

* El artículo derivado de la tesis de los autores, titulada "Evaluación del poder calorífico de los residuos sólidos urbanos biodegradables generados en la zona residencial mercados y ferias del sector sur de la ciudad de Quito".

Introducción

La generación de residuos por parte del hombre se remonta a sus inicios en la tierra al hacer uso de los diversos recursos de la naturaleza; sin embargo, en ese entonces, estos residuos no representaban problema debido a su escasa tasa de generación y su alta biodegradabilidad, puesto que los hábitos alimenticios eran netamente naturales, como la caza, pesca y cosecha de frutos silvestres (ONU Medio Ambiente, 2018). Según Arroyo et al. (2018), el acelerado proceso de urbanización, la constante y creciente industrialización, la generación de sofisticados servicios y el incremento constante de bienes consumibles, son algunas características del actual modelo social y económico que deriva en el aumento de la contaminación ambiental, la cual incluye la incorrecta e incompleta gestión de los residuos.

Se conoce, a partir de la experimentación en varios países del mundo, que en un sistema de incineración perfeccionado se pueden procesar residuos domésticos, así como residuos industriales orgánicos. La energía producida por esta incineración se puede emplear de varias maneras como la calefacción y la generación de electricidad (Blanco et al., 2017).

Para que el proceso sea rentable, las plantas incineradoras deben contar con grandes cantidades de residuos, así como con estrictos estándares de emisión de gases atmosféricos. Al procesar grandes cantidades de residuos es posible reducir el volumen de los residuos que llegan a los rellenos sanitarios dando valor agregado a esta actividad (ICEX España, 2019).

El problema en la ciudad de Quito-Ecuador, radica en la búsqueda de un nuevo sitio de disposición final para los residuos sólidos de la ciudad, un tema de grandes incertidumbres, porque ninguna comunidad quiere vivir cerca de este tipo de instalaciones, debido a los riesgos biológicos (vectores), estéticos, paisajísticos, de ruido, malos olores, entre otras afectaciones que presentan estas infraestructuras convencionales de saneamiento.

De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC, 2018), la población en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) para el año 2010 fue de 2.239.199 habitantes y se proyectan 2.781.641 para el año 2020, derivando mayor

cantidad de residuos sólidos urbanos que involucran mayores costos y esfuerzos para su gestión.

Para el año 2013, en el DMQ se generaban aproximadamente 1.800 t d^{-1} de residuos sólidos urbanos (RSU), lo que equivale a una tasa per cápita de generación de aproximadamente $0,879 \text{ kg d}^{-1}$ (Pantoja y Valladares, 2019). En la actualidad los RSU de Quito se confinan en el Relleno Sanitario "El Inga".

La fracción orgánica biodegradable de los residuos sólidos urbanos (FOBRSU) son de interés para este proyecto por su volumen de generación y su confiabilidad en el análisis de poder calorífico además de su capacidad de generación de energía eléctrica (Montiel-Bohórquez y Pérez, 2019).

Buscando una mayor cantidad de residuos, se escogió como zona de estudio al sector sur de Quito debido a la gran generación de FOBRSU por parte del sector residencial y porque en esta zona se encuentran los mercados con mayor superficie y los más importantes de la ciudad.

La cuantificación del poder calorífico de los FOBRSU del sector sur de la ciudad de Quito pretende mejorar la disponibilidad de información, para contar con bases confiables, oportunas y accesibles en el momento de la toma de decisiones para mejorar la gestión de residuos urbanos.

En el caso de la ciudad de Quito, además de la necesidad de reducir la cantidad de residuos dispuestos en las calles, el relleno sanitario "El Inga" está operando con sus últimos cubetos ya que ha ocupado el 80% de su capacidad y su vida útil está por concluir (EMGIRS, 2018). Por tal motivo, el objetivo de este trabajo es cuantificar el poder calorífico de los residuos, así como el volumen que dejaría de llegar al relleno tras una incineración para prolongar su vida útil.

Materiales y métodos

El sector sur de Quito presenta los mercados y ferias más importantes de la ciudad y por consiguiente la mayor generación de FOBRSU en comparación con los sectores centro y norte. Limita al sur con el cantón Mejía, al norte con las avenidas Pedro Pinto Guzmán, Carlos María de la Torre, Gral. Necochea y Gral. Miller; al occidente, con el bosque protector en las faldas del Pichincha; y al oriente, con la avenida Simón Bolívar.

El sector tenía una población de 748.009 habitantes para el año 2010 (INEC, 2018), repartidos entre sus 13 parroquias urbanas, siendo Quitumbe la más poblada (79.075) y La Magdalena la de menor población (30.818)

Segmentación del área de estudio

Siguiendo la metodología de Sakurai (CEPIS, 2004); el área de estudio se dividió en cuatro subzonas: tres fueron residenciales según el ingreso económico de los habitantes y la cuarta la zona comercial (mercados y ferias) (MARN, 2018). Salvador et al. (2014) determinaron que el sector sur cuenta con los estratos económicos Medio, Medio bajo y Bajo en la zona residencial. Dentro de la delimitación se demarcó la zona de bosques (Figura 1), puesto que en la Ordenanza Metropolitana No. 0127 de Quito que rige desde el 2016, se contempla que este territorio no es de uso comercial ni residencial (Concejo Metropolitano de Quito, 2016).

Muestro de residuos

Zona residencial

Los puntos de muestreo de los estratos residenciales fueron determinados bajo un muestreo aleatorio

estratificado, asumiendo que los hábitos alimenticios son similares entre los habitantes de un mismo estrato, pero diferentes entre estratos sociales. La población correspondió a los lugares de acopio de los RSU, los contenedores mecanizados (CM) dentro de la zona de estudio, cuantificando en ellos los porcentajes en peso de FOBRSU generados.

Se asumió que todas las parroquias de Quito poseen CM, a pesar de la presencia del servicio “Recolección de Pie de Vereda” en algunas; esto para contar con una población fija y estandarizar el método. El cálculo de contenedores empleó el número de habitantes de cada estrato por la Secretaría de Territorio, Hábitat y Vivienda para el DMQ (2018) y el criterio de EMASEO (**Empresa Pública Metropolitana de Aseo de Quito**) aludiendo que cada contenedor atiende a 160 personas.

A partir de la población de cada parroquia y el muestreo estratificado implementado (estimación de la media por Mellado, 2016) sobre el porcentaje en peso de FOBRSU, un muestreo piloto (aleatorio simple con un intervalo de confianza del 95%), estableció 21 puntos de muestreo para la zona residencial, distribuidos en función del número de contenedores en cada subzona por estrato: 9 medio, 6 medio bajo y 6 bajo (Tabla 1).

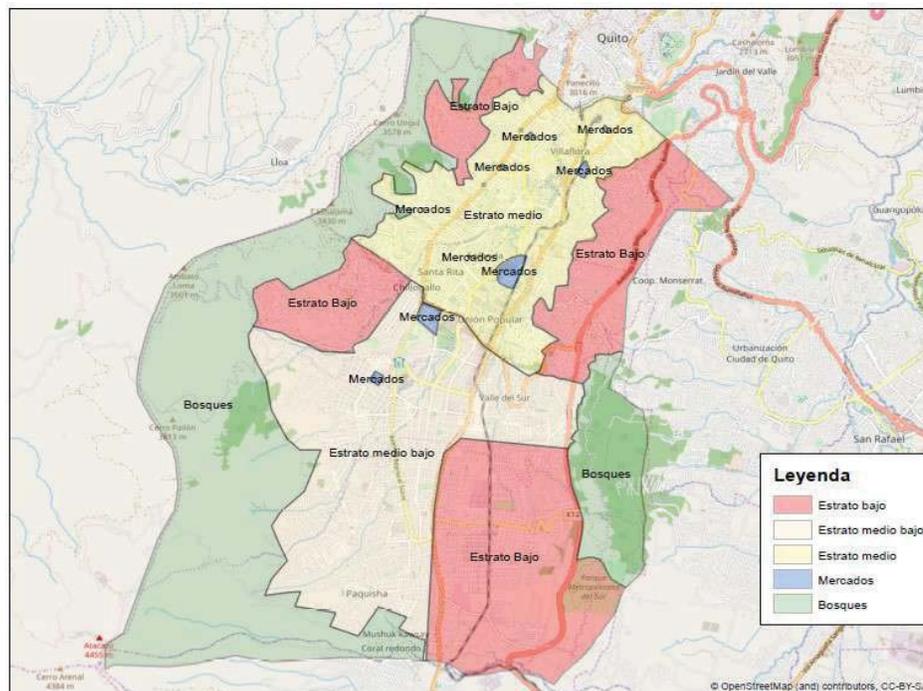


Figura 1. Estratos residenciales, zona comercial y bosques del sector sur de Quito

Tabla 1. Puntos de muestreo de RSU en la zona residencial del sector Sur de Quito

Sub zona residencial	Parroquia	Nombre del punto	Coordenadas (UTM)	
			X	Y
Estrato medio	La Argelia	Argelia 3	775483	9970073
		Argelia 4	775367	9969310
	La Ferroviaria	Ferroviaria 1	775770	9970881
		Ferroviaria 2	775838	9971853
	San Bartolo	San Bartolo 1	774940	9971485
		San Bartolo 2	774273	9972316
	Solanda	Solanda 1	773467	9970267
		Solanda 2	773447	9969359
Chilibulo	Chilibulo	774232	9972966	
Estrato medibajo	Guamaní	Guamaní 1	772526	9965257
		Guamaní 2	772339	9963596
	La Ecuatoriana	Ecuatoriana 1	771391	9967670
		Ecuatoriana 2	771222	9965783
	Quitumbe	Quitumbe 1	771713	9966406
		Quitumbe 2	773184	9967912
Estrato bajo	Chillogallo	Chillogallo 1	772477	9969931
		Chillogallo 2	771245	9968643
	La Argelia	Argelia 1	776772	9969726
		Argelia 2	776358	9969038
	La Ferroviaria	Ferroviaria 3	777632	9971775
		Ferroviaria 4	776532	9971001

Se dio prelación a las zonas más pobladas que en caso del estrato medio fueron dos puntos en las parroquias: La Argelia, La Ferroviaria, San Bartolo y Solanda, y uno en Chilibulo. En el estrato medio bajo fueron seleccionados dos puntos en las parroquias: Guamaní, La Ecuatoriana y Quitumbe. Y, finalmente, en el estrato bajo fueron seleccionados dos puntos en las parroquias: Chillogallo,

La Argelia y La Ferroviaria. En todas las parroquias los puntos de muestreo fueron seleccionados al azar.

Zona de mercados

La zona sur de Quito cuenta con nueve mercados, de los cuales fueron escogidos cinco por su mayor superficie y generación de FOBRSU (Tabla 2).

Tabla 2. Mercados y ferias de la zona sur de Quito utilizada en el muestreo FOBRSU

Mercado/feria	Parroquia	Sector	Coordenadas (UTM)		Superficie (m ²)
			X	Y	
Mayorista	Solanda	Sur	774504	9969848	135.318,02
Las Cuadras	Quitumbe	Sur	772327	9968784	35.735,78
Chiriyacu	Chimbacalle	Sur	776198	9972206	30.128,06
La Magdalena	La Magdalena	Sur	774911	9973240	8.314,31
Chimbacalle	Chimbacalle	Sur	776696	9973390	3.743,37

Fuente: Secretaría de Territorio, Hábitat y Vivienda para el DMQ (2018).

Los momentos de muestreo se definieron a partir de la información de la página web de EMASEO según los días y horas de recolección de basura. En el caso de mercados, se consideró para muestreo a los días de feria masiva que son los de mayor afluencia de clientes.

Momento de muestreo

En la primera etapa se muestreó en tres ocasiones la zona residencial y 2 veces en los mercados para determinar el porcentaje de peso de los FOBRSU generados (Muñoz et al., 2008).

El procedimiento de muestreo se realizó según la norma mexicana NMX-AA-15-1985 en cuanto a la forma de determinación y obtención de las muestras (Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología de México, 1992).

Los puntos que reportaron el mayor FOBRSU se tomaron como puntos representativos de cada subzona: San Bartolo 1 (Medio), Quitumbe 2 (Medio bajo), Ferroviaria 4 (Bajo) y Las Cuadras (Mercados), dichos puntos fueron utilizados en la segunda etapa de muestreo, de la que se obtuvieron las muestras susceptibles a análisis en laboratorio, recolectadas durante tres semanas con el fin de determinar tres valores de poder calorífico para cada zona.

Poder calorífico (PC)

Se utilizaron los métodos de análisis próximos y bomba calorimétrica isoperibólica. En el primero se determinaron la humedad total, contenido de compuestos volátiles, carbono fijo y cenizas tras incineración aplicados a la Ley de Goutal (1) (Santos, 2008).

$$P = 4,1868 \times (82C + aV) \quad (1)$$

donde P es el poder calorífico de la muestra (kJ kg^{-1}), C el contenido de carbono fijo (w/w), V los compuestos volátiles (w/w), α el coeficiente dependiente del coeficiente V' . Para obtener V' se aplicó la ecuación (2) e interpolado de la Tabla 3

$$V' = \frac{100V}{(V+C)} \quad (2)$$

Tabla 3. Valores del coeficiente α

V'	α	V'	α
5	145	25	103
7	130	27	101
9	133	29	99
11	127	31	97
13	122	33	96
15	117	35	94
17	113	37	88
19	110	39	82
21	108	40	80
24	105		

Fuente: Santos, 2008.

La bomba calorimétrica tipo isoperibólica utilizada fue Parr 6400 (alta velocidad) procedente de la Universidad Central del Ecuador con muestras de 0,5 g. La muestra de FOBRSU fue triturada a 6 mm, secada a 105°C durante 24 h. Se realizaron tres repeticiones por cada punto.

Estimación de FOBRSU y energía generada anual

La tasa anual de generación FOBRSU en cada subzona residencial fue obtenida a partir tasa per cápita $0,879 \text{ kg d}^{-1}$ reportada por Pantoja y Valladares (2019) y su correspondiente porcentaje en peso de FOBRSU (3):

$$FOBRSU_{Ri} = 0,879 \times Pobi \times 365 \times \%org_i \quad (3)$$

donde $FOBRSU_{Ri}$ es la tasa de generación anual de FOBRSU de cada subzona residencial (kg año^{-1}), $0,879$ la tasa per cápita de generación de RS (kg d^{-1}), $Pobi$ población de cada subzona (habitantes), 365 días del año y $\%org_i$ el porcentaje de FOBRSU del punto de muestreo representativo de cada estrato social.

De igual manera, en el caso de mercados y ferias, el cálculo se realizó a partir de la tasa de generación diaria (TGD) de residuos para cada uno de los mercados muestreados (t d^{-1}): 0,30 Chimbacalle, 2,33 Chiriyacu, 0,66 La Magdalena, 1,33 Las Cuadras y 20,00 Mayorista; multiplicada por 365 y por el porcentaje en peso de FOBRSU del punto más

representativo en cuanto a generación de orgánicos, que fue *Las Cuadras*.

La energía generada se calculó a partir de la tasa de generación anual de FOBRSU, por el poder calorífico previamente obtenido (4)

$$E_i = FOBRSU_i \times P_i \quad (4)$$

donde E_i es la energía obtenida (kJ año^{-1}), $FOBRSU_i$ la producción de FOBRSU en un año (kg año^{-1}) y P_i poder calorífico (kJ kg^{-1}).

La ecuación (4) se aplicó para los valores de tasa de generación de residuos anual y poder calorífico de las 3 subzonas residenciales junto a mercados y ferias. La suma de los cuatro valores conforma la energía total a partir de los FOBRSU del Sur de Quito. Se aplicó la conversión de kJ año^{-1} a kW h^{-1} al multiplicar el valor obtenido por 0,0002778 (Liu et al., 2019).

Estimación de la reducción de residuos que llegarían al relleno sanitario

Para calcular la tasa volumétrica de FOBRSU generado en cada subzona, se aplicó la división entre la tasa de generación total de residuos y el peso específico de residuos orgánicos que es 210 kg m^{-3} (Muñoz et al., 2008). Una vez obtenidas las tasas volumétricas, se calculó el porcentaje de reducción de las muestras a partir de la incineración conseguida con los análisis próximos (volumen inicial fue el de las celdas de secado con la forma de un cilindro regular; y como volumen final el proveniente de la incineración). El volumen de las cenizas fue determinado mediante método de desplazamiento de agua.

La incineración conseguida con los análisis próximos tomó 1 gramo de muestra por lo que las cenizas pertenecían a ese peso y no al total de muestra recolectada inicialmente. Por ello, se proyectaron a las cantidades obtenidas mediante regla de tres simple y se aplicó la ecuación (5) para hallar los porcentajes de reducción volumétrica de FOBRSU, los cuales se promediaron para obtener un valor aplicable al total de FOBRSU generados.

$$\%RD_V = \frac{(V_m - V_c)}{V_m} \times 100 \quad (5)$$

donde $\%RD_V$ es el porcentaje de reducción de volumen (%), V_m el volumen de la muestra inicial (mL) y V_c el volumen de cenizas, (mL).

Este porcentaje de reducción, multiplicado por la tasa volumétrica total de FOBRSU da como resultado el volumen de residuos que dejaría de llegar al relleno sanitario (6)

$$V_{NRS} = \%RD_V \times V_{RSOFB} \quad (6)$$

donde V_{NRS} es el volumen que dejará de llegar al relleno sanitario (m^3), $\%RD_V$ el porcentaje de reducción de volumen (%) y V_{FOBRSU} la tasa volumétrica de FOBRSU ($\text{m}^3 \text{ año}^{-1}$)

Propuesta de gestión

Para explotar la capacidad energética de los residuos sólidos, es necesaria la puesta en marcha de una planta incineradora. Este estudio plantea la utilización de una planta incineradora de lecho fluidizado que según García (2018) es la mejor opción para transformar FOBRSU en energía eléctrica con un rendimiento del 20% y autosustentable.

El costo de la planta tiene un valor aproximado de USD\$134 millones, su operación anual costaría aproximadamente USD\$583 mil con una capacidad de operación de $270.000 \text{ t año}^{-1}$ de residuos (Romero, 2008). El costo de operación anual incluye seguimiento ambiental, agua, insumos y retirada de escorias. La infraestructura necesaria para la instalación de la incineradora tiene un costo aproximado de USD\$380 mil (Pinto, P. 2017, comunicación personal).

Esta planta incineradora emplea para su arranque y funcionamiento un motor a diésel de 222 kW de potencia cuyo gasto de combustible de $79,8 \text{ L h}^{-1}$. Además, es necesaria la instalación previa de una planta acondicionadora de residuos cuyo trabajo es volver a separar los FOBRSU y asegurar que a la incineradora ingrese material seco y triturado (La Verde y Taylhardat, 2015).

Para establecer la propuesta de gestión se tomaron datos de energía proyectados a 2018 a partir de tasas de crecimiento poblacional y de mayor generación de residuos dado que la planta incineradora empezaría a funcionar en enero de ese año. Según Mancebo (2019), dichas plantas utilizan un 1/3 de la energía producida para auto alimentación y 2/3 restantes podrían ser comercializados.

La energía aprovechable, al ser vendida al Sistema Nacional Interconectado del Ecuador, generará

beneficios económicos cuando el costo del kW h⁻¹ generado sea USD 0,12 (ARCOTEL, 2018).

Otros beneficios obtenidos por la incineración de FOBRSU son los ahorros generados por no disponer residuos en el relleno sanitario y la reducción de los lixiviados que estos podrían generar.

Para evaluar la rentabilidad se realizó un análisis financiero que incluye flujos de caja, cálculo del Valor Actual Neto (VAN) y la relación beneficio-coste.

Para calcular el VAN se aplicó la ecuación (7)

$$VAN = \sum_{(P=1)}^n P = \frac{I-E}{(1+r)^n} \quad (7)$$

donde, *I* son los ingresos, *E* los egresos, *r* la tasa de rentabilidad y *n* tiempo.

La tasa de rentabilidad fue calculada mediante la ecuación (8)

$$r = r_f + \beta(r_m - r_f) + \text{riesgo país} + \text{inflación} \quad (8)$$

donde *r* es la tasa de rentabilidad (%), *r_f* tasa de libre riesgo (%), *r_m* tasa de rentabilidad del mercado (%) y *β* coeficiente de riesgo sistemático.

Para este análisis financiero se trató de estimar una inflación a futuro mediante el promedio de las inflaciones anuales en el periodo 2012-2016 y el promedio de las inflaciones mensuales de los últimos 13 meses hasta enero de 2018 obteniéndose un valor de 2,72%. Para las tasas de libre riesgo (2,95%) y de rentabilidad del mercado (11,01%), se promediaron los valores diarios del último año. El coeficiente de riesgo sistemático (0,97) fue obtenido a partir de datos del Banco Central del Ecuador (2017). Con todos esos valores y la aplicación de la ecuación (8), la tasa de rentabilidad se calcula en 13,49%.

Para la realización de esta propuesta de gestión se considera necesario un crédito bancario. Se ha simulado un crédito de USD\$146 millones a través del Banco de Desarrollo del Ecuador a 10 años plazo con un interés anual de 7,75%, tasa que fue obtenida en junio de 2017.

Para poder cubrir los altos costos de la compra e instalación del sistema de incineración se plantea el establecimiento de una tarifa al usuario dentro de la planilla mensual del servicio eléctrico por un monto de USD\$0,33.

Resultados y discusión

Porcentajes en peso de FOBRSU

La primera etapa de muestreo de los porcentajes en peso de FOBRSU (Tabla 4), identifican en la subzona residencial correspondiente al estrato socioeconómico medio al punto San Bartolo 1 como el más representativo, con un porcentaje de 77,8% de peso. En la subzona residencial correspondiente al estrato socioeconómico medio bajo el punto representativo es Quitumbe 2 (70,8%). En la subzona residencial correspondiente al estrato socioeconómico bajo el punto de mayor porcentaje fue Ferroviaria 4 (75,7%).

Tabla 4. Porcentaje en peso de FOBRSU generados

Sub zona residencial	Parroquia	Nombre del punto	Porcentaje promedio de FOBRSU
Estrato medio	Solanda	Solanda 1	48,40%
		Solanda 2	72,90%
	San Bartolo	San Bartolo 1	77,80%
		San Bartolo 2	69,10%
	La Ferroviaria	Ferroviaria 1	75,20%
		Ferroviaria 2	69,80%
	La Argelia	Argelia 3	72,20%
		Argelia 4	67,70%
	Chilibulo	Chilibulo 1	64,50%
	Estrato medio bajo	Guamaní	Guamaní 1
Guamaní 2			57,20%
La Ecuatoriana		Ecuatoriana 1	61,30%
		Ecuatoriana 2	60,90%
Quitumbe		Quitumbe 1	49,10%
		Quitumbe 2	70,80%
Estrato bajo	La Ferroviaria	Ferroviaria 3	52,30%
		Ferroviaria 4	75,70%
	Chillogallo	Chillogallo 1	74,80%
		Chillogallo 2	67,60%
	La Argelia	Argelia 1	68,70%
		Argelia 2	64,90%
Mercados y ferias	Chimbacalle	Chiriyacu	90,80%
	Solanda	Mayorista	88,90%
	Quitumbe	Las Cuadras	94,80%
	Chimbacalle	Chimbacalle	83,75%
	La Magdalena	La Magdalena	84,80%

A su vez, en la zona de mercados Las Cuadras es el punto representativo por mayor porcentaje de generación de orgánicos (94,8%).

Poder calorífico

Los valores de poder calorífico varían considerablemente entre ambos métodos (Tabla 5). Para efectos del presente estudio solo han sido considerados los valores obtenidos mediante la bomba calorimétrica por mostrarse parejos con valores encontrados en estudios similares como el de Montiel-Bohórquez y Pérez (2019).

Los bajos valores de los análisis próximos se deben a que el contenido de carbono fijo en las muestras fue muy bajo, sin superar en ningún caso el 4%. La fórmula de Goutal pondera considerablemente el contenido de carbono fijo por encima del contenido de volátiles (Angulo, 2018) y al ser los volátiles mayores que el carbono fijo, se obtuvieron valores de poder calorífico demasiado bajos.

Potencial energético

Para obtener la cantidad de energía que podría ser generada mediante incineración de los FOBRSU (Tabla 6) de las subzonas residenciales y mercados del sur de Quito se aplicó la Ecuación (4).

Reducción de volumen

La reducción de volúmenes calculados a partir de la incineración (Tabla 7) alcanzan valores de entre 93,53% y 98,28% siendo el estrato socioeconómico medio y mercados-ferias los más variables.

Volumen de residuos que no llegarán al relleno sanitario

En este punto se multiplicó el volumen total de FOBRSU generados ($188.822.979 / 210 = 899.157 \text{ m}^3$) con el porcentaje de reducción tras incineración (95,82%) dando como resultado 861.572 m^3 que se reducen quedando 37.585 m^3 como nuevo volumen a disponer en el vertedero.

Tabla 5. Poder calorífico de FOBRSU mediante análisis próximos y bomba calorimétrica

Zona	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Promedio
Análisis próximos (kJ kg⁻¹)				
Medio	*	1.568,4	2.331,3	1.949,8
Medio bajo	2.342,8	1.144,2	634,6	1.373,9
Bajo	1.157,4	514,2	1.332,4	1.001,3
Mercados	1.132,2	1.695,4	2.010,4	1.612,7
Bomba calorimétrica (kJ kg⁻¹)				
Medio	13.356,5	14.775,2	16.420,1	14.850,6
Medio bajo	20.760,5	16.600,9	15.368,4	17.576,6
Bajo	14.221,2	13.159,2	13.223,1	13.534,5
Mercados	14.511,8	24.507,9**	16.617,9	15.564,8

* Para la muestra del estrato medio en la semana 1 resultó un valor de poder calorífico negativo debido al bajo valor de carbono fijo. En consecuencia, el valor fue descartado por no ser coherente.

** Este valor fue descartado al momento de obtener el promedio por su diferencia con las otras semanas (1 y 3), teniendo en cuenta el criterio que los datos pueden variar como máximo 4.000 kJ/kg (Muñoz et al., 2008).

Tabla 6. Estimación del potencial energético de los FOBRSU en año de cada subzona residencial y de los mercados.

Subzona	FOBRSU (kg)	PC (kJ kg ⁻¹)	Energía (kJ)	Energía (kW h ⁻¹)
Medio	$8,02 \cdot 10^7$	$1,48 \cdot 10^4$	$1,19 \cdot 10^{12}$	$3,3 \cdot 10^8$
Medio bajo	$5,17 \cdot 10^7$	$1,75 \cdot 10^4$	$9,1 \cdot 10^{11}$	$2,52 \cdot 10^8$
Bajo	$4,82 \cdot 10^7$	$1,35 \cdot 10^4$	$6,53 \cdot 10^{11}$	$1,81 \cdot 10^8$
Mercados	$8,51 \cdot 10^6$	$1,55 \cdot 10^4$	$1,32 \cdot 10^{11}$	$3,68 \cdot 10^7$
Total generado	$1,88 \cdot 10^8$		$2,90 \cdot 10^{12}$	$8,05 \cdot 10^8$

Tabla 7. Volumen de cenizas de residuos y porcentaje de reducción.

Semana	Subzona	Volumen de cenizas 1 g de muestra (mL)	Muestra total (g)	Volumen de cenizas muestra total (mL)	Volumen inicial (mL)	Reducción de volumen (%)
1	Medio	0,3	31,46	9,44	160	94,09
	Medio bajo	0,25	28,4	7,1	170	95,82
	Bajo	0,35	13,32	4,66	130	96,41
	Mercados	0,35	9,33	3,26	190	98,28
2	Medio	0,2	12,98	2,59	99,5	97,38
	Medio bajo	0,25	19,82	4,95	102,9	95,18
	Bajo	0,2	15,31	3,06	99,5	96,92
	Mercados	0,25	19,38	4,84	96,5	94,97
3	Medio	0,35	19,65	6,87	106,2	93,52
	Medio bajo	0,3	17,7	5,31	109,5	95,14
	Bajo	0,3	12,44	3,73	109,5	96,59
	Mercados	0,35	14,5	5,07	114,6	95,56
Promedio						95,82

Impacto vida útil del relleno sanitario

Según la **Empresa Metropolitana de Gestión Integral de Residuos Sólidos de Quito (2018)**, cada celda del relleno tiene una vida útil de 18 meses cuando recibe 2.000 t d⁻¹ de residuos (9.523,8 m³). Los aportes del sector Sur alcanzan 517,32 t d⁻¹ (2.463 m³) de FOBRSU lo que representa el 25,85% del total generado en toda la ciudad y, de este, el 95,82% representa a la cantidad de residuos que dejaría de llegar a los cubetos.

Empleando un proyecto de incineración de FOBRSU del sur de Quito, la cantidad de residuos que llegue al relleno será la correspondiente a los sectores centro y norte de la ciudad además de las parroquias rurales junto con las escorias procedentes de la potencial incineración de FOBRSU del sector sur. Esta cantidad de residuos alcanzaría 1.504,3 t d⁻¹ (7.163,3 m³).

Si es que la vida útil de cada cubeto es 18 meses, se estima que su volumen es de 5.142.857 m³. Para calcular cuánto se alarga su vida útil, se relaciona el volumen del cubeto con los volúmenes de residuos que llegarían con y sin incineración de FOBRSU.

Sin proyecto:

$$T = \frac{5.142.857 \text{ m}^3}{9.523,8 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}} = 540 \text{ días} = 18 \text{ meses}$$

Con proyecto:

$$T = \frac{5.142.857 \text{ m}^3}{7.163,3 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}} = 718 \text{ días} = 23,9 \text{ meses}$$

Cada cubeto alargaría su vida útil en 5,9 meses. Tomando en cuenta que según EMGIRS EP (2018), se espera construir 10 cubetos más en el actual relleno, la vida útil del relleno se alargaría en total en 4,9 años.

Energía producida en el primer año de operación

La cantidad de energía encontrada por la incineradora alcanza a producir en el primer año de operaciones 161.091.735 kW h⁻¹, valor calculado mediante el producto entre la energía propia de los FOBRSU (Tabla 6) y el rendimiento de 20% de la planta. De ese total, el 1/3 recircula y los 2/3 restantes, es decir, 107.931.462 kW h⁻¹ se pueden aprovechar.

Según datos de la EMGIRS (2018), el costo de disponer una tonelada de residuos en el Relleno Sanitario El Inga es USD 27,70 mientras que tratar 1 m³ de lixiviados cuesta USD 12. Cada tonelada de residuos dispuestos en el Relleno Sanitario El Inga genera 0,19 m³ de lixiviado (EMGIRS, 2018).

Si se deja de recibir 181.682 t año⁻¹ y se deja de tratar 33.738 m³ de lixiviado, se da un ahorro anual de USD 5.032.591 y USD 404.856 por cada actividad respectivamente.

El análisis financiero del primer año de operaciones de la planta incineradora (Tabla 8), muestra un periodo de retorno de la inversión de 8 años.

Tabla 8. Ahorros por no disponer residuos en el relleno sanitario

Elemento	Valor	Unidad
Capacidad de tratamiento anual	188.822	t año ⁻¹
Energía para la venta	107.931.462	kW h ⁻¹ - año
Tarifa de venta de energía	0,12	USD/kW h ⁻¹
Ingreso por venta de energía	13.304.063	USD/año
Ahorro por no disponer residuos	5.032.591	USD/año
Ahorro por no tratar lixiviado	404.856	USD/año
Tarifa al usuario	820.050	USD/año
Ingreso anual bruto	19.561.560	USD/año
Costos operativos	583.518	USD/año
Combustible de planta	155.131	USD/año
Nuevo personal	206.299	USD/año
Ingreso anual neto	18.616.612	USD/año
Costo de inversión (sistema de incineración + infraestructura)	135.151.781	USD
Periodo de retorno	8	Años
VAN	2.076.743	-
Beneficio-costo	1,011	-

Hogares que se beneficiarían por la generación de energía

Según la ARCOTEL (2018) el consumo de energía per cápita anual para la provincia de Pichincha fue de 1.362,4 kW h⁻¹/habitante y, asumiendo que los hogares están conformados por 4 personas, se benefician 19.806 hogares en el primer año de operación.

Conclusiones

El porcentaje de Residuos Sólidos Orgánicos de Fácil Biodegradación (FOBRSU) de la zona

residencial de la zona sur de Quito, varían en el mejor de los casos (alta producción para incineración) entre 70,8 y 77,8%, y en el peor de los escenarios (baja producción para incineración) oscila entre 48,4 y 52,3%.

El porcentaje de Residuos Sólidos Orgánicos de Fácil Biodegradación (FOBRSU) de la zona de mercados y ferias, varía entre 83,75% y 94,80%.

Los tres estratos hallados en el sector sur de la ciudad de Quito se comportan muy similarmente en cuanto al porcentaje de FOBRSU, por lo que se concluye que la población del sur de Quito no varía ampliamente entre sí en sus hábitos de consumo.

El porcentaje de reducción de volumen de residuos tras incineración, que se calculó en un promedio de 95,82%, demuestra que es una alternativa viable para extender el tiempo de vida útil de los rellenos sanitarios y disminuir la generación de lixiviados, lo que a su vez se traduce en un importante ahorro para los cabildos. El tiempo de vida útil del relleno sanitario aumentaría en 4,9 años aplicando un proyecto de incineración para FOBRSU generados solamente en el sur de Quito. Si el proyecto se aplica a toda la ciudad se podría llegar a extender la vida útil del actual relleno hasta en 15 años aproximadamente.

La cantidad de energía (kW h⁻¹) que pueden generar en un año los FOBRSU de esta zona de estudio justifican la alta inversión inicial de una planta de incineración, pues permite en el corto plazo recuperar la inversión y obtener un ingreso extra al dejar de disponer 181.682,84 t año⁻¹ y al evitar el tratamiento de 33.738,50 m³ año⁻¹ de lixiviados, cuyos costos anuales son aproximadamente USD 5 millones y USD 415.000, respectivamente.

La venta de electricidad al Sistema Nacional Interconectado permite que el proyecto sea financieramente factible, dado que, su análisis financiero reporta un VAN positivo de 2.076.743, y debido a que su adquisición se ve garantizada al ser una energía de fuentes renovables.

Tomando en cuenta el crecimiento poblacional creciente en ciudades capitales como Quito, con el pasar de los años la generación de residuos aumentará y por ende la generación de energía por incineración también será mayor.

Bibliografía

- Angulo, M., 2018. Influencia de la temperatura, rampa de calentamiento y catalizador en la calidad de los productos obtenidos en la pirolisis de residuos de biomasa forestal en régimen continuo. Trabajo de grado. Escuela de Ingeniería de Bilbao, Universidad del País Vasco. Bilbao, España.
- Agencia de Regulación y Control de Electricidad de Ecuador (ARCOTEL), 2018. Consumo anual per cápita 2015. Disponible en: <http://www.regulacion-electrica.gob.ec/es/Tadisticadelsectorelectrico/recaudacion-anual/>; consultado: mayo de 2017
- Arroyo, F., Bravo, D., Rivera, M., 2018. Economía circular: un camino hacia un quito más sostenible. INNOVA Res. J. 3(11), 139-158. DOI: <https://doi.org/10.33890/innova.v3.n11.2018.767>
- Banco Central del Ecuador, 2017. Indicadores financieros. Quito.
- Blanco, G., Santalla, E., Córdoba, V., Levy, A., 2017. Generación de electricidad a partir de biogás capturado de residuos sólidos urbanos. Nota Técnica N° IDB-TN-1260. Banco Interamericano de Desarrollo. Washington, DC. DOI: <https://doi.org/10.18235/0000644>
- CEPIS, 2004. Guía para la caracterización de residuos sólidos domiciliarios. BVSD, Quito.
- Concejo Metropolitano de Quito, 2016. Ordenanza Metropolitana No. 0127, modificatoria de la ordenanza metropolitana No. 0041, del Plan Metropolitano de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Distrito Metropolitano de Quito. Quito.
- EMGIRS EP, 2018. Datos técnicos del relleno sanitario El Inga. Quito.
- García, R., 2018. Tratamiento de escorias de una incineradora de residuos domésticos. Trabajo de grado. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla, Sevilla, España.
- Liu, Y., Gu, J., Zhang, M., 2019. A-B processes: toward energy self-sufficient municipal wastewater treatment. IWA Publishing, Londres. DOI: <https://doi.org/10.2166/9781789060089>
- ICEX España Exportación e Inversiones, 2019. El mercado de la gestión de residuos en China. Cantón, China
- INEC, Instituto Nacional de Estadísticas y Censos de Ecuador, 2018. INEC presenta sus proyecciones poblacionales cantonales. Quito.
- La Verde, S., Taylhardat, L., 2015. Diseño de un incinerador de lecho fluidizado para procesar desechos sólidos orgánicos. Enfoque UTE 6(3), 81-95. DOI: <http://dx.doi.org/10.29019/enfoqueute.v6n3.71>
- Mancebo, P., 2019. Valorización energética de RSU. Tesis de maestría. Escuela de Ingeniería de Bilbao, Universidad del País Vasco, Bilbao, España.
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales de Guatemala (MARN), 2018. Guía para elaborar estudios de caracterización de residuos sólidos comunes. PNUD, Ciudad de Guatemala.
- Mellado, J., 2016. Muestreo estadístico: muestreo estratificado Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, México.
- Montiel-Bohórquez, N., Pérez, J., 2019. Generación de energía a partir de residuos sólidos urbanos. estrategias termodinámicas para optimizar el desempeño de centrales térmicas. Inf. tecnol. 30(1), 273-284. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000100273>
- Muñoz, M., Morales, V., Villalba, L., 2008. Manual de manejo de residuos sólidos urbanos. Impremédios, Quito.
- ONU Medio Ambiente, 2018. Perspectiva de la gestión de residuos en América Latina y el Caribe. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Oficina para América Latina y el Caribe. Ciudad de Panamá.
- Pantoja, J., Valladares, K., 2019. Estrategia para la gestión de residuos sólidos urbanos en la comunidad de Paquiestancia - Cantón Cayambe. Tesis de grado. Universidad Politécnica Salesiana, Quito.
- Romero, A., 2008. Planta de incineración de residuos sólidos urbanos con recuperación de energía. Universidad Pontificia Comillas, Madrid.
- Salvador, M., Larrea, C., Belmont, P., Baroja, C., 2014. Un índice difuso de niveles socioeconómicos en Quito. Rev. Politéc. 34(2), 123.
- Santos, J., 2008. Fuentes de energía no renovables (I): el carbón. Universidad de Vigo, Vigo, España.
- Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología de México, 1992. Norma Mexicana NMX-AA-15-1985, Protección al ambiente, contaminación del suelo, residuos sólidos municipales, método de cuarteo. México DF.
- Secretaría de Territorio, Hábitat y Vivienda de Quito, 2018. Población e indicadores del distrito metropolitano de Quito. Quito.

