

Modelo conceptual de una cadena de suministro para elaboración de hidrochar a partir de un residuo orgánico complejo

Nadia Polet Amaro-Arcos^a, Dulce Rocío Mota-López^b, Norma Alejandra Vallejo-Cantú^a, Alejandro Alvarado-Lassman^a, Erik Samuel Rosas-Mendoza^c

^aDivisión de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Orizaba, Av. Oriente 9, 852. Col. Emiliano Zapata Orizaba, Veracruz C.P. 94320, México
m14011249@orizaba.tecnmx.mx

^bFacultad de Ingeniería, Campus Ixtaczoquitlán, Universidad Veracruzana, Km 1.0 Carretera Sumidero Dos Ríos Ixtaczoquitlán, Veracruz, México

^cCONACYT-Instituto Tecnológico de Orizaba Av. Oriente 9, 852. Col. Emiliano Zapata, Orizaba, Veracruz C.P. 94320, México

Área de participación: Ingeniería Química.

Resumen

Es necesario encontrar alternativas para la conversión de los residuos orgánicos complejos (ROC) debido a las situaciones ambientales del planeta, el calentamiento global, contaminación del aire, erosión del suelo etc. Estas acciones permiten valorizar esta biomasa y cubrir necesidades energéticas. Por esto el objetivo de este trabajo es plantear una propuesta de la cadena de suministro para la generación de hidrochar a partir de los ROC, en donde se identificaron tres eslabones 1) Abastecimiento: las casas habitación y el equipo de limpia pública en conjunto con la planta ECORI son los encargados de proveer los ROC, 2) Producción: abarcó desde la recepción de los ROC hasta la obtención del hidrochar y 3) Distribución: hasta que el hidrochar se entrega al cliente final. De esta manera, la comprensión del modelo conceptual de la cadena de suministro permite la implementación de estrategias que maximicen la rentabilidad del proceso.

Palabras clave: Cadena de Suministro, Residuo Orgánico Complejo, Hidrochar.

Abstract

It is necessary to find alternatives for the conversion of complex organic waste (COW) due to the environmental situations of the planet, global warming, air pollution, soil erosion, etc. These actions allow to value this biomass and cover energy needs. For this reason, the objective of this work is to propose a supply chain proposal for the generation of hydrochar from the COW, where three links were identified: 1) Supply: the houses and the public cleaning team in conjunction with the ECORI plant are in charge of providing the COW, 2) Production: ranged from receipt of the COW to obtaining the hydrochar and 3) Distribution: until the hydrochar is delivered to the end customer. In this way, understanding the conceptual model of the supply chain allows the implementation of strategies that maximize the profitability of the process.

Key words: Supply Chain, Complex Organic Waste, Hydrochar.

Introducción

En México se generan 43.84 millones de toneladas de residuos sólidos urbanos (RSU) al año; el estado de Veracruz genera el 6.5 % de los residuos sólidos urbanos del país con 2.86 millones de toneladas por año y el municipio de Orizaba produce 30 mil toneladas anuales [1]. Los RSU se separan en residuos inorgánicos (pet, papel, cartón, vidrio, etc.) para su reciclaje y aprovechamiento, y en residuos orgánicos (restos alimenticios, desechos de jardinería, de poda, verduras y frutas descompuestas etc.), a partir de estos se obtienen los residuos

orgánicos complejos. Los ROC se componen de la fracción orgánica de los RSU, además contienen trazas de materiales indeseables por ejemplo papel, metal, plástico, cartón etc. Debido a su variada composición la disposición final de los ROC resulta compleja.

Por otra parte, la energía es fundamental para todos los sectores de la economía de un país y su demanda está aumentando debido al incremento de la población mundial y la rápida urbanización. Las fuentes de energía históricas (carbón, petróleo y gas natural) son finitas y no son adecuadas para las necesidades de consumo de energía global [2]. En México el consumo de energía per cápita fue 61.58 GJ durante el año 2020 [3]. En la actualidad, existe una tendencia al reciclaje de residuos como el método más respetuoso con el medio ambiente no sólo para convertir residuos sino también para generar energía. Los ROC son recurso abundante, barato, renovable y si se produce de forma sostenible, puede sustituir a los combustibles fósiles para producir energía y materiales [4]. Los residuos inorgánicos pueden reciclarse en combustibles convirtiéndose en una fuente de energía renovable [5]. Los ROC pueden ser transformados para su aprovechamiento mediante procesos termoquímicos como es la carbonización hidrotérmica (CHT).

Los procesos de termoquímicos son un método para transformar la biomasa en biocombustibles [6], la conversión termoquímica se puede clasificar como CHT, pirólisis, licuefacción, gasificación y combustión directa en función de su temperatura, presión y duración del calentamiento [7]. La CHT es un proceso que ocurre a temperaturas de 180 a 250 °C en presencia de agua [8]. Durante este proceso termoquímico, el ROC se somete a hidrólisis, deshidratación, descarboxilación, condensación, polimerización y aromatización [9]. Los productos finales se pueden dividir en fase sólida (hidrochar) como producto principal, fase líquida (compuestos solubles en agua y aceites) y fase gaseosa (principalmente CO₂ con trazas de CO y CH₄) [4].

Por otro lado, una cadena de suministro permite tener un panorama completo no sólo del proceso si no de todas las partes involucradas para la obtención de un producto, servicio o bien. El concepto de cadena de suministro (CS) se refiere a la integración de entidades comerciales debido a asociaciones tecnológicas y económicas, o distribuciones temporales y espaciales [10]. La CS agrega valor desde las fuentes de recursos originales a los productos finales mientras se intercambia información sobre el mercado y producción [11]. Está compuesta por una secuencia de eslabones tales como: fabricante, proveedor, transportistas, distribuidores, almacenistas, vendedores al detalle e incluso el mismo cliente final [12], como se observa en la Figura 1. Las cadenas de suministro tienen como objetivo explotar diferentes oportunidades para productos nuevos o ya en existencia para permitir optimizar los costos y obtener una máxima utilidad, como consecuencia las necesidades de los clientes se verán satisfechas.



Figura 1. Eslabones de una cadena de suministro.

En años anteriores se realizaron trabajos de investigación en los cuales ocuparon diferentes biomásas para el proceso de CHT, ocuparon distintos estudios de factibilidad y viabilidad económica. Maqhuza *et al.* [13], evaluaron la viabilidad económica de un sistema de gestión de RSU basado en CHT, además introdujo un análisis económico probabilístico para cuantificar la incertidumbre sobre los costos. Por otra parte, Aragón-Briceño *et al.* [14], realizaron un estudio de integración de masa y energía del potencial de acoplamiento de CHT con digestión anaerobia para el tratamiento de lodos de depuradora. Se construyeron seis configuraciones de proceso propuestas utilizando lodo primario, lodo secundario y una mezcla, con el fin de evaluar la generación neta de residuos, el destino de los nutrientes, la producción neta de energía y los posibles beneficios económicos. Saha *et al.* [15], investigaron la viabilidad económica de una instalación de CHT para tratar desechos sépticos. Consideraron dos casos diferentes para el análisis económico, donde el Caso I asumió una instalación descentralizada y el Caso II asumió una instalación centralizada. También González-Arias *et al.* [16], realizaron la optimización del proceso de carbonización hidrotérmica para la conversión de la poda del olivo en biocombustible, realizó una evaluación económica-experimental combinada. A su vez, Medina-Martos *et al.* [17], analizaron una solución integral de la carbonización hidrotérmica y la digestión anaeróbica para tratar los lodos de depuradora, utilizaron un programa de simulación para realizar una análisis técnico-económico.

La presente investigación tiene por objetivo desarrollar un modelo conceptual de una cadena de suministro del proceso de carbonización hidrotérmica a partir de un residuo orgánico complejo proveniente de una planta separadora de RSU.

Metodología

Caso de estudio

Para el desarrollo del modelo conceptual de la cadena de suministro se trabajó en la ciudad de Orizaba como el lugar para llevar a cabo el estudio de CHT, debido a que cuenta con una planta que separa los residuos sólidos urbanos (ECORI), en sus fracciones orgánica e inorgánica, la que proporcionó la materia prima (ROC) para el proceso CHT. Además, existe una planta cementera, como usuario del producto, que para su proceso industrial utiliza este tipo de combustibles para sus hornos rotatorios.

En cuanto a los ROC estos son llevados a rellenos sanitarios donde se depositan para su disposición final generando gases efecto invernadero como metano y dióxido de carbono, los lixiviados son tóxicos que pueden afectar el subsuelo y los mantos freáticos. Por esto se decidió encontrar una alternativa que permita darle un uso a estos ROC, se caracterizaron para analizar su viabilidad en el proceso de CHT.

Conceptualización de la cadena de suministro

En esta etapa se busca estructurar el modelo, definir variables, interrelaciones de variables. Para esto se requiere una investigación detallada en la elaboración de diversas CS. Se utilizó la metodología propuesta por Ramos [18]. La conceptualización, permite desglosar toda la cadena de suministro y detallar los elementos específicos que influyen en la operación, así como sus relaciones particulares, uno por uno.

Se identificaron los siguientes elementos:

- Elementos operativos: Son los elementos de la cadena de suministro donde se ejecutan los procesos de transformación, es importante identificarlos y definir sus valores con el objetivo de conocer su comportamiento en los procesos productivos.
- Movimiento físico de material: Relaciona elementos donde hay movimiento real y físico de producto, es importante identificar este tipo de relaciones porque aquí es donde se pueden definir los tiempos de espera y transporte en el modelo de simulación, además permite conocer la estructura del proceso de transformación dentro de la empresa.

Específicamente, para el eslabón de producción se realizaron los siguientes puntos para comprender todo el proceso de la CHT.

- 1) Los equipos a nivel industrial para la carbonización hidrotérmica se analizaron de acuerdo con una revisión bibliográfica.
- 2) Se procedió a ordenar las actividades tomando en cuenta la información disponible.
- 3) Se seleccionó el inicio y fin del proceso de carbonización hidrotérmica.
- 4) Todos los pasos anteriores se hicieron de forma iterativa para permitir una información detallada y adecuada.

Preparación de diagrama preliminar de bucle causal

Para la construcción del diagrama de bucle causal se siguieron cuatro pasos principales, de acuerdo con Hernández-Palagot [19]. La construcción del diagrama de bucle causal se realizó en el programa Vensim PLE 9.2.0:

- Crear los nombres de las variables: De acuerdo con la información recopilada durante la revisión bibliográfica, se creó una lista de variables.
- Identificar los enlaces: Se determinó la forma en la que una variable afecta a otra u otras, colocando líneas de unión y la polaridad de cada una de las relaciones entre variables. Se cuidó, especialmente, que cada uno de los enlaces explicara una parte del fenómeno representado en el diagrama y que ninguna de las variables contuviera causalidades redundantes.
- Etiquetar el bucle: Se identificó cuál naturaleza de cada bucle, si era de refuerzo o de balance.
- Descripción del bucle: Se describió cada bucle de retroalimentación.

Caracterización del residuo orgánico complejo

Los ROC fueron recolectados de la planta separadora de residuos sólidos ECORI ubicada en la colonia Donato Guerra, municipio de Orizaba, Veracruz. Esta actividad se realizó en los días de mayor recolección de residuos orgánicos. Se utilizaron recipientes con capacidad de 20 litros para el transporte de los ROC al Instituto Tecnológico de Orizaba. Para la obtención de la muestra representativa de los ROC se llevó a cabo la metodología descrita en la NORMA MEXICANA NMX-AA-15-1985, para su posterior análisis en laboratorio. La caracterización del ROC se realizó por triplicado mediante las determinaciones analíticas que se mencionan en la Tabla 1.

Tabla 1. Determinaciones analíticas.

| Parámetro | Método | Equipo |
|-------------------|--|----------------------|
| pH | Potenciómetro 4500-H+ B Standard Methods | Potenciómetro OAKTON |
| Humedad | Método gravimétrico 2540 B SM Standard Methods | Estufa Riossa |
| Cenizas | Método gravimétrico 2540 E SM | Mufla 1300 Furnace |
| Sólidos Totales | Método gravimétrico 2540 B SM Standard Methods | Estufa Riossa |
| Sólidos Volátiles | Método gravimétrico 2540 E SM | Mufla 1300 Furnace |

Determinación de pH

Para la determinación de pH, se pesaron 10 g del ROC en un vaso de precipitado de 100 mL, al vaso se agregaron 20 mL de agua tridestilada y se mezcló con ayuda de un agitador magnético durante 30 minutos. Se dejó reposar 15 minutos y se realizó la lectura con el electrodo del Potenciómetro OAKTON, se esperó unos segundos para su estabilización y finalmente se leyó el valor de pH en la pantalla.

Determinación de humedad

Para la determinación de humedad, se empleó el método gravimétrico, se pesó 5 gr de la muestra de ROC (P) en un crisol con una balanza OHAUS, y en después se introdujo la muestra en una Estufa Riossa a temperatura de 110 °C durante 24 horas. Pasado este tiempo la muestra se pesó nuevamente para obtener su peso constante (P'). Con ayuda de la Ecuación (1) se determinó el porcentaje humedad.

$$\% \text{ Humedad} = \frac{P}{P'} * 100 \quad (1)$$

Donde:

P = Masa de agua (g)

P' = Masa de la muestra (g)

Determinación de cenizas

El porcentaje de cenizas en base seca se calculó introduciendo la muestra de la determinación de humedad en la Mufla marca Barnstead Thermolyne 1300 Furnace a una temperatura de 550 °C una vez alcanzada se contabilizó 2 horas. La cantidad de cenizas se determinó mediante la destrucción de la materia orgánica presente en la muestra por calcinación y determinación gravimétrica del residuo. Se expresa en porcentaje (g/100 g de muestra) y se obtuvo mediante la Ecuación (2):

$$\% C = \frac{P_3 - P_1}{P_2 - P_1} * 100 \quad (2)$$

Donde:

C = Porcentaje de cenizas en base seca (%)

P_1 = Peso del crisol vacío (g)

P_2 = Peso del crisol más la muestra seca (g)

P_3 = Peso del crisol más la muestra calcinada (g)

Determinación de Sólidos Totales

Para la determinación de sólidos totales, se pesó un crisol previamente sometido al método de peso constante, se registró su peso. Posteriormente se añadió una muestra del ROC y se anotó su peso. Después se metió el crisol a la estufa durante 24 horas a 105 °C. Transcurrido el tiempo, se sacó el crisol y se registró su peso. La cantidad de sólidos totales se determinó mediante la Ecuación (3):

$$\% ST = \frac{P_3 - P_1}{P_2} * 100 \quad (3)$$

Donde:

ST = Porcentaje de sólidos totales (%)

P_1 = Peso del crisol vacío (g)

P_2 = Peso de la muestra (g)

P_3 = Peso del crisol más la muestra seca (g)

Determinación de Sólidos Volátiles

Para la determinación de sólidos volátiles, se introduce a la mufla durante 2 horas a 550 °C la muestra final que previamente fue obtenida en la determinación de sólidos totales. Una vez transcurrido el tiempo, se pesó la muestra calcinada y se registró su peso. La cantidad de sólidos volátiles se determinó mediante la Ecuación (4):

$$\% SV = \frac{P_3 - P_4}{P_3 - P_1} * 100 \quad (4)$$

Donde:

SV = Porcentaje de sólidos volátiles (%)

P_1 = Peso del crisol vacío (g)

P_2 = Peso de la muestra (g)

P_3 = Peso del crisol más la muestra seca (g)

P_4 = Peso del crisol más la muestra calcinada (g)

Resultados y discusión

Se realizó un análisis de los actores y eslabones involucrados en la cadena de suministro para la producción del hidrochar, se identificaron 3 eslabones el primero 1) Abastecimiento, 2) Producción y por último 3) Distribución que se puede observar en la Figura 2.

En abastecimiento se encontró que las casas habitación a partir de los habitantes generan los RSU, en Orizaba según el SIEGVER hay 127,145 habitantes lo que equivale al 1.53 % de la población a nivel estatal con un número aproximado de 37,407 casas habitadas. Posteriormente, se involucra la dependencia de limpia pública del municipio de Orizaba que regula el servicio de recolección, traslado y disposición final de los residuos sólidos urbanos que dispone de 15 camiones recolectores de basura, trabajan en tres turnos matutino de 6:00-15:00 h, vespertino de 15:00-22:30 h y nocturno de 22:30-6:00 h en un horario de lunes a sábado. Estos RSU son llevados por los camiones recolectores a la planta de ECORI, la planta separa los residuos en sus componentes orgánicos e inorgánicos, los componentes orgánicos separados pero que contienen materiales trazas son llamados ROC.

A su vez, los residuos inorgánicos valorizables se venden y/o se destinan para reciclaje, los que no, son llevados a una planta cementera donde se emplean para su proceso e incineración donde ocupan estopa, guantes, trapos, papel, plástico, hule, llantas, tierras, lodos, aceites, grasas, filtros, aserrín, y solventes. Además, los residuos inorgánicos separados reemplazan a los materiales minerales primarios (como piedra caliza, arcilla o hierro) y la parte combustible proporciona la energía necesaria para la producción de clínker [20].

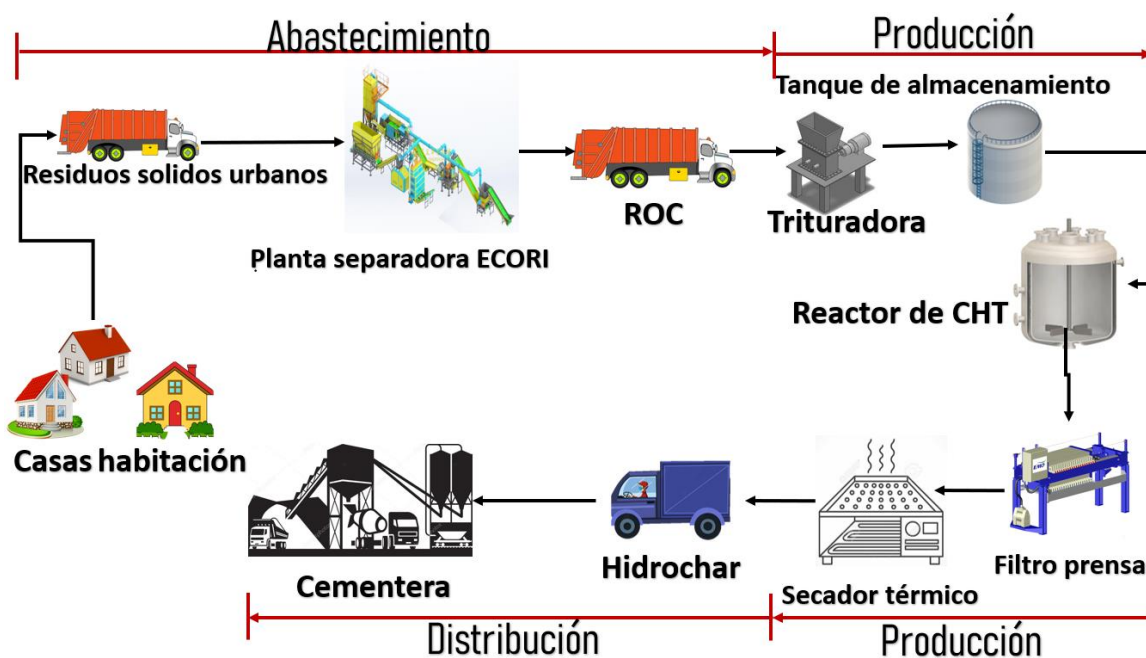


Figura 2. Propuesta de la cadena de suministro para la producción de hidrochar.

Para la producción, se plantea que los ROC sean transportados a una planta de carbonización hidrotérmica donde, los ROC llegarán al área de recepción posteriormente serán movidos por un cargador frontal a la tolva trituradora donde se llevarán a un tanque de almacenamiento para llegar al reactor de CHT, el cual tiene como aditamentos un intercambiador de calor para aprovechar la energía térmica del proceso, una vez que termina la CHT se precipita el agua y el carbón pasa por un filtro prensa que con ayuda de una banda transportadora será llevado a un secador térmico. Por último, en distribución el hidrochar será llevado al usuario final que se prevé sea una industria cementera en donde utilizan este tipo de combustible en sus hornos rotatorios donde deben alcanzar temperaturas de 1,350 a 1,450 °C.

Se obtuvo un diagrama causal para observar posibles causas y efectos entre las variables a lo largo de toda la CS que se puede observar en la Figura 3. En este sentido, los bucles que describen la dinámica del sistema de la CS se pueden proponer de la siguiente manera:

B1: Cuando los residuos inorgánicos incrementen el aprovechamiento de estos residuos aumentará. Así mismo, cuando el aprovechamiento de los residuos inorgánicos incremente la disponibilidad de residuos inorgánicos disminuirá.

B2: Si la separación de los RSU incrementa los residuos inorgánicos incrementarán por consiguiente el aprovechamiento de los residuos inorgánicos aumentará. A su vez un mayor aprovechamiento de residuos inorgánicos permitirá una disminución en los residuos dispuestos a rellenos sanitarios. Mientras que mayor sean los residuos dispuestos en los rellenos sanitarios, la capacidad disponible de estos decrementará.

B3: Si la producción de hidrochar incrementa, los residuos dispuestos en rellenos sanitarios decrementarán. Por otra parte, si los residuos dispuestos en rellenos sanitarios incrementan, la capacidad disponible de rellenos sanitarios disminuirá. Por consiguiente, si la capacidad disponible de rellenos disminuye será necesario aumentar la capacidad de separación de la planta. Así mismo, si la separación de RSU incrementa los residuos orgánicos complejos aumentará lo que incrementará la producción de hidrochar.

B4: Cuando el ROC incrementa la producción de hidrochar aumentará. A su vez, cuando la producción de hidrochar incrementa los ROC disminuirán.

B5: Cuando la producción de hidrochar incrementa la cantidad de hidrochar disponible aumenta. Cuando hay suficiente hidrochar disponible (stock), la producción de hidrochar deberá decrementar.

B6: Si el hidrochar disponible aumenta, la distribución de hidrochar aumentará. Cuando la distribución incrementa, el hidrochar disponible disminuirá.

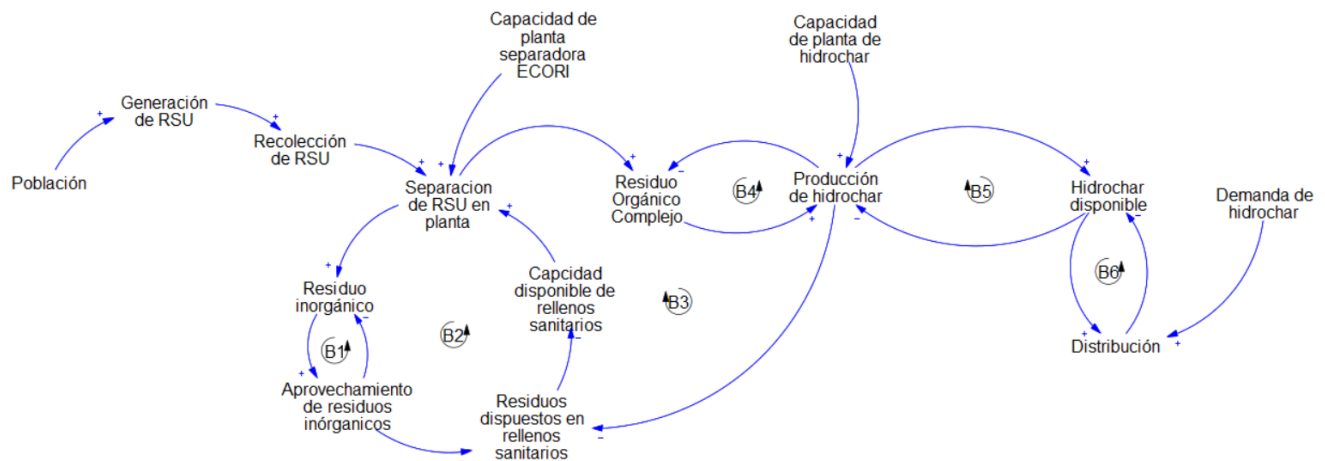


Figura 3. Diagrama causal de la propuesta de CS para la producción de hidrochar.

Caracterización del residuo orgánico complejo

Los resultados de la caracterización fisicoquímica del ROC se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Caracterización del residuo orgánico complejo.

| pH | Humedad (%) | Cenizas (%) | ST (%) | SV (%) |
|--------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| 6.01 ± 0.18 | 61.78± 0.92 | 53.24 ± 1.26 | 38.21 ± 0.92 | 46.75 ± 1.26 |

De acuerdo con los resultados obtenidos en la presente investigación, se puede observar que el valor de pH es de 6.01, por debajo del valor encontrado por Soobhany [21] que fue de 7.1, utilizó la parte orgánica de residuos sólidos municipales. Por su parte, el porcentaje de humedad es de 61 % lo que muestra que para realizar el proceso de CHT será necesario la adición de agua para el proceso. El porcentaje de ST fue de 38.21 menor al reportado por Tapia-Gómez de 59.23 % [22], quien ocupó residuos sólidos orgánicos municipales. Hernández-Nazario [23] empleo la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y encontró un valor de humedad de 67.7 % este dato se encuentra cercano al reportado para el ROC. Mientras el valor de sólidos volátiles fue de 79.1 que es mayor al encontrado en esta investigación esto se atribuye a las fracciones indeseables de materiales que tiene este ROC que no son volátiles.

Trabajo a futuro

Como secuencia de este trabajo se realizará un análisis técnico-económico del proceso de la CHT para conocer su rentabilidad y factibilidad. Esto con ayuda de un criterio de valor (valor presente neto). Así mismo, se validarán las condiciones de operación de temperatura y tiempo que maximicen el poder calorífico del hidrochar.

Conclusiones

La gestión adecuada de toda la cadena de suministro permite maximizar la factibilidad del producto a lo largo de la misma. Conocer y crear acuerdos o estrategias con los actores y eslabones de la cadena de suministro para la producción de hidrochar permite aumentar la rentabilidad del proceso. Así mismo, el proceso de CHT permite valorizar residuos con una alta humedad sin necesidad de un secado previo, disminuyendo los costos energéticos en comparación con otros procesos termoquímicos. El uso de los ROC como materia prima para el proceso de CHT ayuda a disminuir los costos por disposición de residuos sólidos urbanos, además de poder crear un bioenergético y tener una economía circular.

Agradecimientos

Al CONACYT por la beca nacional 749955. Al TecNM por el apoyo otorgado para la realización de esta investigación. Al COVEICYDET por su apoyo en el proyecto de investigación: Clave 15 1447.

Referencias

- [1] M. F. Hernández, «Se inaugura planta ECORI; Ayuntamiento firma convenio con Geocycle,» *El sol de Orizaba*, 20 Julio 2020.
- [2] M. N. Bardham, M. Tabassum y M. A. Islam, «Co-hydrothermal carbonization of different feedstocks to hydrochar as potential energy for the future world,» *Journal of Cleaner Production*, pp. 1-20, 2021.
- [3] SENER, «Gobierno de México,» Balance Nacional de Energía, [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/sener/documentos/balance-nacional-de-energia-2019>. [Último acceso: 2022].
- [4] G. Ischia, G. Guella y N. Bazzanella, «Hydrothermal carbonization of glucose: Secondary char properties, reaction pathways, and kinetics,» *Chemical Engineering Journal*, vol. 449, 2022.
- [5] K. Krysanova y A. Krylova, «Biochar characteristics produced via hydrothermal carbonization and torrefaction of peat and sawdust,» *Fuel*, vol. 328, nº 15, 2022.

- [6] J. Zhang, «The thermochemical conversion of biomass into biofuels,» *Construction, Biomedical, and other Industrial Applications*, p. 327, 2019.
- [7] P. Halder, «Recent trends and challenges of algal biofuel conversion technologies,» *Applications, Technologies and Environmental Sustainability*, p. 167, 2019.
- [8] K. O. Krysanovaa, V. M. Zaichenko y G. A. Sychev, «Effect of temperature on the hydrothermal carbonization of organic fertilizers with the production of carbon fuel,» *Solid Fuel Chemistry*, vol. 53, nº 2, pp. 105-107, 2018.
- [9] G. Yang, H. Liu y Y. Li, «Kinetics of hydrothermal carbonization of kitchen waste based on multi-component reaction mechanism,» *Full*, vol. 324, nº 15, 2022.
- [10] N. Zhou, H. Su y S. Hu, «China's lithium supply chain: Security dynamics and policy countermeasures,» *Resources Policy*, vol. 78, 2022.
- [11] N. Ishii y M. Ohba, «A supply chain analysis and design method based on the value of information,» *International symposium on process system engineering*, vol. 1591, 2018.
- [12] J. Mesa y D. Carreño, «Metodología para aplicar Lean en la gestión de la cadena de suministro,» *Espacios*, vol. 41, nº 15, p. 30, 2020.
- [13] Maqhuzu, Yoshikawa y Takahashi, «Stochastic economic analysis of coal-alternative fuel production from municipal solid wastes employing hydrothermal carbonization in Zimbabwe. Science of the Total Environment,» *Elsevier*, 2019.
- [14] Aragón-Briceño, Ross y Camargo-Valero, «Mass and energy integration study of hydrothermal carbonization with anaerobic digestion of sewage sludge.,» *Renewable Energy*, vol. 167, p. 437, 2020.
- [15] Saha, McGaughy, Davis y Reza, «Assessing hydrothermal carbonization as sustainable home sewage management for rural counties: A case study from Appalachian Ohio. Science of the Total Environment,» *Elsevier*, vol. 781, pp. 1-9, 2021.
- [16] Gonzáles-Arias, Baena-Moreno, Sánchez y Cara-Jiménez, «Optimizing hydrothermal carbonization of olive tree pruning: A techno-economic analysis based on experimental results,» *Science of the total environment*, vol. 784, pp. 1-12, 2021.
- [17] Medina-Martos, Istrate, Illamil, Gálvez-Martos y Dufour, « Techno-economic and life cycle assessment of an integrated hydrothermal carbonization system for sewage sludge,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 277, pp. 1-13, 2020.
- [18] A. J. O. RAMOS, Artist, *Diseño de cadenas de suministro en micro y pequeñas empresas en etapa de incubación, utilizando simulación*. [Art]. Universidad Nacional Autónoma de México, 2017.
- [19] L. I. H. Palagot, «Diseño de un modelo conceptual para explicar la relación causa-efecto de la toxicidad por exposición ambiental al níquel, así como para sugerir límites regulatorios razonables,» Córdoba, 2020.
- [20] Geocycle, «Geocycle,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.geocycle.com/>. [Último acceso: 24 03 2022].
- [21] N. Soobhany, «Assessing the physicochemical properties and quality parameters during composting of different organic constituents of Municipal Solid Waste,» *Elsevier*, vol. 6, nº 2, p. 1979, 2018.
- [22] Tapia-Gómez, «CODIGESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS GENERADOS EN LAS,» *JEEOS*, vol. 1, nº 1, p. 71, 2017.
- [23] L. Hernández-Nazario, «Caracterización físico-química de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos del vertedero controlado en el Centro Urbano Abel Santamaría de Santiago de Cuba,» *Scielo*, vol. 38, nº 2, 2018.