



DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OPCIÓN I.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

“ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DE UNA PROPUESTA DE
CADENA DE SUMINISTRO PARA LA PRODUCCIÓN DE
HIDROCHAR PROVENIENTE DE UN RESIDUO ORGÁNICO
COMPLEJO (ROC)”.

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS EN
INGENIERÍA QUÍMICA

PRESENTA:

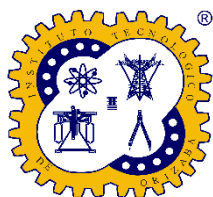
I.Q. NADIA POLET AMARO ARCOS

DIRECTOR DE TESIS:

DR. ERIK SAMUEL ROSAS MENDOZA

CO-DIRECTOR DE TESIS:

DR. ALEJANDRO ALVARADO LASSMAN





EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Orizaba
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Orizaba, Veracruz, 19/abril/2023
Dependencia: División de Estudios de
Posgrado e Investigación
Asunto: Autorización de Impresión
OPCION: I

C. NADIA POLET AMARO ARCOS
Candidato(a) a Grado de Maestro(a) en:
CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA
P R E S E N T E.-

De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros e Institutos Tecnológicos Federales del Tecnológico Nacional de México, de la Secretaría de Educación Pública, y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

"Análisis técnico-económico de una propuesta de cadena de suministro para la producción de hidrochar proveniente de un residuo orgánico complejo (ROC)."

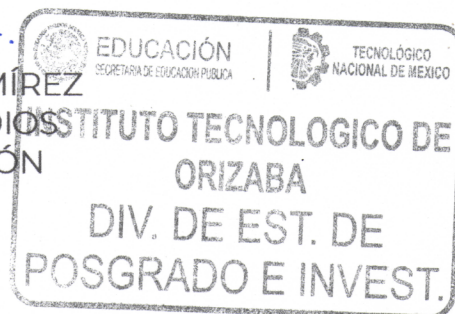
Comunico a Usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA - TÉCNICA - CULTURA®

Cuahtémoc Sánchez R.

Dr. CUAUHTÉMOC SÁNCHEZ RAMÍREZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



OG-13-F06



Av. Oriente 9 Núm.852, Colonia Emiliano Zapata. C.P. 94320 Orizaba, Veracruz.
Tel. 01 (272)1105360 e-mail: dir_orizaba@tecnm.mx | orizaba.tecnm.mx



2023
Año de
Francisco
VILLA



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Orizaba
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Orizaba, Veracruz, 21/febrero/2023
Asunto: Revisión de trabajo escrito

C. CUAUHTÉMOC SÁNCHEZ RAMÍREZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
P R E S E N T E.-

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C.

NADIA POLET AMARO ARCOS

La cual lleva el título de:

**"Análisis técnico-económico de una propuesta de cadena de suministro para la
producción de hidrochar proveniente de un residuo orgánico complejo (ROC)."**

Y concluyen que se acepta.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA - TÉCNICA - CULTURA®

PRESIDENTE: DR. ERIK SAMUEL ROSAS MENDOZA

SECRETARIO: DR. ALEJANDRO ALVARADO LASSMAN

VOCAL: MIQ. NORMA ALEJANDRA VALLEJO CANTÚ

VOCAL SUP.: MC. MARÍA ELENA GARCÍA REYES

FIRMA
FIRMA
FIRMA
FIRMA

TA-09-18



Av. Oriente 9 Núm.852, Colonia Emiliano Zapata. C.P. 94320 Orizaba, Veracruz.
Tel. 01 (272)1105360 e-mail: dir_orizaba@tecnm.mx tecnm.mx | orizaba.tecnm.mx



2023
AÑO DE
**Francisco
VILLA**
EL PROYECTO DEL FUTURO

Declaración de originalidad y cesión de derechos

Orizaba, Veracruz, el día 19 del mes de abril del año 2023.

El(la) que suscribe

C. Nadia Polet Amaro Arcos

Declaro que esta tesis, que tiene una extensión de 78 cuartillas, ha sido escrita por mí y constituye el registro escrito del trabajo de la tesis titulada

“Análisis técnico-económico de una propuesta de cadena de suministro para la producción de hidrochar proveniente de un residuo orgánico complejo (ROC)”

del programa: Maestría en Ciencias en Ingeniería Química bajo la asesoría y dirección del (la) Dr. Erik Samuel Rosas Mendoza y Dr. Alejandro Alvarado Lassman y no ha sido sometida en ninguna otra institución previamente.

Todos los datos y las referencias a materiales ya publicados están debidamente identificados con su respectivo crédito e incluidos en las notas bibliográficas y en las citas que se destacan como tal y, en los casos que así lo requieran, cuento con las debidas autorizaciones de quienes poseen los derechos patrimoniales. Por lo tanto, me hago responsable de cualquier litigio o reclamación relacionada con derechos de propiedad intelectual, exonerando de toda responsabilidad al Tecnológico Nacional de México campus Orizaba.

También declaro que, al presentar esta tesis, cedo los derechos del trabajo al Tecnológico Nacional de México campus Orizaba para su difusión, con fines académicos y de investigación, bajo las regulaciones propias de la institución y que si existe algún acuerdo de confidencialidad de la información lo haré saber en forma escrita para que se omitan las secciones correspondientes.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y del director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: depi_orizaba@tecnm.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente de este.

Nadia Polet Amaro Arcos

DEDICATORIAS

A Dios por no dejarme caer nunca, por estar a mi lado siempre, por darme la fortaleza para terminar y la convicción de poder realizar una meta más.

A mi familia, por su apoyo incondicional en todo momento, por su amor inmenso. A ti amor por el apoyo, por ser la tranquilidad en mi vida y por ser parte de todo este proceso y estar ahí para abrazarme cuando lo necesite. A Renata por ser el motor de todo esto, por ser mi inspiración y razón para querer superarme, por el tiempo que le quite de juego, de tener a mamá con ella, porque a pesar de ser tan pequeña es muy comprensiva.

Mamá no tengo las palabras para decirte lo mucho que te agradezco por estar como apoyo, como equipo con Reni, por tu tiempo y cariño en cada etapa, por las palabras de aliento que siempre me diste. A ti papá por apoyarme siempre que lo necesite y por creer en todo lo que siempre he deseado por tu ejemplo de que hasta lo imposible es un hecho si así lo queremos.

A mi hermano por tanto amor, y porque siempre te preocupaste por mí, por mi bienestar, por mi salud y porque comiera a tiempo. Gracias por siempre estar para darme ánimos y muestras de tu grande amor.

A mis suegros por ayudarme en todo lo que han podido, por procurarme en tantos aspectos, por estar al pendiente de nosotros. Por los cuidados hacia Reni y por nunca dejarnos solos.

RECONOCIMIENTOS ACADÉMICOS

A mi asesor el Dr. Erik Samuel Rosas Mendoza por todo el apoyo brindado durante este proyecto por su paciencia, sus consejos, por siempre estar al pendiente, por aceptarme para formar parte de su equipo de trabajo y por las exigencias que sin duda fueron claves para todo este proceso.

A mi comité de tesis, al Dr. Alejandro Alvarado Lassman, MIQ. Norma Alejandra Vallejo Cantú y a la M.C. María Elena García Reyes por el apoyo brindado, por las observaciones que ayudaron a que este trabajo mejorará y las contribuciones de cada uno.

A la Dra. Dulce Rocío Mota López por su valioso apoyo y guía en el análisis técnico-económico, además de sus comentarios que hicieron mejorar y tener un enfoque global en temas de su área.

Al Instituto Tecnológico de Orizaba por permitir el uso de sus instalaciones durante la investigación y experimentación de este proyecto, así como para la culminación de la tesis.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para la realización de la maestría con número de beca (CVU) 749955.

Al COVEICYDET por el financiamiento otorgado con Clave 15 1447, el cual permitió la realización de este proyecto.

PRESENTACIONES EN CONGRESOS

2022	Ponencia virtual	Modelo conceptual de una cadena de suministro para elaboración de hidrochar a partir de “Coloquio de investigación Multidisciplinaria” Vol. 10, No. 1. Orizaba 2022. 17 al 21 de octubre de 2022.
2022	Ponencia virtual	Obtención de un bioenergético a partir de un residuo orgánico complejo mediante carbonización hidrotérmica. “Congreso internacional de investigación de Academia Journals Celaya 2022” con ISSN 1946-5351 online, Vol. 14, No. 09. 9 al 11 de noviembre de 2022.

RESUMEN

“Análisis técnico-económico de una propuesta de cadena de suministro para la producción de hidrochar proveniente de un residuo orgánico complejo (ROC)”

Elaborado por: I.Q. Nadia Polet Amaro Arcos

Dirigida por: Dr. Erik Samuel Rosas Mendoza

Dr. Alejandro Alvarado Lassman

En la actualidad, se ha incrementado el uso de la energía verde, o limpia como también se conoce, debido a que provienen de fuentes renovables y son amigables con el medio ambiente además de no generar emisiones de CO₂ a la atmosfera. Es por eso que se propone el proceso de carbonización hidrotérmica (CHT) como método de aprovechamiento para los residuos sólidos urbanos (RSU), en especial de la parte orgánica, evitando que sean llevados a los rellenos sanitarios además de crear un biocombustible (hidrochar) que puede sustituir a los combustibles fósiles y cubrir parte de la demanda energética en procesos industriales. Durante esta investigación se realizó el análisis técnico-económico de una propuesta de cadena de suministro para la producción de hidrochar mediante carbonización hidrotérmica de un residuo orgánico complejo (ROC).

Para la propuesta del modelo conceptual se identificaron los eslabones de 1) abastecimiento: las partes involucradas en la obtención del ROC, 2) producción: los equipos utilizados para la obtención del hidrochar y 3) distribución: movimiento del hidrochar hasta que llega al usuario final. En cuanto al ROC este fue obtenido de la planta de separación de residuos sólidos “ECORI”. El ROC tuvo que ser separado manualmente para eliminar la mayor cantidad de residuo inorgánico y una vez acondicionado se humedecido debido a que presentó baja humedad de 76.01 %. Durante el proceso de CHT se utilizaron las siguientes condiciones de operación de 200 y 240 °C con tiempos de 3 y 5 h. Una vez terminado el proceso de CHT, fue

necesario secar el hidrochar obtenido, este fue secado durante 1 hora aproximadamente a 105 °C. Posteriormente, al hidrochar seco se le realizaron análisis proximal (pH, humedad, cenizas, sólidos totales y sólidos volátiles), análisis elemental, determinación de grupos funcionales (FTIR) y composición química (RAMAN, DRX).

En consecuencia, del hidrochar seco se obtuvieron los siguientes valores para la CHT con tiempo de 3 h y 200 °C un pH de 6.09 ± 1.82 , humedad (%) 0.39 ± 0.78 , ST (%) 96.07 ± 0.39 , SV (%) 50.82 ± 1.84 y cenizas (%) 49.18 ± 1.84 . Por último, para el proceso de CHT, 5 h y 200 °C se obtuvieron los siguientes datos, un pH de 6.13 ± 2.1 , humedad (%) 5.48 ± 0.16 , ST (%) 98.51 ± 0.16 , SV (%) 33.38 ± 2.09 y cenizas (%) 66.62 ± 2.09 . Para el análisis elemental el hidrochar obtenido del menor tiempo y temperatura se obtuvieron los siguientes datos, para el carbono (%) 22.46 ± 3.27 , hidrógeno (%) 2.60 ± 0.63 , oxígeno (%) de 73.73, nitrógeno (%) 0.98 ± 0.23 y azufre (%) 0.20 ± 0.10 . En cambio, para la mayor temperatura y tiempo se observa un aumento en el carbono (%) 38.47 ± 2.37 , hidrógeno (%) 4.49 ± 0.17 , oxígeno (%) 54.77, nitrógeno (%) 2.08 ± 0.14 y azufre (%) 0.16 ± 0.00 . Además, para la determinación de grupos funcionales y composición química ningún análisis indicó la formación completa de carbono, en algunos espectros se pueden observar el inicio de formación de bandas. Por otra parte, para el análisis técnico-económico se seleccionaron tres escenarios para una comparativa y selección del escenario que de una mayor utilidad. El primer escenario tomando en cuenta las toneladas de ROC que procesa ECORI tuvo un valor presente neto (VPN) de 51.64 M, el segundo aumentando un 25 % el ROC disponible obtuvo un VPN de 68.39 M, y por último la capacidad máxima de procesamiento de ROC que puede separar la planta ECORI el cual alcanzó un valor de 110.62 M.

Por lo anterior, se concluye que la mejor temperatura y tiempo fue 240 °C y 5 h con un poder calorífico de 13.43 MJ/kg. Finalmente, para el análisis técnico-económico el VPN, como indicador de rentabilidad, el escenario 3 mostró un mejor valor en comparación con la producción de hidrochar de los otros 2 escenarios.

ABSTRACT

“Technical-economic analysis of a supply chain proposal for the production of hydrochar from a complex organic waste”

By: I.Q. Nadia Polet Amaro Arcos

Advisor(s): Dr. Erik Samuel Rosas Mendoza

Dr. Alejandro Alvarado Lassman

At present, the use of green energy, or clean as it is also known, has increased because it comes from renewable sources and is friendly to the environment, as well as not generating CO₂ emissions into the atmosphere. That is why the hydrothermal carbonization process (HTC) is proposed as a method of use for urban solid waste (MSW), especially the organic part, preventing it from being taken to landfills in addition to creating a biofuel (hydrochar). that can replace fossil fuels and cover part of the energy demand in industrial processes. During this research, the technical-economic analysis of a supply chain proposal for the production of hydrochar through hydrothermal carbonization of a complex organic residue (COR) was carried out.

For the proposal of the conceptual model, the links of 1) supply were identified: the parties involved in obtaining the COR, 2) production: the equipment used to obtain the hydrochar and 3) distribution: movement of the hydrochar until it reaches the end user. . As for the COR, it was obtained from the "ECORI" solid waste separation plant. The COR had to be separated manually to eliminate the greatest amount of inorganic residue and once conditioned, it was moistened because it presented a low humidity of 76.01%. During the HTC process, the following operating conditions of 200 and 240 °C with times of 3 and 5 h were used. Once the HTC process was finished, it was necessary to dry the obtained hydrochar, which was dried for approximately 1 hour at 105 °C. Subsequently, proximal analysis (pH, humidity, ash, total solids and volatile solids), elemental analysis, determination of functional groups (FTIR) and chemical

composition (RAMAN, XRD) were performed on the dry hydrochar.

Consequently, from the dry hydrochar the following values were obtained for the HTC with a time of 3 h and 200 °C, a pH of 6.09 ± 1.82 , humidity (%) 0.39 ± 0.78 , ST (%) 96.07 ± 0.39 , SV (%) 50.82 ± 1.84 and ashes (%) 49.18 ± 1.84 . Finally, for the HTC process, 5 h and 200 °C, the following data were obtained: a pH of 6.13 ± 2.1 , humidity (%) 5.48 ± 0.16 , ST (%) 98.51 ± 0.16 , SV (%) 33.38 ± 2.09 and ashes (%) 66.62 ± 2.09 . For the elemental analysis, the hydrochar obtained from the lowest time and temperature obtained the following data, for carbon (%) 22.46 ± 3.27 , hydrogen (%) 2.60 ± 0.63 , oxygen (%) of 73.73, nitrogen (%) 0.98 ± 0.23 and sulfur (%) 0.20 ± 0.10 . On the other hand, for the highest temperature and time an increase in carbon (%) 38.47 ± 2.37 , hydrogen (%) 4.49 ± 0.17 , oxygen (%) 54.77, nitrogen (%) 2.08 ± 0.14 and sulfur (%) 0.16 is observed. ± 0.00 . In addition, for the determination of functional groups and chemical composition, no analysis indicated the complete formation of carbon, in some spectra the beginning of band formation can be observed. On the other hand, for the technical-economic analysis, three scenarios were selected for a comparison and selection of the most useful scenario. The first scenario, taking into account the tons of COR that ECORI processes, had a net present value (NPV) of 51.64 M, the second, increasing the available COR by 25%, obtained a NPV of 68.39 M, and finally the maximum processing capacity of COR that can separate the ECORI plant which reached a value of 110.62 M.

Therefore, it is concluded that the best temperature and time was 240 °C and 5 h with a calorific value of 13.43 MJ/kg. Finally, for the technical-economic analysis, the NPV, as an indicator of profitability, scenario 3 showed a better value compared to the hydrochar production of the other 2 scenarios.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABLAS	vi
NOMENCLATURA	viii
INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS	3
CAPÍTULO 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	3
1.1 Cadena de suministro	3
1.1.1 Conformación de una cadena de suministro	3
1.1.2 Gestión de una cadena de suministro	4
1.1.3 Cadena de suministro de procesos	5
1.1.4 Incertidumbre en cadena de suministro a partir de biomasa	5
1.2 Evaluación técnico-económica.....	7
1.2.1 Tasa interna de retorno	8
1.2.2 Valor actual neto.....	9
1.2.3 Relación costo-beneficio	9
1.3 Clasificación de residuos.....	10
1.3.1 Generación de residuos en Orizaba, Veracruz	11
1.3.2 Residuo orgánico complejo	12
1.3.4 Planta Separadora y Trituradora de Residuos Orgánicos y Sólidos (ECORI)	13
1.4 Proceso de carbonización hidrotérmica.....	14
1.4.1 Variables involucradas en la carbonización hidrotérmica.....	14
1.4.2 Productos resultante de la CHT	16
1.4.3 Etapas de la carbonización hidrotérmica	17
1.4.4 Características del hidrochar.....	19
1.4.5 Ventajas y desventajas de la CHT	20
1.4.6 Aplicaciones del hidrochar.....	20
1.5 Antecedentes.....	22
CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS	30
2.1 Modelo preliminar de la cadena de suministro	30
2.1.1 Preparación de diagrama preliminar de bucle causal.....	31
2.2 Obtención y acondicionamiento del ROC.....	32
2.3 Proceso de la carbonización hidrotérmica.....	33
2.3.1 Carbonización hidrotérmica de los ROC	33

2.4 Análisis proximal del residuo orgánico complejo antes y después de la CHT	34
2.4.1 Determinación de humedad	35
2.4.2 Determinación de cenizas	35
2.4.3 Determinación de pH	36
2.4.4 Determinación de Sólidos Totales.....	36
2.4.5 Determinación de Sólidos Volátiles.....	36
2.5 Composición química.....	37
2.5.1 Difracción de rayos X (DRX)	37
2.5.2 Análisis RAMAN	37
2.6 Determinación de grupos funcionales.....	38
2.6.1 Análisis FT-IR	38
2.7 Análisis elemental.....	38
2.7.1 Análisis de poder calorífico superior	38
2.8 Análisis técnico-económico de la cadena de suministro	39
2.8.1 Estimación de costos y flujos de efectivo.....	40
2.9 Determinar distintos escenarios técnico-económico	44
2.10 Evaluar tendencias en la producción de hidrochar.....	44
CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	46
3.1 Modelo preliminar de la cadena de suministro	46
3.2 Análisis proximal del residuo orgánico complejo.....	49
3.3 Proceso de la carbonización hidrotérmica.....	51
3.3.1 Balance energético del proceso de la CHT	52
3.3.2 Análisis de los costos energéticos de la CHT	53
3.4 Análisis proximal del hidrochar	55
3.5 Composición química.....	59
3.5.1 Difracción de rayos X.....	59
3.5.2 Análisis RAMAN	60
3.6 Determinación de grupos funcionales.....	61
3.6.1 Análisis FTIR.....	61
3.7 Análisis elemental.....	62
3.7.1 Análisis de poder calorífico superior	63
3.8 Análisis técnico-económico de la cadena de suministro	64
3.8.1 Flujos de efectivo.....	68
CONCLUSIONES.....	72
RECOMENDACIONES	74

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75
---------------------------------	----

LISTA DE FIGURAS

Figura	Descripción	Pág.
1.1	Partes que forman una cadena de suministro	3
1.2	Incertidumbre de abastecimiento-demanda en una cadena de suministro	6
1.3	Diseño básico de los flujos de efectivo anuales	8
1.4	Mapa del municipio de Orizaba, Veracruz	11
1.5	Promedio de recolección de residuos sólidos urbanos diario	12
1.6	Planta separadora de RSU	13
1.7	Proceso de la CHT, materias primas, condiciones y productos	14
1.8	Productos el proceso CHT	17
1.9	Etapas de la carbonización hidrotérmica	18
1.10	Número de publicaciones relacionadas con la aplicación de combustible y energía del hidrocarbón	21
2.1	Metodología utilizada en la investigación	30
2.2	Planta separadora de residuos sólidos ECORI	33
2.3	Reactor de hidrocarbonización con teflón.	33
2.4	Partes del reactor para la CHT	34
2.5	Procedimiento para el análisis técnico-económico	40
3.1	Propuesta de la cadena de suministro para la producción de hidrochar	46
3.2	Diagrama causal de la propuesta de CS para la producción de hidrochar	48
3.3	Hidrochar húmedo y seco	55
3.4	Resultados de pH del hidrochar	56
3.5	Resultados de humedad del hidrochar	56
3.6	Resultados de sólidos totales del hidrochar	57
3.7	Resultados de sólidos volátiles del hidrochar	57
3.8	Resultados de cenizas del hidrochar	58

3.9	Análisis de rayos X de los hidrochar	60
3.10	Espectroscopia de Raman de los hidrochar	61
3.11	Análisis FTIR para los hidrochar	62
3.12	Inflación general	70
3.13	Riesgo de invertir en México	71

LISTA DE TABLAS

Tabla	Descripción	Pág.
1.1	Rangos de temperatura de reacción utilizados en el proceso de carbonización hidrotermal de diferentes biomasa	15
1.3 a)	Evolución del estado del arte empleando distintos parámetros para la obtención de hidrochar	28
1.3 b)	Continuación de la evolución del estado del arte empleando distintos parámetros para la obtención de hidrochar	29
3.1	Análisis proximal del ROC	50
3.2	Análisis proximal del ROC humedecido	51
3.3	Rendimiento del hidrochar	51
3.4	Balance energético de la CHT	52
3.5	Costos por transporte y disposición de ROC	53
3.6	Datos para análisis de costos operativos a nivel laboratorio	54
3.7	Costos energéticos para producir hidrochar	54
3.8	Relación de costos de combustible y su poder calorífico	55
3.9	Análisis elemental del hidrochar	63
3.10	Poder calorífico superior del hidrochar	64
3.11	Cálculo detallado para costos de equipo	65
3.12	Costos de adquisición y flujos máxicos de equipos	65
3.13	Costos de equipos instalados	66
3.14	Costo total directo	66
3.15	Costos indirectos.	67
3.16	Inversión de capital total para el proceso de CHT	67
3.17	Suposiciones para estimar flujos de efectivo	68
3.18	Flujos netos de efectivo escenario 1	69
3.19	Flujos netos de efectivo escenario 2	69
3.20	Flujos netos de efectivo escenario 3	70

3.21	Valor presente neto para los tres escenarios	71
------	--	----

NOMENCLATURA

Abreviatura	Significado
°C	Grados Celsius
%	Porcentaje
CHT	Carbonización hidrotermal
CO ₂	Dióxido de carbono
CS	Cadena de suministro
DRX	Difracción de rayos X
FTIR	Infrarrojo por transformada de Fourier
g	Gramo
h	Hora
kg	Kilogramo
m:m	Relación masa masa
mg	Miligramo
MJ	Megajoules
MXN	Moneda nacional mexicana
PCS	Poder calorífico superior
ROC	Residuos orgánico complejo
RSU	Residuos sólidos de urbanos
ST	Sólidos totales
SV	Sólidos volátiles
TIR	Tasa interna de retorno
VPN	Valor presente neto

INTRODUCCIÓN

La energía es fundamental para todos los sectores de la economía de un país y su demanda está aumentando por el 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 (Bardham *et al.*, 2021). Por su parte, los residuos sólidos urbanos (RSU) presentan un problema ambiental, pero con el adecuado manejo y separación la parte orgánica es un recurso renovable que puede ser susceptible para su aprovechamiento, representan los materiales biológicos de plantas o animales y sus desechos (Yuan *et al.*, 2021). Un residuo orgánico complejo (ROC) es aquel que se compone de restos de comida, desechos verdes, trazas de material inorgánico como cartón, papel, vidrio, piedras y material plástico. Los residuos pueden ser generadores de energía y así reutilizar la biomasa, encontrar un nuevo uso a estos residuos permite darle un valor agregado y a su vez tener una economía circular.

Por su parte, los procesos termoquímicos son una opción viable que permiten obtener un producto para ser utilizado como un biocombustible sólido a partir de diferentes biomásas. La pirólisis y gasificación son procesos que requieren un producto con un proceso previo de secado, lo que se ve reflejado en costos extras, en comparación con la carbonización hidrotérmica (CHT). La CHT es un proceso de conversión termoquímica que valoriza a los ROC, permite el procesamiento de los residuos en un medio acuoso de agua subcrítica a temperaturas entre 200 y 300 °C y presiones autógenas entre 2 y 10 MPa (González-Arias *et al.*, 2021). El hidrochar (fase sólida) es el principal producto resultante de la CHT (Castro *et al.*, 2020). Además, los productos resultantes de la CHT son un hidrocarburo sólido, un agua de proceso rica en carbono y compuestos orgánicos (Aragón-Briceño *et al.*, 2020).

Con respecto a la logística, esta es una herramienta en la organización, se entiende como un conjunto de estrategias que permiten conocer todos los aspectos

involucrados en una cadena de suministro y con una gestión adecuada se puede minimizar costos. Esta se conoce como una agrupación de medios de distribución, lugares y acciones necesarias para la comercialización de un servicio o producto que va desde la obtención de la materia prima hasta que es entregado al usuario final. La cadena de suministro comprende la producción del hidrochar a partir de los ROC hasta que el biocombustible sólido es entregado al cliente final un manejo apropiado de la CS incrementa el nivel de competitividad y en consecuencia su rentabilidad.

El presente trabajo tiene como objetivo realizar el análisis de la cadena de suministro para la producción de hidrochar, a partir de un análisis técnico-económico, el cual indicará que tan rentable es utilizar esta tecnología de conversión de un residuo orgánico complejo (ROC), proveniente de la planta de separación de residuos sólidos (ECORI) con el fin de utilizarlo como biocombustibles en los hornos de una empresa cementera de la región.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Realizar el análisis técnico-económico de una propuesta de cadena de suministro para la producción de hidrochar mediante carbonización hidrotérmica de un residuo orgánico complejo (ROC).

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Desarrollar la propuesta del modelo conceptual de la cadena de suministro del hidrochar elaborado a partir de un residuo orgánico complejo.
2. Validar las mejores condiciones operativas de la carbonización hidrotérmica para la producción de hidrochar a partir de un residuo orgánico complejo.
3. Realizar un análisis técnico-económico de la propuesta de cadena de suministro para la producción de hidrochar.
4. Elaborar y evaluar escenarios técnico-económicos para observar tendencias en la producción de hidrochar.

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

CAPÍTULO 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 Cadena de suministro

Una cadena de suministro es un sistema formado por diferentes entidades, que agregan valor desde las fuentes de recursos originales a los productos finales mientras se intercambia información sobre el mercado y producción (Ishii y Ohba, 2018). La cadena de suministro tiene como objetivo explotar distintas oportunidades para productos nuevos o ya existente y optimizar los costos para obtener una máxima utilidad, a su vez las necesidades de los clientes se verán cumplidas.

1.1.1 Conformación de una cadena de suministro

Dicha cadena de suministro, está formada por tres partes generales las cuales son el abastecimiento, producción y por último la distribución, donde encontramos entidades como proveedores de materia prima, fabricantes, transportistas, distribuidores, ventas y por último el cliente como se puede observar en la Figura 1.1 un ejemplo general de una cadena de suministro.

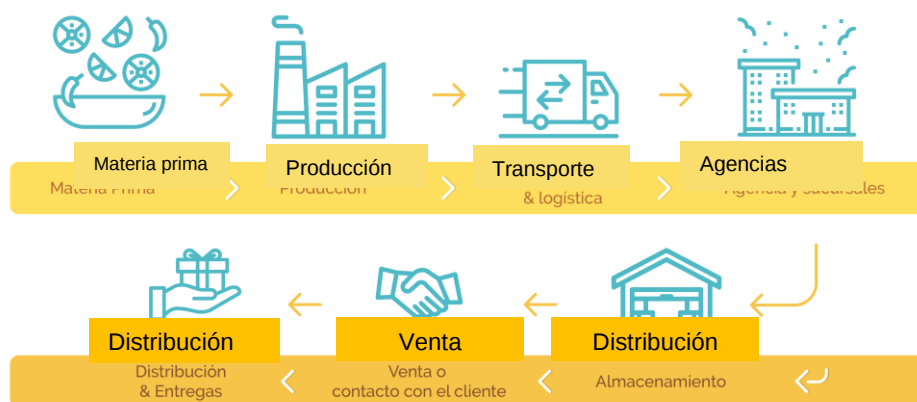


Figura 1.1 Partes que forman una cadena de suministro (Beristain, 2018).

Los flujos de información, retroalimentación, de mercado, producción y fondos que se dan a lo largo de la cadena de suministro, buscan coordinar de forma integral pues existen grandes posibilidades de potenciar y mejorar la asistencia al cliente y paralelamente los beneficios para toda la cadena se incrementaran si dichos flujos se administran de manera integrada (Solís, 2018).

La parte de la cadena de suministro en donde se encuentra el eslabón de producción en esta se involucran a todos los encargados de realizar un cambio a al elemento básico o primario, en los distintos productos que saldrán a distribución. En esta etapa encontramos diferentes actores sociales desarrollando el proceso productivo. Donde se involucra la organización y planificación de los factores de producción, como lo es el control de inventarios, turnos laborales, traspaso del producto, también la descripción y análisis de los procesos y actividades relacionadas con el proceso productivo (Nugent, 2019).

Los cumplimientos a los requerimientos del cliente son un factor importante para una eficiente cadena de suministro. Bajo esta afirmación, lograr entregar todos los pedidos solicitados, stock necesario en el tiempo y lugar adecuados se vuelve importante. Por esta razón, para cumplir con este objetivo se necesita de un proceso eficiente que integre a los eslabones de fabricación, distribución y transporte. Para alcanzar lo anterior, se necesitará crear acuerdos con los involucrados claves de la cadena de suministro y en particular con los de distribución y logística para alcanzar las necesidades del cliente y de esta manera tener una reducción en los costos referentes a la distribución (Jiménez-Sánchez y Hernández-García, 2002).

1.1.2 Gestión de una cadena de suministro

La gestión de la cadena de suministro se ocupa de la integración eficiente de las entidades para que los productos se obtengan, fabriquen y distribuyan en las cantidades correctas, a los lugares correctos y en el momento correcto, satisfaciendo

así los requisitos del cliente en mínimo costo total del sistema. El manejo de la cadena de suministro es complejo debido a la implicación de una gran multiplicidad de flujos de material e información (Barbosa y Pinto, 2018).

1.1.3 Cadena de suministro de procesos

Las cadenas de suministro de procesos se ocupan de redes químicas y/o de base biológica que involucran un conjunto de entidades, materiales e información que transforman las materias primas en productos finales utilizando diferentes tipos de procesos de transformación. Entre estas cadenas de suministro, existen varios ejemplos como es el caso de las cadenas de suministro de petróleo, farmacéuticas, biomasa y gas.

Dentro de la industria de proceso, las cadenas de suministro de procesos deben ser flexibles, resilientes y eficientes al mismo tiempo garantizar las demandas de los clientes a costos mínimos. Además, dado que la industria de procesos a menudo se asocia con un alto nivel de recursos de consumo y a menudo se ocupan de procesos y productos no amigables con el medio ambiente. Se requiere especial atención a la sostenibilidad de la cadena de suministro cuando se gestionan dichos sistemas (Barbosa y Pinto, 2018).

1.1.4 Incertidumbre en cadena de suministro a partir de biomasa

Las cadenas de producción basadas en biomasa tienen características específicas que hacen que la consideración de la incertidumbre en las prácticas de diseño y gestión sea desafiante y más complicada en comparación con las cadenas de producción típicas basadas en fuentes no renovables. Estas características son principalmente, la estacionalidad de las fuentes de biomasa y las fluctuaciones en la producción de biomasa, debido a las condiciones naturales, como la calidad del suelo, la variabilidad del clima, las plagas y enfermedades, la caducidad y la degradación de las fuentes de

biomasa y las perturbaciones relacionadas con el suministro (Balaman, 2018).

Además, los mercados de biomasa y bioproductos son relativamente jóvenes en comparación con otros mercados. Estas características hacen que las cadenas de producción basadas en biomasa sean más vulnerables y volátiles que las cadenas de producción típicas, y son sensibles a las fluctuaciones de los factores económicos y financieros. Además, las prácticas recientes en las cadenas de suministro internacionales basadas en biomasa, como las nuevas estrategias de marketing debido a la mayor competencia con los sistemas basados en energías no renovables y el diseño integrado de sistemas a gran escala, han aumentado la complejidad y la incertidumbre en el diseño y la gestión de las cadenas de producción basadas en biomasa, lo que hace más crítica la aplicación de estrategias de toma de decisiones bajo incertidumbre. El conocer la incertidumbre permite optimizar toda la cadena de suministro por ejemplo para el caso del abastecimiento y la demanda como se muestra en la Figura 1.2.

		INCERTIDUMBRE DE LA DEMANDA	
		BAJA (Prod. Funcionales)	ALTA (Prod. Innovadores)
INCERTIDUMBRE DEL ABASTECIMIENTO	BAJA (Proc. Estables)	Cadenas de Suministro EFICIENTES ■ Foco en reducción de costos. ■ Eliminar procesos de que no agregan valor.	Cadenas de Suministro RESPONSIVAS ■ Foco en detección de cambios en demanda. ■ Asegurar respuesta rápida: postponement.
	ALTA (Proc. Cambiantes)	Cadenas de Suministro de RIESGOS COMPARTIDOS ■ Trabajar con múltiples proveedores. ■ Compartir información para mejorar visibilidad.	Cadenas de Suministros ÁGILES ■ Reducir la incertidumbre. ■ Búsqueda de resiliencia (múltiples proveedores, stocks de emergencia, etc.) ■ Foco en detección temprana de cambios en tendencia de la demanda.

Figura 1.2 Incertidumbre de abastecimiento-demanda en una cadena de suministro (Contreras, 2020).

Especialmente en los últimos años, un gran número de investigaciones y publicaciones relacionadas han señalado la importancia de tomar decisiones de diseño y gestión, considerando una amplia gama de incertidumbres que enfrentan las cadenas de suministro del mundo real, debido a objetivos incompletos y/o información no disponible sobre la cadena de suministro o su entorno. Algunos de los problemas graves causados por las incertidumbres no acomodadas en las cadenas de suministro se pueden enunciar de la siguiente manera (Balaman, 2019):

- Aumento en los costos de las actividades de la cadena de suministro, como costos de transporte y logística, costos operativos, costos de inversión, costos de compra, etc.
- Exceso de tiempo de respuesta a variaciones en el sistema, lo que ralentiza la respuesta a cambios en las demandas y disminuye la satisfacción de los clientes.
- Efecto de látigo, ya que existen varias instalaciones vinculadas en la cadena de suministro que afectan el desempeño de cada una,
- Dificultades en el control preciso del inventario.

1.2 Evaluación técnico-económica

El análisis técnico-económico es un enfoque metodológico para analizar el rendimiento técnico y económico de un proceso, producto o sistema de productos (Mahmood *et al.*, 2016). Los aspectos económicos son de gran importancia porque las decisiones relacionadas con la puesta en marcha métodos, tecnologías, prácticas y sistemas de gestión de RSU en la actualidad están restringidas por limitaciones económicas (Seguí-Amórtegui, 2014). Existen diferentes métodos para hacer este análisis, a continuación se mencionan los más utilizados:

1.2.1 Tasa interna de retorno

La tasa interna de retorno (TIR) es una herramienta ampliamente utilizada para clasificar proyectos de presupuestos de capital y decisiones eventuales de aceptación o rechazo. Su definición tiene sus raíces en los procedimientos de flujo de efectivo descontado, una metodología que se utiliza para ponderar los flujos de efectivo que ocurren en el momento presente de alguna manera racional para representar su valor en relación con los flujos de efectivo futuros en años después. Cuando se combina con el valor presente neto (VPN), la TIR forma la segunda medida necesaria de rentabilidad.

La TIR también es importante para la evaluación del nivel superior de la tasa de interés de los fondos prestados (crédito). En consecuencia, cuanto mayor sea el valor de la TIR, más posibilidades existen de encontrar la cantidad requerida de fondos de inversión en el mercado. Cuanto más alto es el valor de la TIR, más positivo parece ser el valor del VPN y más estable es el proyecto (menores riesgos). En el caso general, el valor de la TIR se puede determinar mediante un cálculo numérico iterativo. En un caso particular, cuando los costos e ingresos anuales son constantes, como se muestra en la Figura 1.3 ejemplo de una central eléctrica, existe una relación analítica entre la tasa interna de retorno y los parámetros técnicos y financieros del reactor que encontramos usando las relaciones.

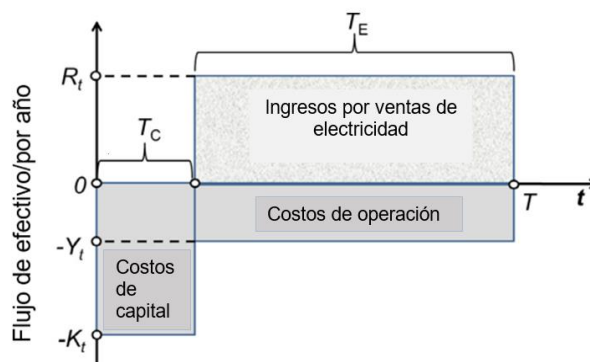


Figura 1.3 Diseño básico de los flujos de efectivo anuales (Mahmood *et al.*, 2016).

1.2.2 Valor actual neto

El Valor Presente Neto (VPN) es un criterio ampliamente conocido para evaluar operaciones, inversiones y decisiones financieras de negocios. Los estudios ambientales utilizan regularmente el valor actual neto (VPN) para valorar los beneficios y costos de los proyectos. Se calcula como la suma de los flujos de efectivo anuales netos durante la vida del proyecto.

El VPN se ha convertido así en un concepto estándar para representar y modelar las preferencias económicas en la ciencia ambiental, pero los estudios rara vez consideran bajo qué circunstancias este concepto es económicamente apropiado y qué alternativas existen. Facilita los análisis de costo-beneficio al comparar diferentes flujos de beneficios y costos entre varios proyectos. Se basa en el descuento para calcular los valores presentes de los beneficios netos futuros, de modo que los beneficios.

1.2.3 Relación costo-beneficio

El principal criterio económico utilizado para presentar los resultados de la evaluación económica de las tecnologías de energía renovable es la relación costo/beneficio. Esto se enfoca en el beneficio neto por unidad de inversión en obras de capital y es aplicable cuando el dinero para la inversión de capital es la principal limitación (Ishii y Ohba, 2018). Este criterio es consistente con el principio fundamental de minimizar el costo total de satisfacer la demanda de energía eléctrica. Para fines de presentación, tiene la ventaja sobre el valor presente neto de reducir la comparación de beneficios y costos a un número pequeño en lugar de una gran cantidad de dinero. Da una guía justa para la clasificación de las inversiones. Su uso en el presente análisis también hace que los datos de la Revisión Estratégica sobre otras fuentes de energía renovable estén directamente disponibles para compararlos con la energía de las olas.

Una relación costo/beneficio implica que la inversión es económicamente aceptable;

sin embargo, puede haber opciones de inversión más atractivas. Al igual que con el VPN, seguir adelante con estas opciones más atractivas puede reducir la relación costo/beneficio. Esta es una consideración particularmente importante para la energía de las olas, ya que su economía es notablemente menos atractiva que otras fuentes de energía renovables y convencionales (Mahmood *et al.*, 2021).

1.3 Clasificación de residuos

Los residuos son aquellos productos o materiales que su propietario o dueño excluye y se pueden encontrar en diferentes estados, por ejemplo: líquido, sólido o semisólido o gaseoso y que están contenidos en recipientes, depósitos o dejados en lugares públicos; los cuales pueden requerir algún tratamiento físico, químico o necesitar llegar a un lugar para su disposición final, también pueden ser susceptibles de ser valorizados (SEMARNAT, 2003).

Estos residuos se pueden clasificar en tres principales grupos según la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos:

- **Residuos Peligrosos:** Son los cuales posean alguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o que incluyan agentes infecciosos que los clasifiquen como peligrosos, abarcan también envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados cuando se movieron de un lugar a otro.
- **Residuos de Manejo Especial:** Son aquellos obtenidos en los procesos productivos, que no cumplen con las similitudes para ser clasificados como residuos sólidos urbanos o como peligrosos, o que son creados por grandes generadores de residuos sólidos urbanos.

- **Residuos Sólidos Urbanos:** Son los obtenidos de las actividades relacionadas al hogar, que son los referentes a la eliminación de los materiales que se utilizan en acciones domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los RSU que se originan de cualquier otra actividad dentro de comercios o en la vía pública que genere residuos con características similares a las domiciliarias, y los generados de la limpieza de las vías y lugares públicos.

1.3.1 Generación de residuos en Orizaba, Veracruz

Orizaba es un municipio del estado de Veracruz está ubicado en la región central del Estado. Limita al norte con Ixhuatlancillo, Mariano Escobedo, Atzacan e Ixtaczoquitlán; al este con Ixtaczoquitlán; al sur con Ixtaczoquitlán, Rafael Delgado, Huiloapan de Cuauhtémoc y Río Blanco; al oeste con Río Blanco e Ixhuatlancillo, como se observa en la Figura 1.4.

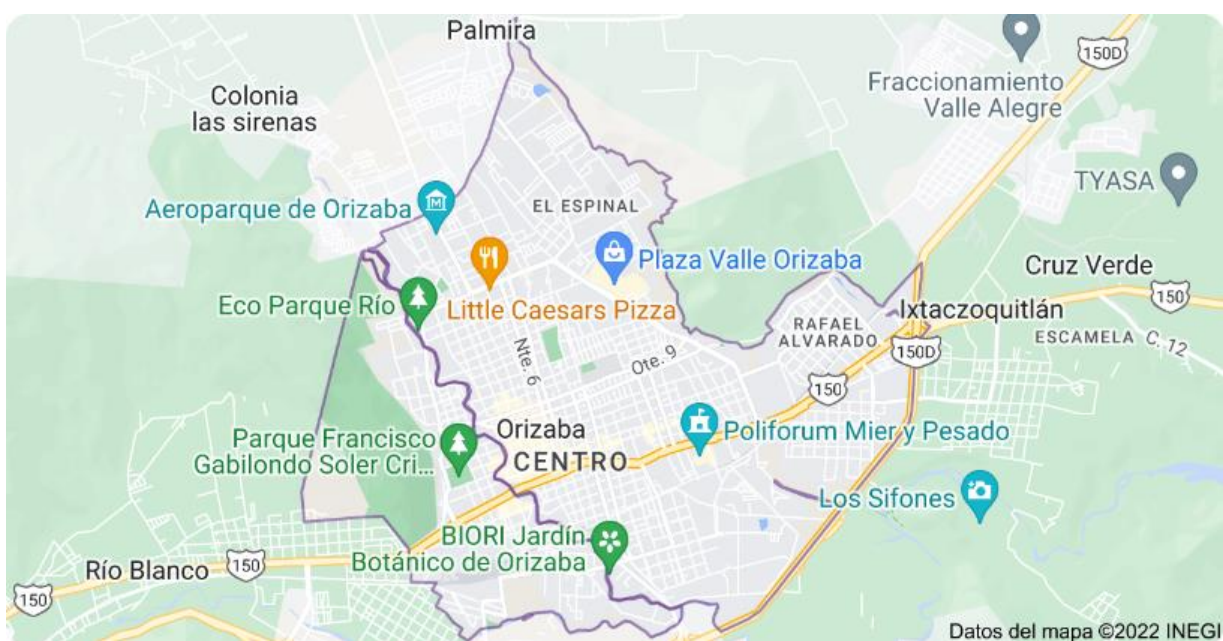


Figura 1.4 Mapa del municipio de Orizaba, Veracruz (Google, s.f.).

La SEMARNAT señala que se generan 43.84 millones de toneladas de residuos sólidos urbanos al año en México; el estado de Veracruz produce el 6.5 % de los

residuos sólidos urbanos del país con 2 millones 851 mil 745 toneladas por año y el municipio de Orizaba genera 30 mil toneladas (Hernandez, 2020). En la siguiente Figura 1.5 se puede observar la cantidad de toneladas por día de RSU en diferentes años. Del total de estos residuos sólidos urbanos, los del tipo domiciliario, representan el 85 % y los de otras fuentes asociados a los RSU (comercios y servicios principalmente) el 15.00 % (SEMARNAT, 2020).

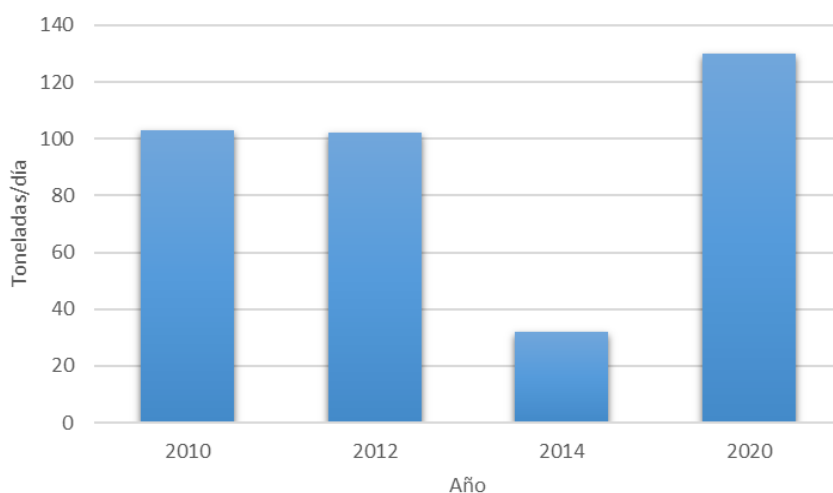


Figura 1.5. Promedio de recolección de residuos sólidos urbanos diario (INEGI, 2014; DBGIR, 2020).

1.3.2 Residuo orgánico complejo

Un residuo orgánico complejo es aquel obtenido de las casas habitaciones y de fuentes similares a los RSU, la composición de este es variada se compone principalmente de restos de comida y restos vegetales de origen domiciliario, podemos encontrar pedazos de madera, cartón, vidrio, plástico en pequeñas cantidades.

Por su complejidad es necesario encontrar una alternativa viable y con un beneficio ambiental, económico y social a la disposición final de estos residuos. Un problema importante asociado con la descomposición de residuos es la liberación de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono y el metano a la atmósfera. Sin embargo, con el uso de tecnologías de tratamiento adecuadas, los residuos podrían

convertirse en productos energéticos. Una limitación importante de las tecnologías de conversión es que su rendimiento se ve obstaculizado por el alto contenido de humedad (Mahmood *et al.*, 2016).

1.3.4 Planta Separadora y Trituradora de Residuos Orgánicos y Sólidos (ECORI)

La planta ECORI permite separar los residuos sólidos urbanos, en sus componentes orgánicos e inorgánicos mediante tecnología austriaca que utiliza una maquinaria con alta tecnología, el gobierno de Orizaba prevé un beneficio del 85 por ciento de los 10 millones de pesos que destina anualmente en el manejo y tratamiento de los RSU. Una vez separados estos residuos sólidos urbanos serán entregados a la empresa Geocycle S.A. de C.V. y posteriormente a una cementera de la región para la generación de biocombustible. Serán alrededor de 130 toneladas al día de residuos que se procesen donde el 65 % aproximadamente son destinados a la generación de energía y ocupados en la producción de cemento (Estrada, 2020).



Figura 1.6 Planta separadora de RSU (San Juan, 2016).

En la actualidad, existe una tendencia al reciclaje de residuos como el método más respetuoso con el medio ambiente no solo para convertir residuos sino también para generar energía. Los residuos pueden reciclarse en combustibles convirtiéndose en una fuente de energía renovable (Krysanovaa *et al.*, 2018). Estos residuos pueden ser

transformados para su aprovechamiento mediante procesos termoquímicos como lo es la carbonización hidrotérmica.

1.4 Proceso de carbonización hidrotérmica

La carbonización hidrotérmica es un proceso de conversión termoquímica con los principales propósitos de convertir los componentes de carbohidratos de una biomasa en material rico en carbono en un medio acuoso. Esta ocurre en medios térmicos o agua comprimida caliente a temperaturas en el rango de 180 a 260 °C (Castro *et al.*, 2020) es particularmente útil para los desechos húmedos (Saha *et al.*, 2021).

Se producen tres componentes de este proceso como se muestra en la Figura 1.7 un gas de síntesis en menor cantidad, líquido o bioaceite, un hidrochar con propiedades similares a las del carbón convencional y, además de aguas de proceso, dependiendo de la temperatura y presión del proceso (Aragón-Briceño *et al.*, 2020) es particularmente útil para los desechos húmedos (Saha *et al.*, 2021).

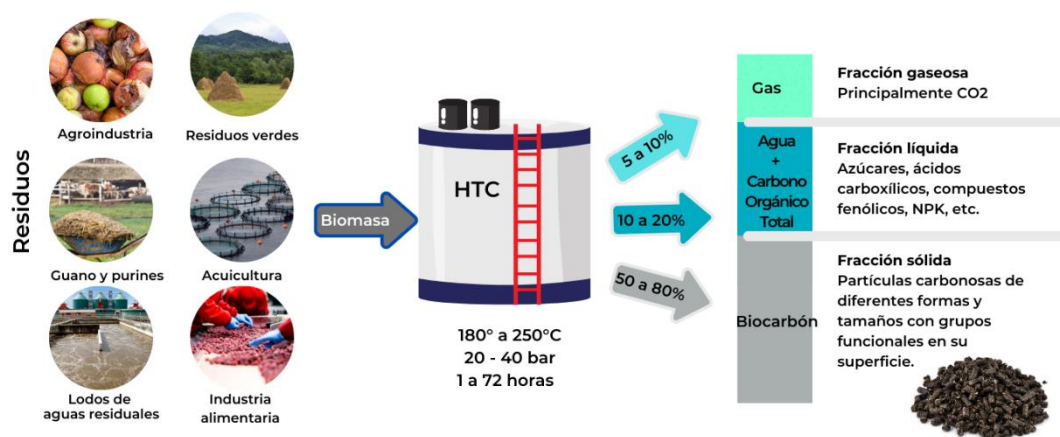


Figura 1.7 Proceso de la CHT, materias primas, condiciones y productos (Pizarro, 2019).

1.4.1 Variables involucradas en la carbonización hidrotérmica

Seleccionar los parámetros de temperatura y tiempo adecuados para el proceso de la

carbonización hidrotérmica permite no solo obtener un hidrochar con características deseadas, si no también permite minimizar los costos energéticos y de producción.

- **Influencia de la temperatura**

La temperatura es una de las principales variables en la carbonización hidrotérmica, y que influye significativamente en el proceso de conversión de biomasa a partir de la degradación de los componentes estructurales. Este proceso ocurre debido a la ruptura de los enlaces químicos de los componentes estructurales de la biomasa, lo que ocurre por la acción conjunta de reacciones hidrotermales como consecuencia de la temperatura. Como se discutió anteriormente, cada componente se ve afectado individualmente porque sufren degradación en diferentes rangos de temperatura. La literatura reporta valores de temperatura entre 175 y 300 °C para diferentes tipos de biomasa, como se muestra en la Tabla 1.1. Generalmente, temperaturas entre 150 y 200 °C favorecen la formación de productos sólidos.

Tabla 1.1 Rangos de temperatura de reacción utilizados en el proceso de carbonización hidrotermal de diferentes biomásas.

Biomasa utilizada	Temperatura (°C)
Tallo de tabaco	180, 200, 220, 240, 260
Corteza de eucalipto	220, 240, 275, 300
Cáscara de sandía	190, 260
Orujo de aceituna	180, 200, 215, 230, 250
Pino	180, 220, 240
Cáscara de coco y de arroz	140, 160, 180, 200

Según algunos autores, cuanto mayor sea la temperatura, mayor será la carbonización y más intensas serán las reacciones de deshidratación y descarboxilación, mencionan que la temperatura de reacción tiene un efecto lineal en relación con el contenido de carbono. Estas condiciones también afectarán el rendimiento de los productos líquidos

y gaseosos (Pacheco-Antero *et al.*, 2019).

Algunos estudios han informado una disminución en el rendimiento del hidrochar con el aumento de la temperatura. Sevilla y Fuertes (2009) observaron un aumento en el rendimiento de microesferas de hidrochar secundarias derivadas de glucosa de 1.5 a 36 % cuando la temperatura aumentó de 170 a 230 °C y de 5.1 a 25 % para hidrochar derivado de almidón cuando la temperatura aumentó de 180 a 230 °C.

- **Influencia del tiempo**

El tiempo de residencia es una variable importante que afecta los productos finales del proceso de carbonización. Aumento del tiempo de contacto disminuye deliberadamente el rendimiento de hidrochar. Al aumentar el tiempo de residencia de 1 h a 5 h, diferentes estudios demuestran que el rendimiento de carbón obtenido disminuyó bruscamente. La carbonización hidrotérmica ocurre en un período relativamente lento. Publicaciones actuales reportan respuestas en procesos que ocurre en un intervalo de tiempo entre 30 min y 12 h, y los tiempos de residencia de 1 y 2 h son los más utilizados (Pacheco-Antero *et al.*, 2019).

1.4.2 Productos resultante de la CHT

Como resultado de este proceso, un sólido rico en carbono y denso en energía se forma el material, se puede observar en la siguiente Figura 1.8. Este producto sólido, a menudo denominado hidrochar, ha ganado un estudio considerable, ya que sus propiedades lo hacen apto para su uso en una variedad de aplicaciones ambientalmente relevantes aplicaciones, incluso como enmienda del suelo, fuente de energía.

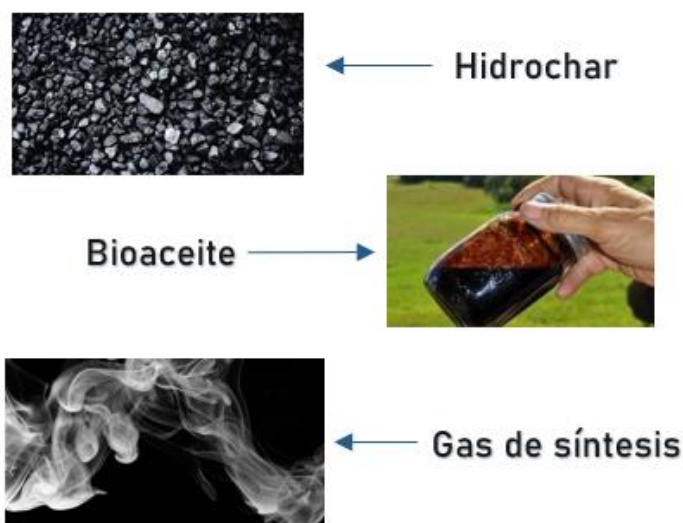


Figura 1.8. Productos el proceso CHT (Elaboración propia).

El material resultante de una reacción de CHT generalmente comprende en tres componentes: en primer lugar, el producto de hidrocarburo sólido rico en carbono; en segundo lugar, constituyente líquido conocido como bioaceite; y, en tercer lugar, una pequeña cantidad de gas llamado gases de síntesis, es decir, CH_4 , CO , CO_2 (Bardhan *et al.*, 2021).

1.4.3 Etapas de la carbonización hidrotérmica

La compleja reacción que tiene lugar durante la CHT es exotérmica por naturaleza, que es una combinación de reacción de deshidratación y descarboxilación (Maqhuzu *et al.*, 2019). Durante este proceso, tanto el contenido de oxígeno como el de hidrógeno de la alimentación (descrito por la relación molecular O/C y H/C) se reducen mediante cinco reacciones principales que a continuación se describen y se observan en la Figura 1.9:

- **Hidrólisis:** La hidrólisis forma parte de un tipo grande de reacciones químicas llamadas reacciones de desplazamiento nucleofílico en las que un nucleófilo (especie rica en electrones con un par de electrones no compartido) combate a

un electrófilo (deficiente en electrones), donde se dividen en un enlace covalente para formar uno nuevo (Speight, 2018).

- **Deshidratación:** La síntesis de la deshidratación es la obtención de moléculas más grandes de monómeros más chicos donde se suelta una molécula de agua. Esto se puede ocupar en la creación de polímeros sintetizados tales como tereftalato de polietileno, o la obtención de moléculas biológicas grandes tales como polímeros y triglicéridos del hidrato de carbono (Yokoyama, 2020).

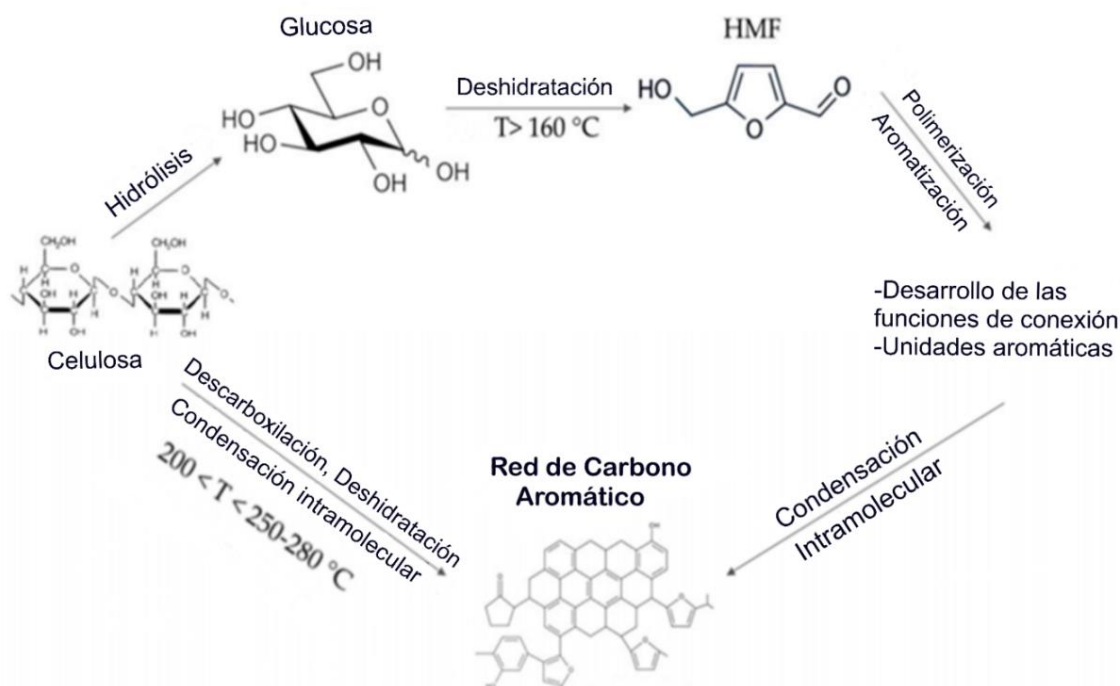


Figura 1.9. Etapas de la carbonización hidrotérmica (Maniscalco *et al.*, 2020).

- **Descarboxilación:** Se caracteriza esta etapa por la producción de CO_2 por cada molécula de n-parafina formada y dando lugar a un acortamiento de la cadena de esta, teniendo un número impar de carbonos en su estructura (Balan-Chan y Elizalde-Martínez, 2018).

- Polimerización: La polimerización es el proceso mediante el cual se fabrican los polímeros y, durante el proceso de polimerización, se pueden perder algunos grupos químicos de cada monómero y el polímero no siempre conserva las propiedades químicas o la reactividad de la unidad monomérica (Speight, 2019).
- Aromatización: Es el proceso químico por el cual una molécula orgánica o una parte de esta se convierte en un anillo aromático. El mecanismo de la reacción de aromatización en condiciones hidrotermales aún se desconoce, Sin embargo, se sabe que las estructuras aromáticas exhiben una alta estabilidad en las pruebas experimentales, bajo condiciones hidrotérmicas por lo que pueden ser consideradas como un componente básico del sólido resultante de la CHT. La reacción de aromatización depende esencialmente de la temperatura, pero también del tiempo de residencia. (Cayo-Reinoso, 2018).

1.4.4 Características del hidrochar

El hidrochar con un grupo funcional oxigenado rico es un material carbonoso de alto valor agregado derivado de biomasa seca/húmeda por CHT. En general, los hidrochar presentan menores áreas superficiales y baja porosidad, en comparación, sin embargo, posee una gran cantidad de grupos funcionales, que según reportes hacen que este material presente mejores capacidades de adsorción.

Las características principales del hidrochar son que posee un área superficial específica (SSA) menor en comparación con el biocarbón y un menor grado de carbonización, y por lo tanto menos carbono aromático (C). Además, tiene una proporción más alta de H:C y O:C, lo que significa que tiene mayores cantidades de grupos funcionales de superficie derivados de plantas en la superficie de los carbones (Gronwald *et al.*, 2016).

1.4.5 Ventajas y desventajas de la CHT

Una gran ventaja es el hecho de que no requiere un proceso previo de secado a la materia prima, además el hidrochar es un material que repele el agua y no se pueden mezclar con ella, por lo tanto, el contenido de agua se puede reducir significativamente.

Existen muchos estudios sobre la de CHT a escala de laboratorio, en cambio solo se informan pocos a escala piloto. Por consiguiente, para el proceso a escala industrial es un gran desafío encontrar la tecnología adecuada, así como los parámetros para la CHT. La utilización de energía durante el proceso es muy relevante para las condiciones de tiempo y temperatura del proceso. Encontrar las condiciones óptimas para mejorar los beneficios económicos y ambientales aun es un campo importante para la investigación (Nava-Pacheco, 2021).

1.4.6 Aplicaciones del hidrochar

El hidrochar obtenido de la CHT tiene un alto poder calorífico, bajo contenido de humedad y capacidad de almacenamiento y transporte a largo plazo (Krysanovaa *et al.*, 2018), puede producir fertilizantes a partir de los desechos de las fosas sépticas al tiempo que elimina los patógenos humanos (Saha *et al.*, 2021), algunos fertilizantes de origen hidrotérmico no sólo superan a los fertilizantes sino que también reducen los flujos de gases de efecto invernadero en los suelos (Berge *et al.*, 2015).

Enmienda del suelo: secuestro para reducir los gases de efecto invernadero el uso del hidrocarbón está relacionado con el sueloalteración, liberación de nutrientes, mineralización, germinación, crecimiento dediferentes cultivos, retención de agua, mitigación del cambio climático, etc.

Es utilizado ampliamente para recuperar nutrientes de las corrientes de desechos, ademas se encontró que podría tener valor como combustible y como suplemento de

nutrientes (Saha *et al.*, 2021). Sus propiedades lo hacen apto para su uso en una variedad de aspectos medioambientales aplicaciones, incluso como enmienda del suelo, fuente de energía, absorbente ambiental, y/o un material para energía (Berge *et al.*, 2015). Entender el proceso de manera específica permite tener un análisis de todas las partes involucradas desde la obtención de la materia prima hasta el cliente final, por lo tanto, un control en la cadena de suministro es necesario para garantizar todo el proceso de CHT.

La carbonización hidrotérmica puede eliminar una parte de las cenizas. Formando materiales alcalinos durante la combustión. Esta característica permite que el hidrochar se utilice directamente como combustible para generar energía ya que tienen altas densidades energéticas.



Figura 1.10. Número de publicaciones relacionadas con la aplicación de combustible y energía del hidrocarbón (Elaboración propia).

Asu vez, al usarlo directamente como combustible sólido para generación de energía, el hidrochar también se puede emplear para sintetizar combustible en una celda, como super condensadores de electrodos y baterías, actuando, así como un medio para convertir y almacenar energía en la Figura 1.10 se puede observar las investigaciones relacionadas del hidrochar como fuente de energía (Pacheco-Antero *et al.*, 2019).

1.5 Antecedentes

En años anteriores se realizaron diferentes estudios en los cuales ocuparon distintas materias primas para hacer la transformación termoquímica de diferentes biomásas a la par hicieron distintos estudios de factibilidad y viabilidad económica a continuación se muestran los estudios encontrados.

Heilmann *et al.* (2010), utilizaron microalgas verdes y azul verdosas, empleando condiciones relativamente moderadas de temperatura (aproximadamente 200 °C), tiempo (<1 h) y presión (<2 MPa), las microalgas se pudieron convertir de una manera en un producto de carbón de algas energéticamente eficiente que es de calidad de carbón bituminoso.

Berge *et al.* (2011), evaluaron las implicaciones ambientales asociadas con la carbonización de corrientes de residuos municipales representativas (incluidos los productos gaseosos y líquidos), evaluaron las propiedades físicas, químicas y térmicas del hidrocarburo producido, y determinaron las energías de carbonización asociadas con cada flujo de residuos. Los resultados de los experimentos de carbonización por lotes indicaron que entre el 49 y el 75 % del carbono inicialmente presente se retiene dentro del carbón, mientras que entre el 20 y el 37 % y el 2 y el 11 % del carbono se transfieren a las fases líquida y gaseosa, respectivamente. La composición del hidrocarburo producido sugiere que tanto la deshidratación como la descarboxilación ocurren durante la carbonización, lo que da como resultado estructuras con altas aromaticidades.

Du *et al.* (2012), investigaron la viabilidad de utilizar nutrientes recuperados de la carbonización hidrotérmica (CHT) para el cultivo de microalga *Chlorella vulgaris*. Se aplicaron diferentes múltiplos de dilución de 50, 100 y 200 al agua de proceso reciclada de CHT y se comparó el crecimiento de algas entre estos medios y un medio de crecimiento estándar BG-11. Las algas alcanzaron una concentración de biomasa de

0.79 g/L después de 4 días. Las algas eliminaron la demanda total de nitrógeno, fósforo total y demanda química de oxígeno en un 45.5–59.9 %, 85.8–94.6 % y 50.0–60.9 %, respectivamente, en agua de proceso diluida de forma diferente, las algas cultivadas en agua de proceso tenían un 18.9 % más de carbono y un 7.8 % menos de nitrógeno que las de BG-11, lo que indica que son muy adecuadas como materia prima para biocombustibles.

Escala *et al.* (2012), investigaron la carbonización hidrotérmica de lodos de depuradora estabilizados y no estabilizados en un recipiente como pretratamiento para lodos de depuradora antes de la incineración, y la composición y propiedades del carbón obtenido. Demostró que los lodos eran más altos que los del carbón natural y bastante cercanos a los valores típicos de la celulosa. El poder calorífico superior de los lodos de depuradora estabilizados se incrementó del 3.4 al 6.5 % y se incrementó el poder calorífico superior del lodo no estabilizado del 5.8 al 11.0 %, después de la carbonización.

Kaushik *et al.* (2014), ocuparon desechos de alimentos para someterlos a hidrólisis enzimática antes del tratamiento hidrotérmica para producir hidrochars y bioaceites. El pretratamiento de los desechos de alimentos lo realizó con una proporción de enzimas de 1: 2: 1 (carbohidrasa: proteasa: lipasa), demostró ser eficaz para convertir los desechos de alimentos en los dos productos con mejores rendimientos. Los contenidos de carbono y los valores caloríficos variaron de 43.7 a 65.4 % y de 17.4 a 26.9 (MJ/kg) para los hidrochars obtenidos con el pretratamiento asistido por enzimas, respectivamente, mientras que variaron de 38.2 a 53.5 % y de 15.0 a 21.7 (MJ/kg). respectivamente para los hidrochars obtenidos sin pretratamiento. Además, se observó la formación de microesferas carbonosas con bajas concentraciones de elementos inorgánicos y diversos grupos funcionales superficiales en el caso de los hidrochars de desperdicio de alimentos asistidos por enzimas. El pretratamiento enzimático también facilitó la formación del bioaceite con una distribución estrecha de compuestos orgánicos y con el mayor rendimiento obtenido a 350 °C.

Berge *et al.* (2015), utilizaron un enfoque de evaluación del ciclo de vida para evaluar los impactos ambientales asociados con el CHT de los desechos alimentarios y la posterior combustión del producto sólido generado, para la producción de energía, y comprender cómo los parámetros y/o los componentes asociados con la carbonización de residuos de alimentos y la posterior combustión de hidrocarburos influyen en el impacto ambiental del sistema. Los resultados de este análisis indican que las emisiones de agua de proceso de CHT y la combustión de hidrocarburos influyen de manera más significativa en el impacto ambiental del sistema, con un impacto negativo neto resultante para todas las fuentes de energía sustituidas evaluadas, excepto la biomasa. Estos resultados ilustran la importancia de la producción de electricidad a partir de hidrocarburos, particularmente cuando es utilizado para compensar las fuentes de energía a base de carbón.

Maqhuzu *et al.* (2019), evaluaron la viabilidad económica de un sistema de gestión de RSU basado en CHT en Zimbabwe. Introdujo un análisis económico probabilístico para cuantificar la incertidumbre sobre los costos. El objetivo fue determinar los factores que consolidarán el emprendimiento para lograr un cierto nivel de retorno. La efectividad de diferentes estrategias de inversión, es decir, una operación administrada por el gobierno o el sector privado, se probó utilizando simulaciones de Monte Carlo. Los resultados indican una probabilidad del 55 % y del 18 % de un Valor Presente Neto (VPN) positivo para una operación privada y una operación privada, respectivamente. Se puede esperar un costo de inversión específico de \$ 54-67 por Mg de RSU tratado, un retorno de la inversión (ROI) de 5.4-29.0 % y una tasa interna de retorno (TIR) de 5.2-22.9 % si el proyecto es emprendido por el gobierno. El sector privado puede esperar un ROI de -0.8 – 18.2 % a un nivel de confianza del 90 % y una TIR más baja de -2.1-16.2 % de \$ 57-71 por Mg de RSU invertido. Los costos de contingencia son de US \$25 por Mg y \$38 por Mg de RSU para el gobierno y el sector privado, respectivamente, con un intervalo de confianza del 100%. Un aumento del 70 % en las tarifas de recaudación o un mínimo El precio de venta de \$91 por Mg de la hidroeléctrica aseguraría un VPN positivo para la operación del gobierno.

Aragón-Briceño *et al.* (2020), 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. Los escenarios propuestos mostraron una reducción general total de sólidos y DQO de hasta 68 y 66 %, respectivamente. La inclusión de hidrocarburos como fuente de combustible aumentó 10 veces la producción neta de energía en comparación con cuando solo se considera el biogás como fuente de energía. La producción potencial de estruvita osciló entre 0.02 y 0.06 kg por tonelada de lodo tratado. Los escenarios con una temperatura de tratamiento térmico de 250 °C proporcionaron mejores beneficios económicos cuando se consideran la estruvita y el hidrocarburo.

Medina-Martos *et al.* (2020), analizaron una solución integral que integra la carbonización hidrotérmica y la digestión anaeróbica para tratar los lodos de depuradora y se comparó con la de la digestión anaeróbica autónoma. Para evaluar su desempeño, un modelo de simulación de procesos en Aspen Plus® sirvió como la principal fuente de datos de los inventarios de entrada-salida requeridos para realizar evaluaciones tanto tecnoeconómicas como del ciclo de vida, que siguen los estándares metodológicos convencionales. Se observó que la estrategia integrada generalmente reduce los impactos ambientales en comparación con la configuración autónoma debido a la recuperación de un hidrocarburo que podría reemplazar a los combustibles fósiles. Por el contrario, la opción autónoma solo recupera un digestato que puede generar un impacto incluso mayor que su alternativa contrafactual. La integración de tratamientos hidrotérmicos mostró un aumento del 14 % en la eficiencia energética bruta de la digestión anaeróbica. Sin embargo, las preocupaciones económicas hacen que el enfoque requiera una mayor optimización, ya que el costo estimado para la opción CHT fue un 42 % más alto en comparación con la alternativa de digestión anaeróbica convencional. Aunque existe un marco regulatorio cambiante en torno a

los lodos de depuradora, especialmente en la recuperación de nutrientes, se ha demostrado que los tratamientos hidrotérmicos son una ruta potencialmente sostenible para el tratamiento de los lodos de depuradora.

Saha *et al.* (2021), investigaron la viabilidad económica de una instalación de tratamiento hidrotérmica que pueda tratar los desechos sépticos generados en el condado de Athens, Ohio, un condado rural de los Apalaches en los EE. UU. Considero dos casos diferentes para el análisis económico, donde el Caso I asumió una instalación descentralizada y el Caso II asumió una instalación centralizada. Los resultados mostraron que ambos casos son económicamente factibles, donde el Caso I y II alcanzaron el punto de equilibrio en los años 4 y 6, respectivamente. Además, a pesar del mayor requerimiento de inversión de capital para el Caso I, también hubo un mayor retorno de la inversión (ROI) de 2.85 en comparación con 1.52 para el Caso II. Se examinó un análisis de sensibilidad para determinar el efecto del contenido sólido en la fosa séptica o en la alimentación del reactor, el precio de venta del fertilizante y los costos de bombeo de residuos sépticos sobre la viabilidad del proyecto. El análisis de sensibilidad mostró que el costo de bombeo es el factor más significativo que afecta la viabilidad del proyecto, mientras que el ROI varió alrededor de $\pm 80 \%$ y $\pm 200 \%$ para los Casos I y II, respectivamente, debido a solo un cambio de aproximadamente $\pm 18 \%$ en el costo de bombeo.

González-Arias *et al.* (2021), realizaron la optimización del proceso de carbonización hidrotérmica para la conversión de la poda del olivo en biocombustible. Para ello, se realizó una evaluación económica-experimental combinada. Los datos experimentales obtenidos a escala de laboratorio se utilizaron para estimar el desempeño económico de una hipotética planta a escala industrial. Para evaluar la viabilidad del proyecto, se seleccionó tres tamaños de plantas diferentes según su capacidad (1250–625–312.5 kg/h). Para el análisis de rentabilidad aplicó el método de flujo de caja descontado. Analizó diferentes escenarios considerando la reducción de costos asociados o la mejora de los ingresos en comparación con el caso de línea base. Los resultados

indicaron que, con los tamaños estudiados, ninguna de las alternativas es rentable. A pesar de eso, la mayor capacidad muestra los mejores resultados. En este caso, se requiere un precio de venta mínimo de 0.39 €/kg para el hidrocarburo para alcanzar la rentabilidad. Los tamaños de planta más bajos requerirían precios de venta más altos (es decir, 0.46 €/kg para 625 kg/h de capacidad y 0.59 €/kg para 312.5 kg/h de capacidad). Asimismo, una reducción del 33 % en el consumo de energía eléctrica puede hacer que el plan sea rentable para la mayor capacidad. Así, la importancia de los incentivos gubernamentales se pone de manifiesto en este trabajo dado que la reducción de costos junto con la mejora en los ingresos por la venta del producto puede hacer que el proyecto sea económicamente viable.

En la Tabla 1.3 se puede observar la comparación de distintos parámetros usados en investigaciones previas de la CHT.

Tabla 1.3 Evolución del estado del arte empleando distintos parámetros para la obtención de hidrochar.

Parámetro	Maqhuzu <i>et al.</i> (2019)	Aragon- Briceño <i>et al.</i> (2020)	Castro <i>et al.</i> (2020)	González-Arias <i>et al.</i> (2021)
Temperatura (°C)	NE	160 y 250	130, 150 y 170	220, 250 y 280
Tiempo (min)	NE	30	10, 30 y 50	90, 180 y 540
Reactor	NE	Reactor Parr, batch	Reactor Parr	NE
Volumen (L)	NE	0.220	NE	Utilizaron tamaños de planta
Materia prima	RSU	Lodos primarios y secundarios	Microalgas	Poda de olivo
Utilizaron una cadena de suministro	No	No	No	No
Análisis técnico- económico	Simulación de Monte-Carlo, factor exponencial y método PERT	Balance de masa y energía	NE	Flujo de caja descontado, análisis de sensibilidad
Poder calorífico (MJ/kg)	NE	NE	17.47	NE

NE = No Especificado

Tabla 1.3 Continuación de la evolución del estado del arte empleando distintos parámetros para la obtención de hidrochar.

Parámetro	Bardham et al. (2021)	Bhakta et al. (2021)	Presente investigación
Temperatura (°C)	200-240	220, 270 y 260	200 y 240
Tiempo (min)	60-360	60,150 y 250	180 y 300
Reactor	Autoclave para CHT	Discontinuo	Reactor de teflón
Volumen (L)	0.30-1	0.750	0.25
Materia prima	Combinación de materias primas	Residuos alimentarios	Residuo orgánico complejo
Utilizaron una cadena de suministro	No	No	En desarrollo
Análisis técnico-económico	NE	NE	En desarrollo
Poder calorífico (MJ/kg)	29.8	10.54	En desarrollo

CAPÍTULO 2

MATERIALES Y MÉTODOS

CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS

En la siguiente Figura 2.1 se muestra la metodología que se llevó a cabo con la finalidad de cumplir con los objetivos planteados al inicio de esta investigación.

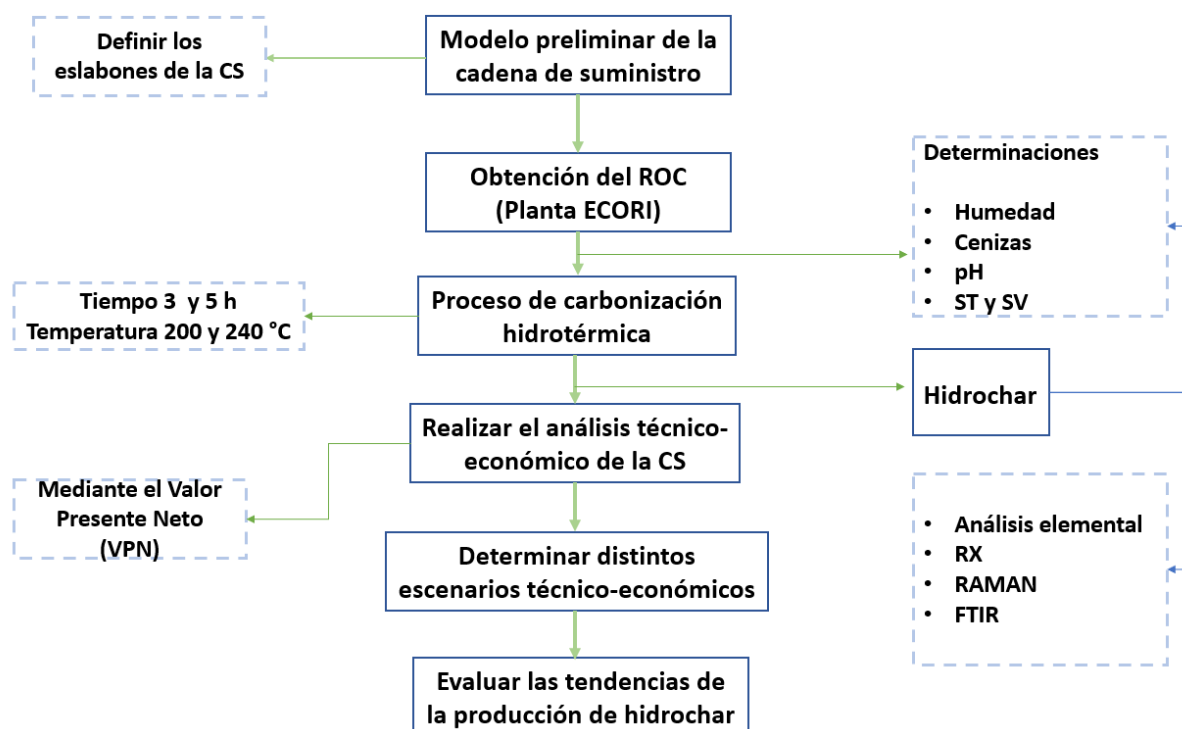


Figura 2.1 Metodología utilizada en la investigación.

2.1 Modelo preliminar de la cadena de suministro

En esta etapa se buscó estructurar el modelo, definir variables, interrelaciones de variables. Para esto se requirió una investigación detallada en la elaboración de diversas CS. Se utilizó la metodología propuesta por Ramos (2017). La conceptualización, esto le permite desglosar toda la cadena de suministro e identificar uno por uno los elementos específicos que afectan la operación y sus relaciones específicas.²²

Se identificaron los siguientes elementos:

- Elementos operativos: Son los elementos de la cadena de suministro donde se llevan a cabo procesos de transformación, es importante identificarlos y definir sus valores para entender su comportamiento en los procesos productivos.
- Movimiento físico de material: Relaciona componentes donde hay movimiento real y físico de producto, es necesario distinguir 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 (González-Arias *et al.*, 2021; Marzbali *et al.*, 2021).
- 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.

2.1.1 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, 2020). 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 la naturaleza de cada bucle, si era de refuerzo o de balance.
- Descripción del bucle: Se describió cada bucle de retroalimentación.

Posteriormente, se seleccionó un software de logística, Vensim PLE 9.2.0, y manejo de la cadena de suministro, donde se utilizaron los siguientes criterios que fueron: de fácil manejo, libre acceso, simulación de múltiples procesos manufactureros. Para después, estableció las locaciones, colas y entidades presentes en el proceso de la carbonización hidrotérmica para hacer uso de la simulación del software a partir del diagrama de flujo previo.

2.2 Obtención y acondicionamiento del ROC

Los residuos orgánicos complejos fueron recolectados de la planta separadora de residuos sólidos ECORI ubicada en la colonia Donato Guerra, municipio de Orizaba, Veracruz que se muestra en la Figura 2.2. Esta actividad se realizó los martes porque estos días había un mayor porcentaje de residuos orgánicos. Se utilizaron recipientes plásticos de 20 L para el transporte al Instituto Tecnológico de Orizaba. Se separó manualmente el ROC para eliminar la mayor cantidad de residuos inorgánicos como papel, piedras, plástico, vidrio etc. Una vez terminado la separación se adicionó una cantidad de masa 1:1 del ROC y agua para sedimentar materiales plásticos, posterior se llevó a una centrífuga para reducir el agua residual, se trabajó a 1,700 rpm, este consta de una malla de 3 mm de diámetro.



Figura 2.2 Planta separadora de residuos sólidos ECORI.

2.3 Proceso de la carbonización hidrotérmica

Se validaron dos parámetros de interés en el proceso de la CHT donde las variables de tiempo 3 y 5 h y temperatura de 200 y 240 °C, según bibliografía consultada (Bardhan *et al.*, 2021; Youn *et al.*, 2022), están ligadas directamente con el poder calorífico del hidrochar, por esta razón se buscó encontrar la mejor combinación de estos dos.



Figura 2.3 Reactor de hidrocarbonización con teflón.

2.3.1 Carbonización hidrotérmica de los ROC

La CHT se llevó a cabo en un reactor de teflón, la muestra se pesó 60 g de ROC en una balanza analítica y a su vez se cortaron en pedazos pequeños para introducirlos

en el reactor, debido a la baja humedad se adicionó una relación 1:1 (m/m) de agua. El reactor se cerró correctamente para después llevarlo a una estufa, Riossa, la temperatura se midió con un sensor durante todo el tiempo del proceso para verificar que la temperatura era la establecida. Después de terminar se apagó la estufa y el recipiente se abrió un día después.



Figura 2.4 Partes del reactor para la CHT.

Una vez abierto se retiró el hidrochar del reactor para observar su estado y en caso necesario, se filtró con ayuda de un filtro al vacío para esto se utilizó un compresor y un matraz Kitasato, papel filtro y un embudo Buchner. A continuación, se metió a la estufa para secarlo durante 2 h a 105 °C. Una vez seco, el hidrochar se trituró utilizando un mortero para poder ser almacenada y realizar análisis correspondientes.

2.4 Análisis proximal del residuo orgánico complejo antes y después de la CHT

Los análisis descritos a continuación se llevaron a cabo para los ROC y el producto obtenido de la carbonización hidrotérmica, hidrochar. Con la finalidad de conocer los cambios que sufre el residuo orgánico complejo antes y después del proceso.

2.4.1 Determinación de humedad

Se utilizó el método gravimétrico, inicialmente se pesó una muestra para esto se utilizó una balanza marca OHAUS y después se introdujo a la estufa, previamente calentada, y se llevó a los 105° C por un tiempo de 24 h para eliminar la humedad presente y así conocer el porcentaje de humedad que contiene la muestra. Después de este tiempo la muestra se volvió a pesar para conocer el peso constante. Para notar el porcentaje de humedad se usó la siguiente ecuación.

$$\% \text{ Humedad} = \frac{P}{P'} * 100 \quad (2.1)$$

Donde.

P = Masa de agua (g)

P' = Masa de la muestra (g)

2.4.2 Determinación de cenizas

El porcentaje de cenizas en base seca se calculó introduciendo la muestra obtenida en la determinación de humedad a una Mufla marca Barnstead Thermolyne 1300 Furnace durante un tiempo de 2 h a 550 °C. La cantidad de cenizas se determinó mediante la destrucción de la materia orgánica presente en la muestra por calcinación y determinación gravimétrica del residuo y se obtuvo mediante la Ecuación (2.2).

$$\text{Cenizas} \left(\% \frac{m}{m} \right) = SV = \frac{(P_3 - P_1)}{(P_2 - P_1)} \quad (2.2)$$

Donde

C = Porcentaje de cenizas en base seca

P_1 = Peso de crisol vacío (g)

P_2 = Peso de la muestra seca (g)

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

2.4.3 Determinación de pH

Para realizar este método, primero se pesó 10 g de muestra, introduciéndolos en un vaso de precipitado de 50 mL, Se añadieron 20 mL de agua destilada y se mezcló bien con un agitador limpio durante 30 minutos. Se dejó reposar 15 minutos y se introdujo el electrodo del Potenciómetro OAKTON con cuidado en cada muestra, se esperó unos segundos para su estabilización y finalmente se determinó el valor de pH, de acuerdo con la determinación del Potenciómetro 4500-H+ B Standard Methods.

2.4.4 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 de alguna de las tres mezclas y se anotó su peso. Después se metió el crisol a la estufa durante 24 h 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 (2.3):

$$\% ST = \frac{P_3 - P_1}{P_2} * 100 \quad (2.3)$$

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)

2.4.5 Determinación de Sólidos Volátiles

Para la determinación de sólidos volátiles, se introduce a la mufla durante 2 h 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 (2.4):

$$\% SV = \frac{P_3 - P_4}{P_3 - P_1} * 100 \quad (2.4)$$

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)

2.5 Composición química

Los análisis de composición química se realizaron en el Centro de Investigación Científica de Yucatán, se analizó solo el hidrochar seco.

2.5.1 Difracción de rayos X (DRX)

El análisis de Difracción de Rayos X (DRX) fue efectuado para conocer la estructura cristalina de los materiales sintetizados. Esto se llevó a cabo con un difractómetro: Cu K (alfa) marca BRUKER, modelo D2 Phaser. Los patrones DRX se obtuvieron a temperatura ambiente usando un difractómetro con radiación Cu K α ($\lambda=1.5418 \text{ \AA}$) operando a 30 kV y 10 mA. Las muestras se analizaron con un rango de 2θ de 10° a 99° para perfiles angulares perfiles angulares grandes $^\circ$ para mayores con un paso de tiempo de 0.4 s y un tamaño de paso de 0.01° .

2.5.2 Análisis RAMAN

Para el análisis RAMAN se utilizó un espectrómetro marca ThermoScientific, modelo DRX Raman Microscope a una de potencia laser 0.5 mw (longitud de onda de 633nm),

en intervalo de medición de 200 a 3500 cm^{-1} y 1 segundo de exposición a 100 scans de barrido y 50 micrometros de pinole con un objetivo de 50X del microscopio.

2.6 Determinación de grupos funcionales

2.6.1 Análisis FT-IR

Se utilizó un ATR de punta de diamante se usó un intervalo de medición de 500-4000 cm^{-1} , posteriormente se empleó una resolución de 4 cm^{-1} y 32 scans en un intervalo de longitud de onda. Para el tratamiento de datos se realizó una compensación por CO_2 atmosférico y una corrección del ATR de diamante usado.

2.7 Análisis elemental

Se utilizó un analizador elemental orgánico Thermo Scientific Flash 2000, se colocó aproximadamente de 2 mg de muestra en contenedores de estaño y como catalizador para el pico de azufre se colocan 10 mg de pentóxido de vanadio. Para tener una mejor correlación en desviación estándar con respecto al porcentaje en peso de elementos cada muestra se realizó por duplicado.

2.7.1 Análisis de poder calorífico superior

Para calcular el poder calorífico superior el cual se entiende como la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa de 1 kg de combustible cuando el vapor de agua originado en la combustión está condensado, este valor se estimó a partir de los datos del análisis elemental de los hidrochar seco. Se utilizó la ecuación propuesta por (Salim *et al.*, 2020) quien realizó estimaciones del hidrochar a partir de la pulpa de remolacha.

$$PCS = 0.3491 * C + 1.1783 * H + 0.1005 * S - 0.1034 * O - 0.015 * N - 0.0211 * \text{Cenizas} \quad (2.5)$$

Donde

C = Carbono

H = Hidrógeno

S = Azufre

O = Oxígeno

N = Nitrógeno

Todos los valores de la ecuación se expresan en porcentaje en peso para obtener como resultado el poder calorífico en unidades de MJ/kg.

2.8 Análisis técnico-económico de la cadena de suministro

Para el análisis económico se realizó utilizando un procedimiento estructurado como menciona Blank y Tarquin (2012), que se puede ver en la Figura 2.5.

1. Se realizó una breve narración del problema y se delimitaron los objetivos del proyecto.
2. Se identificó las soluciones viables del problema que cumplen con los objetivos. Algunos parámetros incluyeron el costo inicial de los equipos y el costo de operación anual.

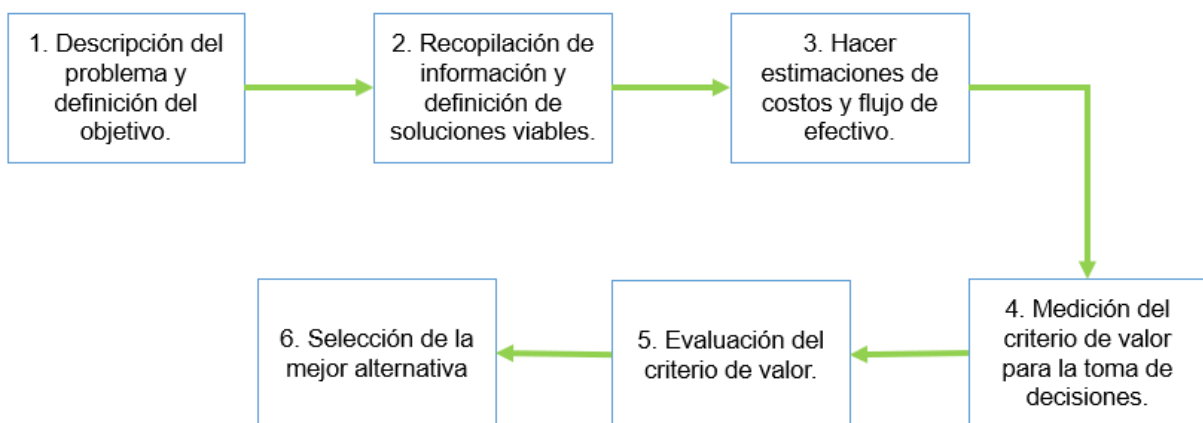


Figura 2.5 Procedimiento para el análisis técnico-económico

2.8.1 Estimación de costos y flujos de efectivo

La revista Chemical Engineering publica regularmente índices llamados índice de costos de plantas de ingeniería química (CEPCI, por sus siglas en inglés) para ayudar a estimar el costo de capital (Marzbali *et al.*, 2021). Los datos se publican en la literatura o se calculan utilizando datos de años anteriores. Otro factor importante para realizar la estimación de costos de los equipos de CHT, es la capacidad de los equipos, lo que significa que el costo del instrumento debe escalarse en función de la capacidad de ROC a tratar con la Ecuación 2.6 se estimaron los costos de los equipos de intercambiador de calor, filtro prensa y el secador. Por otra parte, para el cálculo del reactor se utilizó la Ecuación 2.7

$$CE = CO * \left(\frac{FM_E}{FM_O} \right)^n \quad (2.6)$$

Donde:

CE = Costo escalado

CO = Costo original

FM_E = Flujo másico escalado

FM_O = Flujo másico original

n = Exponente de escala

$$CER = COR * \left(\frac{\frac{FM_E}{LHSV_E}}{\frac{FM_O}{LHSV_O}} \right)^n \quad (2.7)$$

Donde:

CER = Costo escalado del reactor

COR = Costo original del reactor

FM_E = Flujo másico escalado

FM_O = Flujo másico original

$LHSV_E$ = Velocidad espacial horaria del líquido escalado

$LHSV_O$ = Velocidad espacial horaria del líquido original

n = Exponente de escala

A su vez, n normalmente es un valor que esta entre 0.6 - 0.8 (Marzbali *et al.*, 2021)

Con los valores obtenidos de las dos ecuaciones anteriores, se puede calcular el costo de adquisición de los equipos.

Por otro lado, se tomó en cuenta el eslabón de producción para calcular los costos de los equipos instalados del proceso de CHT, para esto se ocupó la Ecuación 2.8. Es necesario hacer esta adecuación debido a que cualquier instrumento o equipo que se deba instalar incurrirá en una serie de costos relacionados a su instalación. El costo no instalado generalmente se multiplica por un factor de instalación para determinar el costo instalado:

$$CI = CE * FI \quad (2.8)$$

Donde

CI = Costo instalado

CE = Costo escalado del equipo

FI = Factor de instalación

El factor de instalación depende del tipo de equipo que se está instalando, sin embargo, este valor se encuentra dentro del rango entre 1.5 y 2.5 (Jones *et al.*, 2014).

La suma de los costos instalados para todos los equipos se define como Costo Total Instalado (CTI). Cada planta debe pagar algunos costos directos e indirectos al establecerse, el costo del resto de la planta (conocidos como los componentes adicionales). El costo total directo (CTD) se puede calcular de la siguiente Ecuación 2.9.

$$CTD = CTI + CC + DS + TA \quad (2.9)$$

Donde:

CTD = Costo total directo

CTI = Costo total instalado

CC = Costo de construcción

DS = Desarrollo del sitio

TA = Tuberías adicionales

Estas incluyen CTI, costos de construcción representa el 1 % del CTI, desarrollo del sitio 9 % del CTI, así como tuberías adicionales 4.5 % del CTI. El costo indirecto total se puede calcular a partir de la Ecuación 2.10.

$$CIT = GP + TC + GC + CP \quad (2.10)$$

Donde:

CIT = Costos indirectos

GP = Gastos prorrateados

TC = Tarifas de construcción

GC = Gastos de campo

CP = Contingencia del proyecto

3. Se realizó un estado de resultados, con proyección de ingresos y ventas de 10 años, donde se tomó en cuenta los costos de operación

Para calcular los flujos de efectivo los costos de operación y mantenimiento se fijaron en un 2 % de la inversión inicial según Forgács *et al.* (2012), Se tomó en cuenta una

proyección de 5 años sin variación de ventas. El flujo neto de efectivo se calculó con los datos de ingresos y egresos utilizando la siguiente ecuación:

$$FNE = FE - FS$$

Donde

FNE = Flujo neto de entrada

FE = Flujos entrada

FS = Flujos salida

4. Para el criterio de valor se tomó en consideración el VPN.

Para el cálculo del VPN fue necesario obtener el valor de la tasa mínima aceptable de retorno (TMAR) esta se calculó a partir de la siguiente Ecuación:

$$TMAR = i + f + i * f \quad (2.11)$$

Donde:

i = inflación

f = riesgo o premio al riesgo

Para obtener el VPN de los distintos escenarios se utilizó la siguiente Ecuación.

$$VPN = -P + \frac{FNE_1}{(1+i)^1} + \frac{FNE_2}{(1+i)^2} + \frac{FNE_3}{(1+i)^3} + \frac{FNE_4}{(1+i)^4} + \frac{FNE_5}{(1+i)^5} \quad (2.12)$$

Donde

VPN = Valor presente neto

FNE = Flujo neto de entrada

i = la TMAR aplicada

2.9 Determinar distintos escenarios técnico-económico

Se plantearon tres escenarios ocupando capacidades de ROC distintas a procesar, el primero tomando en cuenta la disponibilidad de ROC que produce el municipio de Orizaba y que separa la planta ECORI y otro con la transformación de un aumento del 25 % de los ROC disponibles, debido a la cercanía con el municipio de Ixtaczoquitlán, y los RSU que generan diariamente. El último con la capacidad máxima de residuos que puede procesar la planta ECORI que son 241 toneladas de RSU por día. Para el análisis se calcularon datos como costos de los equipos principales (reactor, intercambiador de calor, filtro prensa y secador), en el proceso de CHT, la inversión inicial, financiación, gastos operativos para las diferentes capacidades a procesar.

2.10 Evaluar tendencias en la producción de hidrochar

Se evaluó y seleccionó el mejor escenario técnico-económico el cual de un beneficio económico mayor esto a partir de los tres escenarios planteados y se tomó como criterio un proyecto mutuamente excluyente.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Modelo preliminar de la cadena de suministro

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 3.1.

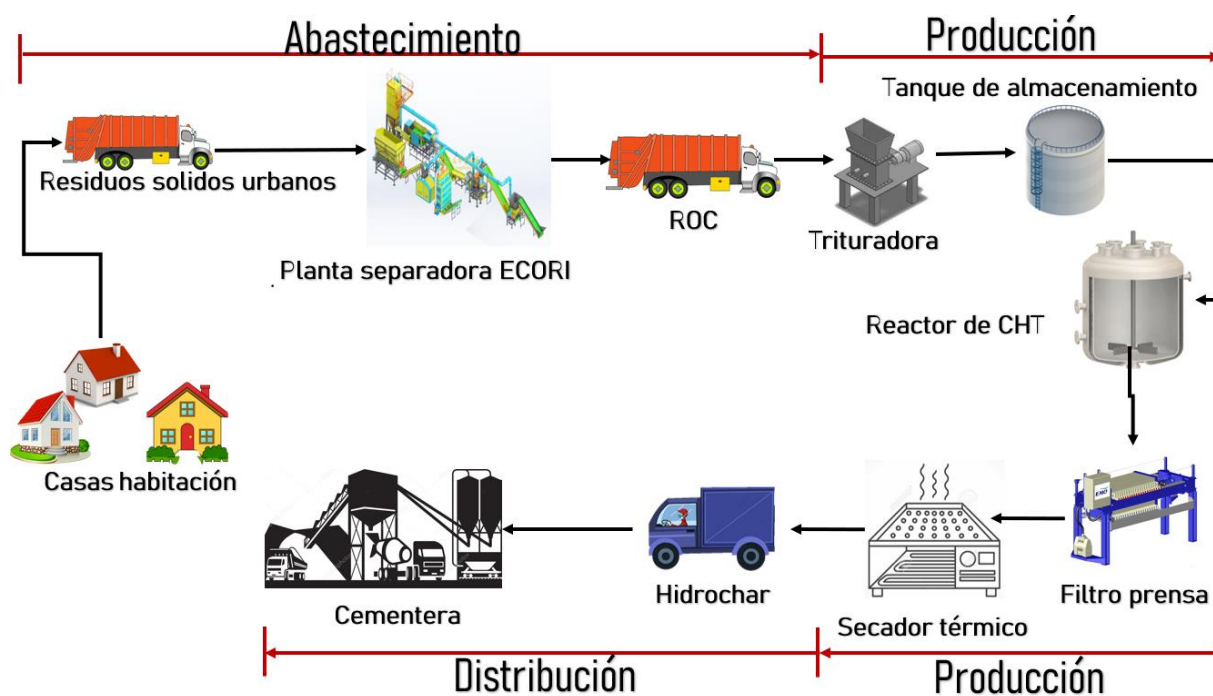


Figura 3.1 Propuesta de la cadena de suministro para la producción de hidrochar
(Elaboración propia).

1) Abastecimiento:

Se encontró en primer lugar a las casas habitación que a partir de los habitantes generan los RSU, en Orizaba según el SIEGVER (2020) 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, que 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 son llamados ROC.

A su vez, los 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, la parte mineral de los RSU inorgánicos separados reemplaza a los materiales minerales primarios (como piedra caliza, arcilla o hierro) y la parte combustible proporciona la energía necesaria para la producción de clínker (Geocycle, 2022).

En cuanto a los ROC son llevados a rellenos sanitarios donde son depositados para su disposición final generando gases efecto invernadero como metano y dióxido de carbono. También, los lixiviados de escurrimientos tóxicos pueden afectar el subsuelo y los mantos freáticos. Por esto se decidió encontrar una alternativa que permitan darle un uso a estos ROC, se planteó sean transportados a la planta de carbonización hidrotérmica.

2) Producción

Donde, los ROC llegarán al área de recepción de residuos posteriormente serán movidos por un cargador frontal a la tolva trituradora donde se llevará 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 y se utilizó en

la caldera, 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.

3) Distribución

Por último, el hidrochar será transportado al cliente final que se prevé sea una industria cementar de la región para ser utilizado como biocombustible en su proceso industrial.

Paralelamente a la construcción de la CS 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 3.2.

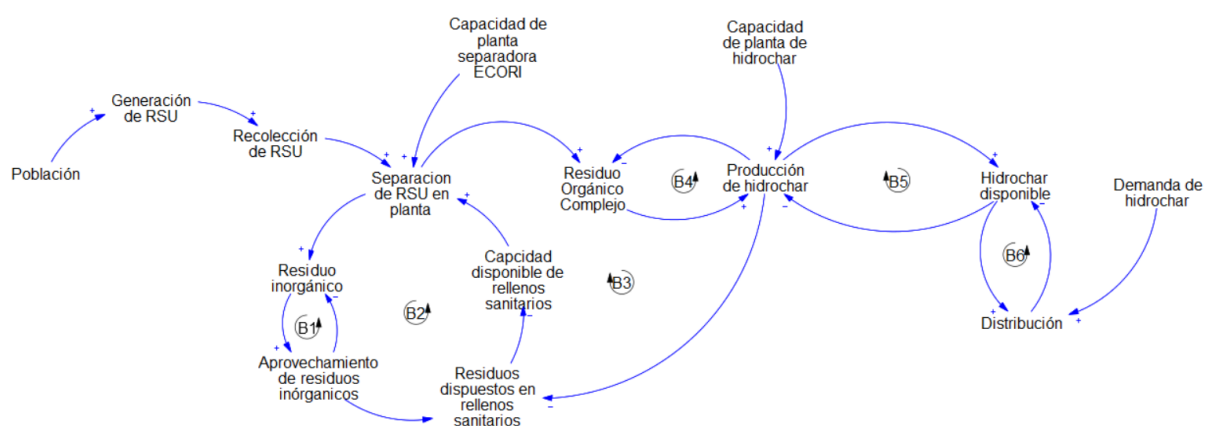


Figura 3.2 Diagrama causal de la propuesta de CS para la producción de hidrochar
(Elaboración propia).

En este sentido, los bucles de retroalimentación 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 incrementa 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.

3.2 Análisis proximal del residuo orgánico complejo

El ROC se acondicionó como se menciona en la metodología y después se realizó la caracterización que se observa en la Tabla 3.1 donde se midieron los parámetros de

pH, % de humedad, % de cenizas, sólidos volátiles y sólidos totales, todos los análisis se realizaron por triplicado.

Tabla 3.1 Análisis proximal del ROC.

pH	% Humedad	% Cenizas	% ST	% SV
5.81 ± 0.01	76.01 ± 0.36	49.40 ± 0.84	23.98 ± 0.36	53.59 ± 0.84

El residuo orgánico complejo contiene en la fracción orgánica; desechos de alimentos y de poda como lo son plantas, hojas, pasto y ramas pequeñas. En la fracción inorgánica se encontró trazas de plástico, papel, cartón y vidrio.

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 (2018) que fue de 7.1, utilizó la parte orgánica de residuos sólidos municipales. Por su parte, el porcentaje de humedad es de 76 % lo que muestra que para realizar el proceso de CHT será necesario la adicción de agua para el proceso.

El porcentaje de ST fue de 23.98, este valor es menor al reportado por Tapia-Gómez (2017) de 59.23 %, quien ocupó residuos sólidos orgánicos municipales. Hernández-Nazario (2018) 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.

Debido a que el porcentaje de humedad es de 76 % y para el proceso de CHT, la humedad es un parámetro de suma importancia debido a que una humedad menor de 80 % no permite llevar a cabo este proceso de manera adecuada (Wilk *et al.* 2021) por

esta razón se adicionó una relación 1:1 (m/m), para aumentar la humedad del ROC en la siguiente Tabla 3.2 se observa el análisis proximal del ROC humedecido.

Tabla 3.2 Análisis proximal del ROC humedecido.

pH	% Humedad	% Cenizas	% ST	% SV
5.77 ± 0.41	84.10 ± 0.37	39.05 ± 0.59	15.89 ± 0.37	60.94 ± 0.59

Así mismo, la humedad alcanzó un valor de 84.10 lo que indicó que es una biomasa con las características adecuadas para el proceso de CHT.

3.3 Proceso de la carbonización hidrotérmica

Se realizó el proceso de carbonización hidrotérmica en condiciones de tiempo de 3 y 5 h, y temperaturas de 200 y 240 °C. Todas las condiciones de operación fueron realizadas en duplicado. Una vez finalizado el proceso, el hidrochar fue secado entre 1 y 1.5 h a 105 °C en la estufa, para eliminar la humedad.

Tabla 3.3 Rendimiento del hidrochar.

Condiciones		Entrada	Salida		Rendimiento (%)	
Temperatura (°C)	Tiempo (h)	ROC (g)	Hidrochar			
			Húmedo (g)	Seco (g)	Húmedo	Seco
200	3	63.2	28.12	11.59	44.49	18.33
200	5	61.02	29.89	12.42	48.90	20.47
240	3	60.8	29.51	12.83	48.61	21.11
240	5	66.075	22.21	12.02	36.36	18.2

Se pesó el hidrochar húmedo y seco para conocer su rendimiento en la Tabla 3.3 se observa los rendimientos del hidrochar en las distintas condiciones de operación, los datos mostrados son un promedio de las 2 réplicas.

3.3.1 Balance energético del proceso de la CHT

Se realizó un balance de energía a nivel laboratorio, a partir de estos se tomaron los datos para poder escalar el balance energético a nivel municipal, se tomó en cuenta la capacidad máxima de residuos orgánicos complejos de 5.85 kg y se tomó en consideración el rendimiento en las diferentes condiciones de temperatura y tiempo. En la Tabla 3.4 se observa el balance energético, la energía consumida considera el tiempo en que el reactor llega a la temperatura de operación, el tiempo de proceso y el secado del hidrochar, para esto se ocupó la potencia de 0.45 kWh, según las especificaciones del equipo.

Tabla 3.4 Balance energético de la CHT.

Temperatura (°C)	Tiempo	Energía consumida* (MJ)	Poder calorífico del hidrochar (MJ/kg)	Energía aportada por el hidrochar (MJ)	Relación de energía (hidrochar/consumo)
200	3	8.50	3.25	3.48	0.41
200	5	11.74	11.97	14.33	1.22
240	3	8.42	12.08	14.92	1.77
240	5	11.66	13.43	14.30	1.23

*Incluye acondicionamiento del reactor, proceso de CHT y secado del hidrochar

A partir de estos datos se estimó la relación de energía que aporta el hidrochar y el consumo que se necesita para la obtención de este, en la última columna, de la Tabla 3.4, se observan los valores para esta relación. Cuando el proceso demande más energía a la obtenida el valor de esta relación se aleja del 1, como se sucede con la temperatura de 200 °C y el tiempo de 3 h, con un valor de 0.41. El valor 1 hace referencia a que no se gana ni se pierde energía. En las otras relaciones se pueden observar valores entre 1.22-1.77, lo que indicó que el proceso obtiene más energía de la que gasta. Semaan *et al.*, (2022) ocuparon orujo de oliva para el proceso de CHT y

realizaron una análisis energético el cual mostró que algunas corridas presentan un alto valor energético del 48% en el consumo de energía. Las temperaturas más altas requieren una mayor potencia de calentamiento y cuanto mayor sea el tiempo de proceso, más energía se consumirá para mantener el sistema a la temperatura establecida al igual que en esta investigación que al aumentar las condiciones aumenta la energía que necesita el proceso como se observa en la Tabla 3.4.

3.3.2 Análisis de los costos energéticos de la CHT

En Orizaba se generan diariamente 130 toneladas de RSU por día, según el Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de Residuos (DBGIR) el 46.42 % corresponde a la parte orgánica. Con un valor de 60.34 toneladas de ROC por día. Actualmente el municipio de Orizaba dispone de estos residuos en un relleno sanitario lo cual conlleva un gasto anual que no trae ningún beneficio. En la Tabla 3.5 se observan los costos por disposición de estos residuos.

Tabla 3.5 Costos por transporte y disposición de ROC.

Concepto	Costo (MXN)	Unidad
Recolección y transporte	220	Tonelada
	4.16 millones	Anual
Disposición en relleno sanitario	140	Tonelada
	2.63 millones	Anual

Se realizó una estimación de los costos energéticos del proceso de CHT. Con los datos del proceso que dio una mejor relación de energía entre el hidrochar y el consumo, el cual fue la temperatura de 200 °C y tiempo de 3 h. Se tomaron los datos de la energía consumida durante el proceso, la potencia del sistema de calentamiento externo y el costo del kWh industrial. En la Tabla 3.6 se muestra los datos utilizados para este análisis.

Tabla 3.6 Datos para análisis de costos operativos a nivel laboratorio.

Concepto	Valor	Unidad
Potencia del sistema de calentamiento	0.45	kW
Energía para el proceso CHT*	2.34	kWh
Costo de kWh industrial	1.85	MXN
Costo del proceso de CHT	4.33	MXN

*Incluye acondicionamiento del reactor, proceso de CHT y secado del hidrochar.

Se estimó el costo para producir hidrochar, con los datos obtenidos en laboratorio. En la Tabla 3.7 se observan los costos energéticos para los ROC que procesa ECORI diariamente y anualmente. Para procesar 5.8 kg se estima una energía de 2.34 kWh lo equivalente a 4.33 pesos y se obtendría 1.22 kg de hidrochar aproximadamente.

Tabla 3.7 Costos energéticos para producir hidrochar.

Residuo orgánico complejo	Hidrochar	Energía para el proceso	Costo (MXN)
5.8 kg	1.22 kg	2.34 kWh	4.33
60.35 T	12.74 T	24,435 kWh	45,206
18,829 T	3,974T	65.67 GWh	14.10 millones

Wilk *et al.*, (2021) utilizaron malva de Virginia para realizar el proceso de CHT en el cual realizaron un balance energético y encontraron que en el peor de los escenarios, el uso de energía a 200 °C durante un período de 4 h es 17 veces mayor que el efecto energético que se puede lograr con la combustión del hidrocarbón.

En la Tabla 3.8 se muestra una relación de costos de distintos combustibles y su poder calorífico. El hidrochar obtenido muestra un poder calorífico menor en comparación con el carbón mineral esto se atribuye a la cantidad de materia inorgánica, no volátil, presente en el ROC. Realizar este proceso de CHT traerá un ahorro de 2.63 millones anuales en la disposición final de los ROC.

Tabla 3.8 Relación de costos de combustible y su poder calorífico.

Combustible	Costo de combustible (MXN)	Unidad	Poder calorífico (MJ/kg)	Fuente de información
Hidrochar	3,933*	Tonelada	12.08	Análisis de tesis
Carbón mineral	3,460	Tonelada	26.75	Asociación Nacional de Comercio Exterior
Gas natural	110	MXN/GJ	0.05	Comisión reguladora de energía
Combustóleo	1,600	Barril	0.03	Comisión reguladora de energía
Gas Lp	13.31	Litro	0.04	Comisión reguladora de energía

*Incluye solamente eslabones de abastecimiento y producción.

3.4 Análisis proximal del hidrochar

Se realizó el análisis proximal del hidrochar húmedo y seco, con los parámetros mencionados en la metodología de la presente investigación. En la Figura 3.3 se observa el hidrochar húmedo y seco.



Figura 3.3 Hidrochar húmedo y seco.

Por otra parte, en la Figura 3.4 muestra el comportamiento del pH para los diferentes tiempos y temperaturas utilizadas. Para el tiempo de 5 h la humedad del hidrochar húmedo fue de 44.80 % para alcanzar un valor de 6.93 % una vez seco.

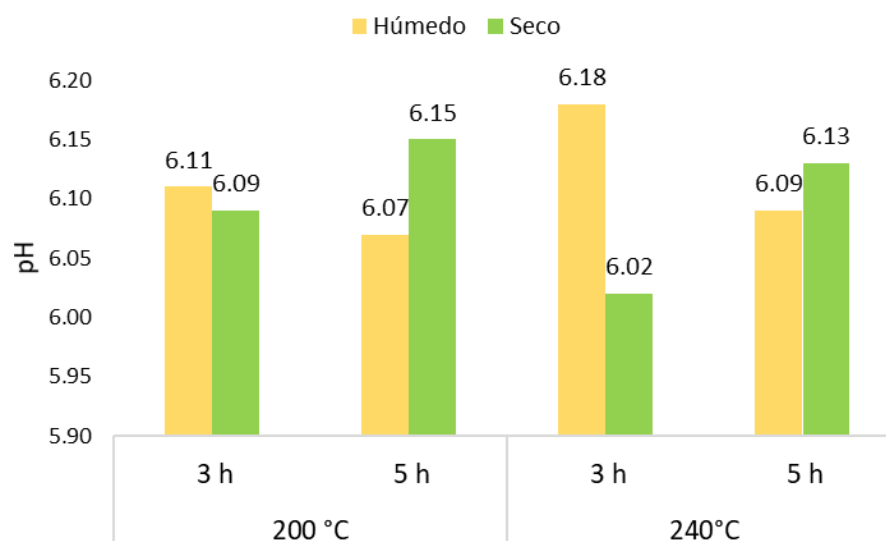


Figura 3.4. Resultados de pH del hidrochar.

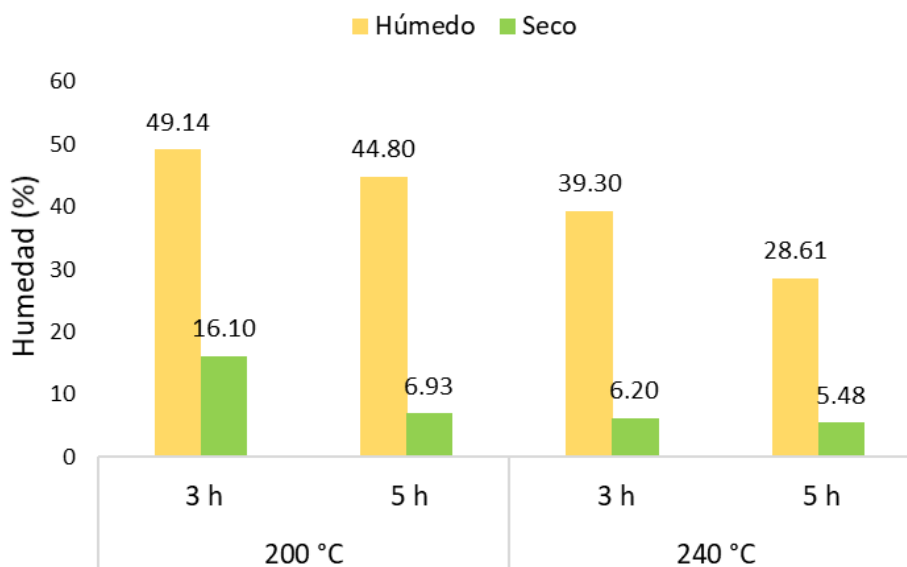


Figura 3.5 Resultados de humedad del hidrochar.

Mientras en la Figura 3.5 se observan los diferentes valores de humedad. Youn *et al.* (2022) utilizó una planta llamada kenaf para producir un biocombustible y obtuvo una humedad final de 4.79 % menor a la encontrada en esta investigación. De igual forma la humedad para el tiempo de 5 h y 240 °C disminuyó de 28.61 % para el hidrochar húmedo hasta 5.48 % para el hidrochar seco, mientras que Kannan *et al.* (2017) empleo desechos de pescado y obtuvo un porcentaje de humedad de 5 %.

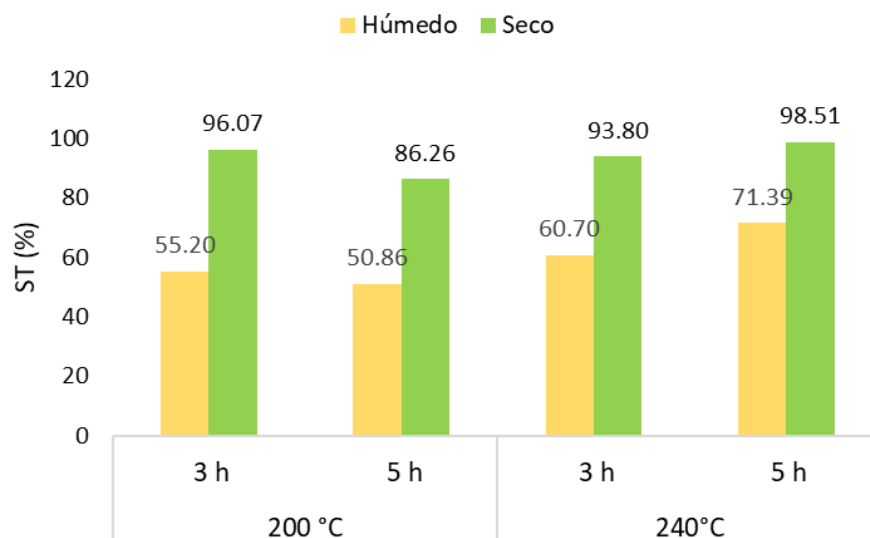


Figura 3.6. Resultados de sólidos totales del hidrochar.

En la Figura 3.6 se observa como el porcentaje de sólidos totales aumentó del hidrochar húmedo al seco un 31 % aproximadamente, para todas las condiciones de proceso utilizadas. Para el proceso CHT a 5 h y 200 °C se muestra un cambio de 50.86 a 86.26 % de sólidos totales. Esto se atribuye a la cantidad de agua que el residuo perdió durante el proceso de CHT.

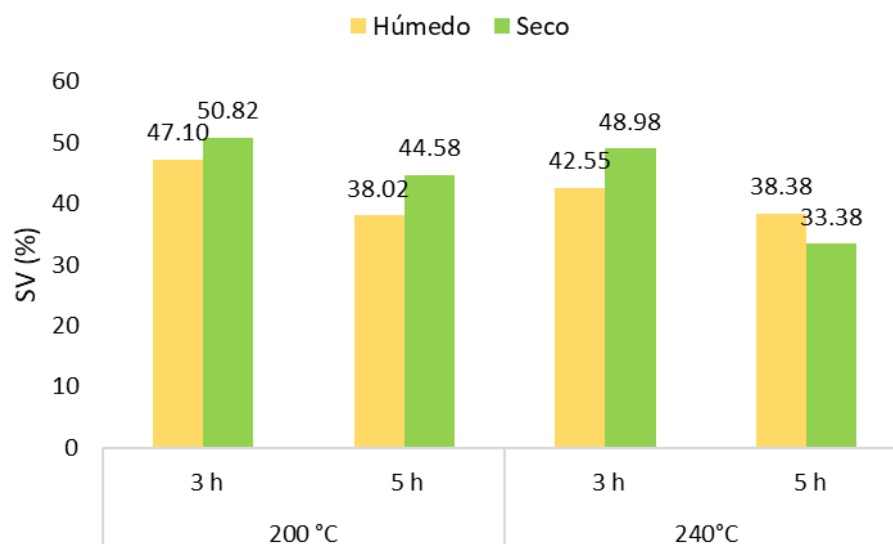


Figura 3.7. Resultados de sólidos volátiles del hidrochar.

Así mismo para los sólidos volátiles la tendencia durante el proceso fue de disminución y se muestran en la Figura 3.7 con un valor de hasta 38.02 % para la CHT de 5 h y 200 °C, en comparación con los valores iniciales del ROC 60.94 %. Una vez seco el hidrochar se observa que el valor para la mayoría de las condiciones fue un aumento en los sólidos volátiles a excepción del proceso de 5 h y 240 °C que para el hidrochar húmedo fue de 38.38 % y disminuyó este valor a 33.38 % en el seco. Mientras que Nava-Pacheco, (2021) empleó residuos cítricos de limón y obtuvo valores de 61.48 % mayor al encontrado en esta investigación, para el hidrochar húmedo y 46.50 % para el seco.

En la Figura 3.8 se muestran los valores para el porcentaje de cenizas para el proceso de 5 h y 200 °C fue de 61.98 % para el hidrochar húmedo y 55.42 % para el seco, compratamiento similar se observa en el proceso de 3 h para ambas temperaturas mientras que para el tiempo de 5 h y 240 °C se observa una tendencia de aumento del hidrochar húmedo al seco con valores de 61.62 hasta 66.62 % de sólidos volátiles.

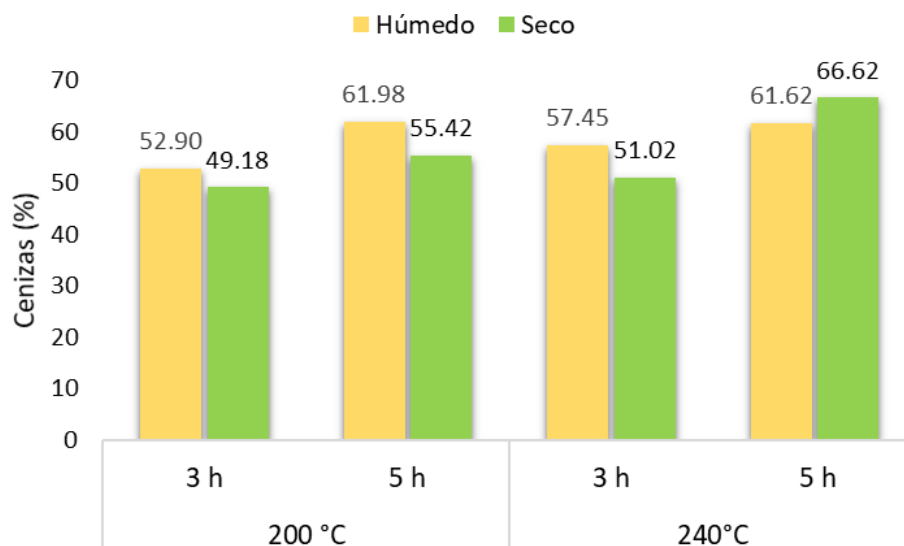


Figura 3.8. Resultados de cenizas del hidrochar.

Wu *et al.* (2017), obtuvo 34.44 % de cenizas utilizando como biomasa estiércol y temperatura de 200 °C por debajo en comparación a los resultados observados en la

Figura 3.7 estos valores de cenizas por arriba de 49.18 % relacionan la cantidad de materia inorgánica que aun esta presente en la muestra después de calcinar la materia orgánica. Por otra parte, Nava-Pacheco (2021) utilizó residuos sólidos cítricos y encontró un valor para el porcentaje de cenizas de 14.34 % menor en comparación con lo reportado en esta investigación esto se debe a la cantidad de materia orgánica de este tipo de residuos. Además, esta biomasa cítrica fue seleccionada y a diferencia con el hidrochar que fue obtenido de un residuo orgánico complejo este contiene mayor cantidad de residuos inorgánicos por la naturaleza de su origen. Esto se observa también en el trabajo presentado por González-Arias (2021), quien ocupó como biomasa poda de oliva encontrando valores de cenizas de 2.01 % todo esto se atribuye a lo mencionado anteriormente.

3.5 Composición química

Los hidrochar que fueron analizados presentan los siguientes resultados para los diferentes tiempos de operación de 3 y 5 h y 200 y 240 °C, respectivamente. La letra H indica el hidrochar y los números las distintas condiciones del proceso CHT, H1 se refiere a la 200 °C y 3 h, H2 a 200 °C y 5 h, H3 a 240 °C y 3 h, por último, H4 a 240 °C y 5 h.

3.5.1 Difracción de rayos X

Para el análisis de difracción de rayos X se graficaron los datos obtenidos y estos se observan en la Figura 3.9 donde se puede apreciar que entre los 20 y 30 ° para la muestra H1, H2 y H3 existe un pico, pero este no es característico de un material carbonoso, para estas muestras las bandas anchas están asociadas al aumento de ruido (Wortmann *et al.*, 2021). La muestra H4, que se realizó con una temperatura de 200 °C y tiempo de 5 h, no presenta picos característicos de un hidrochar, la nula presencia de estos picos muestra que se puede tratar de un material no cristalino que no es particular del carbón, esto indica que el proceso de CHT no alcanzo, en ninguna de las condiciones, a formar carbón como menciona Huang *et al.*, (2020) quien

encontró picos característicos de la celulosa entre 10 y 35 ° esto se atribuyen al carbono amorfo, lo que confirma la carbonización de la biomasa.

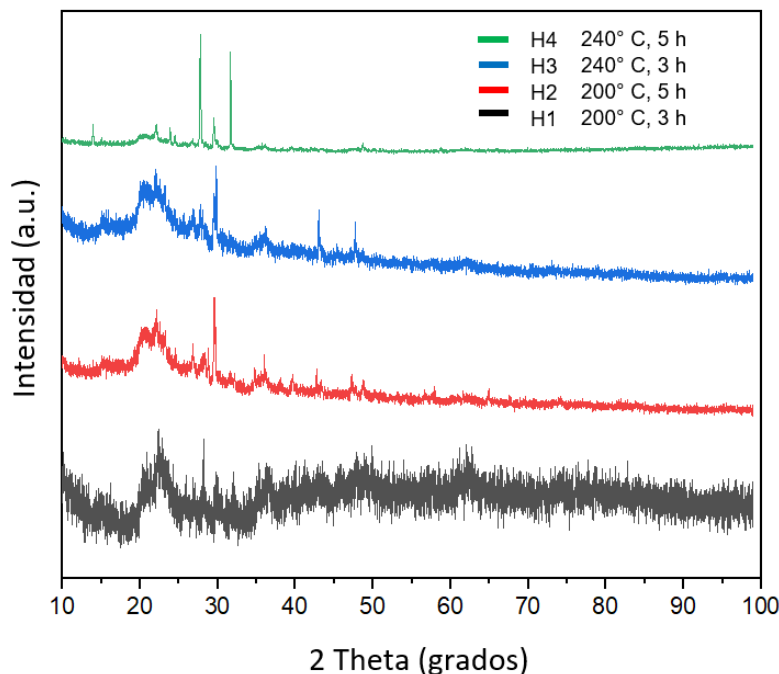


Figura 3.9. Análisis de rayos X de los hidrochar.

3.5.2 Análisis RAMAN

En la Figura 3.10 se observa el espectro Raman de los diferentes hidrochar, los diferentes espectros muestran una ligera curva entre 1000 y 1750 cm^{-1} que es el lugar donde se debería presentar las bandas D y G, relacionadas con los materiales carbonosos. La banda D esta comúnmente asociada al carbón de hibridación tipo sp^3 (Ramos, 2018), como se mencionó en el análisis de rayos X no se encuentra ningún compuesto que indique presencia de hidrochar, pero se puede notar como en la muestra H4, donde se utilizó un tiempo de 5 h y temperatura de 240 °C, se marca esta huella espectral, que asimila a una un en la parte superior de la onda, quizá si se aumenta las condiciones de temperatura y tiempo se podría alcanzar la formación de hidrochar.

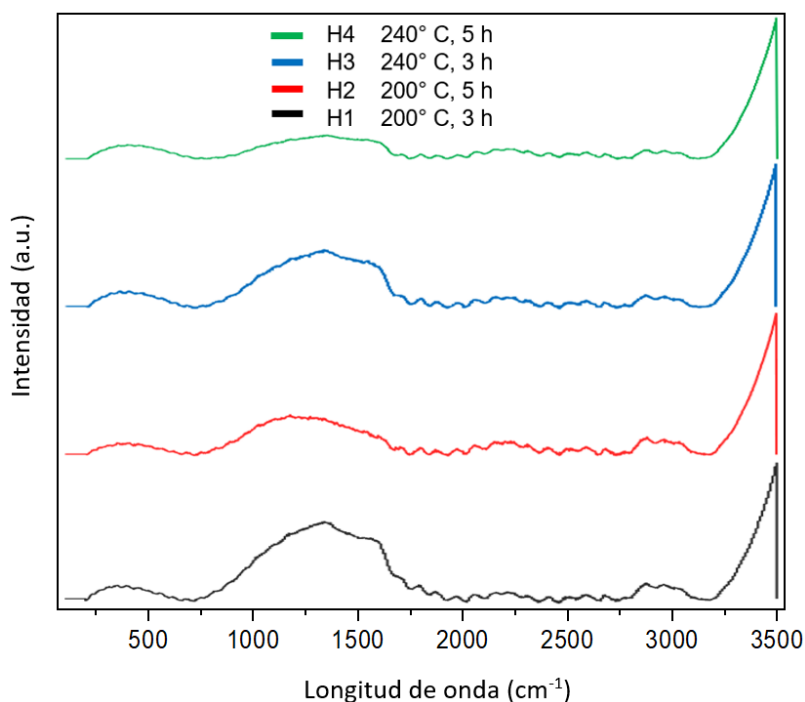


Figura 3.10. Espectroscopia de Raman de los hidrochar.

3.6 Determinación de grupos funcionales

3.6.1 Análisis FTIR

En la Figura 3.11 se muestran los análisis FTIR para todos los hidrochar como se aprecia todos los espectros son similares en forma y picos a pesar de las diferentes condiciones del proceso utilizadas, la ligera curva que esta entre 3700 cm^{-1} es el agua presente en la muestra y como se indico en los resultados de humedad se puede constatar que a una mayor temperatura la humedad en el hidrochar disminuye.

El pico a 2900 cm^{-1} indica el alargamiento asimétrico de C-H en grupos metilos y metilenos (Murillo, 2016), también se observa también una banda ubicada en los 1008 cm^{-1} asociada con los enlaces C-O, C-N del grupo carbonilo y del estrechamiento de la banda C-N (Ramos, 2018).

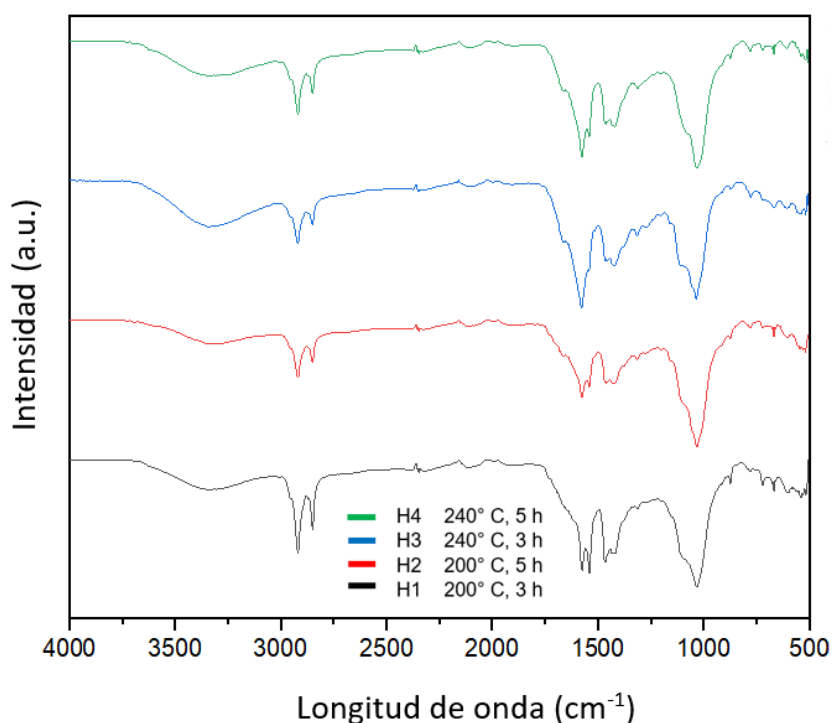


Figura 3.11. Análisis FTIR para los hidrochar.

3.7 Análisis elemental

Los resultados obtenidos del análisis elemental se muestran en la Tabla 3.9 todos los resultados mostrados son expresados en porcentaje en peso, el oxígeno se obtuvo por diferencia de peso, los análisis se realizaron por duplicado. El mayor contenido de carbono se observa en la muestra H4 con un valor de 38.47 % menor al reportado por Poowsawat (2021), quien utilizó biomasa acuática para el proceso CHT, ocupó una temperatura de 180 °C y reportó un contenido de carbono de 39.79 %.

Mientras que el menor contenido de carbono lo presenta la muestra H1 donde se ocupó la menor temperatura y menor tiempo. Se observa como al aumentar la temperatura y tiempo de residencia el contenido de carbono aumenta.

Tabla 3.9 Análisis elemental del hidrochar.

Muestra	Condiciones	Carbono	Hidrógeno	Oxígeno	Nitrógeno	Azufre
H1	200 °C y 3 h	22.46 ± 3.27	2.60 ± 0.63	73.73	0.98 ± 0.23	0.20 ± 0.10
H2	200 °C y 5 h	35.85 ± 0.45	4.42 ± 0.11	57.91	1.60 ± 0.00	0.19 ± 0.01
H3	240 °C y 3 h	35.90 ± 0.05	4.31 ± 0.10	57.70	1.91 ± 0.19	0.15 ± 0.00
H4	240 °C y 5 h	38.47 ± 2.37	4.49 ± 0.17	54.77	2.08 ± 0.14	0.16 ± 0.00

Así mismo, en la Tabla 3.9 se observa que los valores incrementan de forma proporcional para el carbono, hidrógeno y azufre conforme las condiciones de operación cambian de H1 a H4. A partir de la Ecuación 2.5, para obtener el poder calorífico superior, se espera que el oxígeno y nitrógeno disminuyan con el aumento de la temperatura y tiempo, esto con la finalidad de aumentar el PCS. El oxígeno disminuyó, contrario a lo que pasó con el nitrógeno que aumentó de H1 a H4.

3.7.1 Análisis de poder calorífico superior

Los valores teóricos obtenidos para los hidrochar se pueden observar en la siguiente Tabla 3.10, el menor poder calorífico lo muestra H1 con 3.25 MJ/kg en esta se utilizó una temperatura de 180 °C y un tiempo de 3 h, este bajo valor se atribuye al bajo contenido de carbono y alto contenido de oxígeno presente en el hidrochar, esto indica que estas condiciones de operación no son las adecuadas para el proceso. El mayor poder calorífico se observa en la muestra H4 de 13.73 MJ/kg, debido a esto se infiere que, a condiciones de temperatura y tiempo mayor, el poder calorífico en los hidrochar aumenta. Wust *et al* (2019), ocuparon residuos secos de inodoro y obtuvieron poderes caloríficos de 27 MJ/kg para las condiciones de operación utilizando una temperatura de 250 °C y tiempo de 4 h.

Tabla 3.10. Poder calorífico superior del hidrochar.

Muestra	PCS (MJ/kg)
H1	3.25
H2	11.97
H3	12.08
H4	13.43

Por otra parte, Poowsawat (2021), ocupó biomasa acuática y alcanzó valores de 19.52 MJ/kg para temperatura de operación de 220 °C valor mayor al reportado en esta investigación.

3.8 Análisis técnico-económico de la cadena de suministro

Se hizo una recopilación de información que permitió estimar los flujos de ingresos y egresos, inversión, costos de transporte, costos de mano de obra, impuestos y utilización de combustibles. A su vez, los costos escalados del equipo se calcularon a partir de los valores que se muestran en la Tabla 3.11 estos costos hacen referencia a un flujo másico específico y de los cuales se obtuvieron los costos para este proyecto (Marzbali *et al.*, 2021) tomando en cuenta las condiciones de operación de los tres escenarios.

En Orizaba se procesan aproximadamente 130 toneladas de residuos sólidos urbanos por día de los cuales según el Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos (2020), menciona que el 46.42 % se componen de residuos orgánicos, que como se menciona anteriormente a partir de los mismos se obtienen los ROC.

Tabla 3.11. Cálculo detallado para costos de equipo.

Equipo	Flujo másico original (kg/h)	Costo original (MXN)	Exponente de escala	Factor de instalación
Reactor CHT	139,013	18,743,378	0.77	2.1
Intercambiador de calor	139,013	4,670,532	0.6	1.4
Filtro prensa	553,773	3,945,523	0.68	1.9
Secador	2,522	905,000	0.8	1.6

En la siguiente Tabla 3.12 se puede observar los costos por adquisición de los equipos para los 3 escenarios que se plantean evaluar, variando la generación de ROC por día.

Tabla 3.12 Costos de adquisición y flujos másicos de equipos.

Equipo	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3	
	(MXN millones)	Flujo másico (kg/día)	(MXN millones)	Flujo másico (kg/día)	(MXN millones)	Flujo másico (kg/día)
Reactor CHT	16.46	60,346	19.55	75,433	26.48	111,872.2
Intercambiador de calor	15.68	60,346	17.93	75,433	22.72	111,872.2
Filtro prensa	4.10	60,346	4.77	75,433	6.24	111,872.2
Secador	11.57	12,069.2	13.84	15,086.5	18.97	22,374.44

- Escenario 1: Procesamiento de residuos orgánicos complejos que genera actualmente el municipio de Orizaba, 60.34 toneladas por día.
- Escenario 2: Un aumento del 25 % del procesamiento de ROC a 75.43 toneladas por día, aproximadamente lo que produce el municipio de Ixtaczoquitlán, además que la cercanía de este municipio a Orizaba no es tan grande en comparación con otros municipios vecinos.
- Escenario 3: Capacidad que tiene la Planta de Separación de Residuos Sólidos

"ECORI" para separar en su fracción orgánica que según el estudio de impacto ambiental tiene una capacidad de procesar 111.87 toneladas de ROC.

En la Tabla 3.13 se puede observar los costos de los equipos instalados para los diferentes equipos y los tres escenarios, como era de suponer el equipo que generaría un mayor costo es el reactor para el proceso para todos los escenarios.

Tabla 3.13 Costos de equipos instalados.

Equipo	Escenario 1 (MXN/millones)	Escenario 2 (MXN/millones)	Escenario 3 (MXN/millones)
Reactor CHT	34.57	41.05	55.61
Intercambiador de calor	21.96	25.11	31.81
Filtro prensa	7.79	9.06	11.85
Secador	18.52	22.14	30.35

El costo total directo se observa en la Tabla 3.14, este es la suma del costo total instalado, los edificios o construcción necesaria para iniciar, desarrollo del sitio y la tubería adicional a la que ocupan los equipos principales del proceso.

Tabla 3.14 Costo total directo.

Componentes adicionales	Escenario 1 (MXN/millones)	Escenario 2 (MXN/millones)	Escenario 3 (MXN/millones)
Costo total instalado (CTI)	82.86	97.38	129.63
Edificios	828600	973862	1.29
Desarrollo del sitio	7.45	8.76	11.66
Tubería adicional	3.72	4.38	5.83
Costo total directo (CTD)	94.87	111.50	148.43

Así mismo, el costo total indirecto se puede observar en la Tabla 3.15 que está

compuesto por, los gastos prorrateados que representan el 10 % del CTD, las tarifas de construcción y oficina el 20 % del CTI, los gastos de campo el 10 % del CTD, la contingencia del proyecto el 10 % del CTI, puesta en marcha y permisos el 5 % del CTD.

Tabla 3.15 Costos indirectos.

Costos	Escenario 1 (MXN/millones)	Escenario 2 (MXN/millones)	Escenario 3 (MXN/millones)
Gastos prorrateados	9.48	11.15	14.84
Gastos de oficina y construcción	16.57	19.47	25.92
Gastos de campo	9.48	11.15	14.84
Contingencia del proyecto	8.28	97.38	12.96
Puesta en marcha y permisos	4.74	5.57	7.42
Costo indirecto total	48.57	57.09	76.00

Por otra parte, la inversión de capital fijo (ICF) es la suma de los costos directos e indirectos totales. Se asume que el capital de trabajo es el 5 % del ICF. En última instancia, la suma de ICF y capital de trabajo (más terreno) da la inversión de capital total (ICT), como se detalla en la Tabla 3.16.

Tabla 3.16 Inversión de capital total para el proceso de CHT.

Concepto	Escenario 1 (MXN/millones)	Escenario 2 (MXN/millones)	Escenario 3 (MXN/millones)
Inversión de capital fijo	143.45	168.60	224.43
Capital de trabajo	7.17	8.43	11.22
Inversión de capital total	150.62	177.03	235.65

Por otra parte, haciendo una comparación de los resultados obtenidos en esta

investigación con los publicados por el Gobierno de la Ciudad de México, la Planta de Carbonización Hidrotermal que se construyó en CDMX necesitó una inversión aproximada de 300 millones de pesos, en los cuales se consideraron costos de actividades y programas para atender impactos ambientales (SEMARNAT, 2019). Esta planta operará con 11 reactores con una capacidad total de 2,500 toneladas de residuos por día.

3.8.1 Flujos de efectivo

Los costos de operación y mantenimiento se fijaron en un 2 % de la inversión inicial (Forgács *et al.*, 2012), implican los servicios como electricidad, agua, internet, así también la compra y adquisición de materiales para la obtención del producto, la mano de obra, contratación del personal, gastos rutinarios y el manteniendo de los equipos. En la Tabla 3.17 se observan las suposiciones que se realizaron para estimar los flujos de efectivo para el escenario 1 y que fueron las mismas suposiciones para el escenario 2 y 3.

Tabla 3.17. Suposiciones para estimar flujos de efectivo.

Concepto	Valor	Unidad
Días laborales de la planta	313	días
ROC por día	12739.04	Kg
ROC por año	3.98 M	Kg
TMAR	15.39	%
Precio de hidrochar	7.8	MXN/kg
Ganancias anuales por venta	6.5 M	MXN
Inversión inicial	150.62	MXN
Costos operativos y de mantenimiento	2	%
Costos operativos y de mantenimiento	3.01	MXN/año

El valor en la Tabla 3.18 del periodo 0 hace referencia a la inversión inicial requerida para llevar a cabo este proyecto para el escenario 1. No se consideraron costos de

transporte para el ROC debido a que se espera que la planta de CHT se supone este en las instalaciones de la planta separadora ECORI.

Tabla 3.18 Flujos netos de efectivo escenario 1.

Periodo	Ingresos (MXN/millones)	Egresos (MXN/millones)	Flujo Neto de Efectivo (millones)
0		150.62	
1	31.10	3.01	28.08
2	40.43	3.97	36.45
3	52.56	5.24	47.31
4	68.32	6.92	61.40
5	88.82	9.14	79.68
6	115.47	12.07	103.40
7	150.11	15.93	134.18
8	195.15	21.03	174.12
9	253.70	27.76	225.93
10	329.81	36.65	293.16

Tabla 3.19 Flujos netos de efectivo escenario 2.

Periodo	Ingresos (MXN/millones)	Egresos (MXN/millones)	Flujo Neto de Efectivo (millones)
0		177.03	
1	38.87	3.54	35.33
2	50.53	4.67	45.86
3	65.70	6.16	59.53
4	85.41	8.14	77.26
5	111.03	10.74	100.28
6	144.34	14.18	130.15
7	187.64	18.72	168.91
8	243.94	24.72	219.22
9	317.12	32.63	284.49
10	412.26	43107	369.18

En las siguientes Tablas 3.19 y 3.20 se observan los flujos de efectivo para los 2 y 3 escenarios respectivamente.

Tabla 3.20 Flujos netos de efectivo escenario 3.

Periodo	Ingresos (MXN/millones)	Egresos (MXN/millones)	Flujo Neto de Efectivo (millones)
0		235.65	
1	57.65	4.71	52.94
2	74.95	6.22	68.73
3	97.43	8.21	89.22
4	126.66	10.83	115.82
5	164.66	14.30	150.36
6	214.07	18.88	195.18
7	278.29	24.93	253.36
8	361.77	32.90	328.87
9	470.31	43.43	426.87
10	611.40	57.34	554.06

Posteriormente se calculó la TMAR como se menciona en la metodología para esto fue necesario encontrar los datos para ocupar la fórmula que es el valor de la inflación que a este año es de 8.41 % y se puede observar en la Figura 3.9.

De la misma manera fue necesario encontrar el valor del riesgo que se puede observar en la Figura 3.10 y para el año 2022 fue de 3.75 % para México.

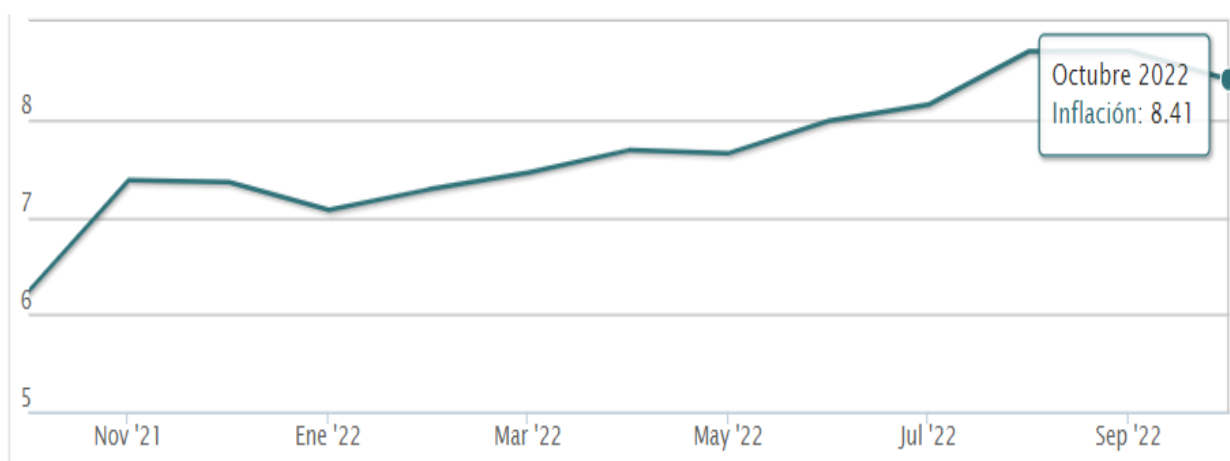


Figura 3.12. Inflación general (INEGI, 2022).

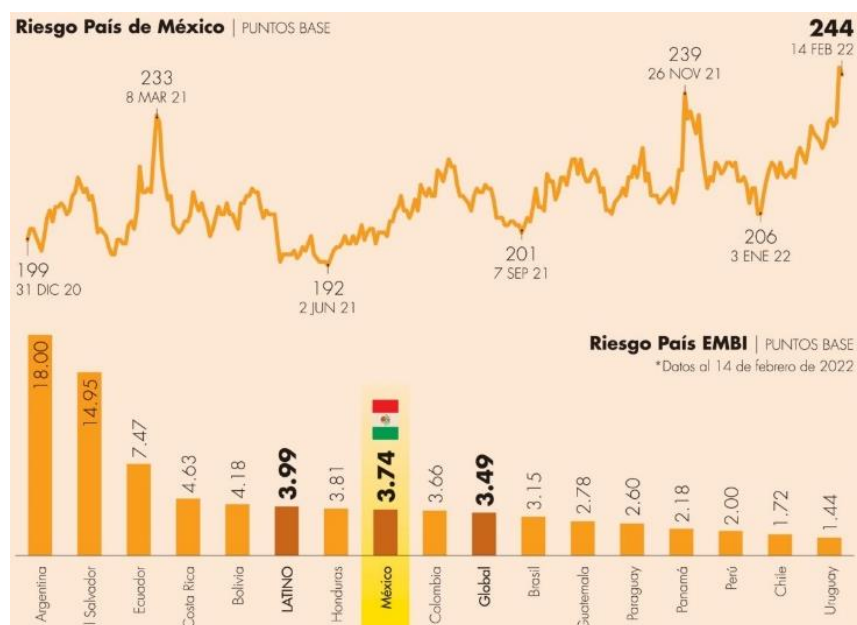


Figura 3.13. Riego de inversión en México (Lanzagorta, 2022).

Se estimo un valor de la tasa mínima aceptable de retorno de 15.39 %, a partir de un valor de 8.41 % para la inflación y de 3.74 % para el riesgo. Posteriormente se obtuvo el VPN de los tres escenarios como se menciona en la metodología y se observan en la Tabla 3.21.

Tabla 3.21. Valor presente neto para los tres escenarios.

	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 1
VPN	51.64 M	68.39 M	110.62 M

El valor obtenido para todos los escenarios fue positivo estos nos indica que el proyecto es rentable, se recomienda tomar el valor más alto de VPN. Se tomó el criterio de proyectos mutuamente excluyentes esto indica que todos los proyectos estarán compitiendo entre ellos y solo se elegirá uno, en este caso fue el escenario 3 el cual presenta un VPN mayor.

CONCLUSIONES

La cadena de suministro para la producción de hidrochar permitió conocer y entender toda la cadena mientras se maximiza la factibilidad del producto a lo largo de la misma. Sabiendo que es un proceso industrial relativamente nuevo, tener información del mismo como del manejo de los RSU permite crear acuerdos o estrategias con los actores y eslabones de la CS para aumentar la rentabilidad del proceso. Además, tener disponible estos datos ayuda a definir diseños y capacidades de los equipos industriales para el proceso CHT y a partir de estos datos realizar estudios económicos y técnicos más detallados. Así mismo, crear esta propuesta dio una idea de los posibles problemas que se pueden presentar y a su vez es el inicio para realizar simulación dinámica, con la finalidad de dar solución a problemas que se presenten tanto en el eslabón de producción como en el de distribución y abastecimiento. Además, con los datos disponibles de la CS se comenzó el análisis de costos porque a partir de estos se estimó la capacidad los equipos principales, también permitió crear los diferentes escenarios técnicos.

Convertir estos ROC en un bioenergético ayuda a disminuir los costos por disposición en rellenos sanitarios de estos residuos, y tener una economía circular debido a que el hidrochar puede ser utilizado como un combustible y reemplazar al carbón en la producción de acero y la fabricación de cemento. El proceso permitió alcanzar niveles de humedad en el hidrochar de hasta 5.48 % y un porcentaje de sólidos totales de hasta 98.51 %, para el porcentaje de cenizas se llegó a valores de 66.61 %, para el caso del poder calorífico se obtuvieron valores bajos de 13.43 MJ/kg en comparación con otras biomásas, esto se atribuye a la cantidad de material indeseable que contiene el ROC. Además, los análisis FTIR, rayos X y Raman mostraron que no se llegó a formar hidrochar de alta calidad (material carbonoso), pero en algunos espectros se pudo observar que conforme se aumentaba la temperatura se aprecia la formación de ciertos picos y curvas, aunque no como deberían, por esto se deduce que las temperaturas fueron bajas para este residuo durante el proceso de CHT. Estos valores

también se pueden atribuir a la cantidad de material inorgánico presente en el ROC, que debido a su complejidad no muestra los rendimientos de una biomasa pura como es el caso de residuos cítricos, algas, de café, etc. Esta biomasa podría ser útil con un adecuado acondicionamiento además de un catalizador que mejore el poder calorífico del hidrochar.

En cuanto a los costos para el proceso de CHT, es importante realizar este tipo de análisis económicos porque a partir de este se puede inferir si es rentable o no el proceso. Así mismo es necesario hacer las adecuaciones necesarias en cuanto a calcular costos de equipos instalados, a la capacidad de residuos a procesar y al año que se estén haciendo las estimaciones debido a que los valores obtenidos tendrán un menor margen de error menor. Para los tres escenarios se obtuvieron los siguientes datos para el valor presente neto de 51.64 M para el escenario 1 de 68.39 M para el escenario 2 y para el escenario 3 fue de 110.62 M, se puede observar una tendencia en aumento de la rentabilidad del proceso cuando la producción de hidrochar incrementa. Esto se atribuye a los costos por ahorro en disposición final además de los costos por venta del hidrochar.

Para el caso de los escenarios técnico-económicos se observa como al aumentar la cantidad de ROC a procesar y el hidrochar obtenido el beneficio económico es mayor, si se toma en cuenta un proyecto excluyente, en donde se puede elegir sólo una opción, en este caso la que de una mayor ganancia, por esto se eligió el escenario 3, en este se obtuvo un VPN de 110.6 M. El costo por producir un kg de hidrochar varía en cada escenario para el 1 el costo es de 3.57 MXN por kg, para el escenario 2 es de 3.36 MXN y para el escenario 3 es de 3.25 MXN por kg.

RECOMENDACIONES

Realizar un balance de materia y energía para obtener más datos que permitan simular el proceso y tener datos que permitan una mayor precisión en los valores obtenidos.

Utilizar temperaturas más altas para poder alcanzar la carbonización, con equipo de control de temperatura en el interior del reactor para tener la certeza de que se alcanzan las temperaturas deseadas.

Realizar una co-carbonización hidrotérmica con alguna otra biomasa con la finalidad de mejorar el poder calorífico.

Adicionar algún solvente que ayude a maximizar el poder calorífico del hidrochar y hacer una comparación de los hidrochar obtenidos.

Para el análisis técnico-económico se recomienda realizar un análisis de riesgo y sensibilidad a fin de mejorar la probabilidad de los datos y así elegir la mejor alternativa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aragón-Briceño, C., Ross, A., y Camargo-Valero, M. (2020). Mass and energy integration study of hydrothermal carbonization with anaerobic digestion of sewage sludge. *Renewable Energy*, **167**: 473-483. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.103>
- Balaman, S. Y. (2019). *Decision-Making for biomass-Based Production Chaons*. Elsevier.
- Balan-Chan, R. M., y Elizalde-Martínez, I. (2018). Algunos aspectos de producción de diésel verde a partir de materias primas de segunda generación y la tecnología del hidrot ratamiento. *Investigación e innovación tecnológica*, **6**(31).
- Barbosa, A. P., y Pinto, J. M. (2018). Challenges and Perspectives of Process Systems Engineering in Supply Chain Management. *International Symposium on Process Systems Engineering*, **87**.
- Bardham, M., Novera, T., Tabassum, M., y Islam, M. A. (2021). Co-hydrothermal carbonization of different feedstocks to hydrochar as potential energy for the future world: A review. *Journal of Cleaner Production*, 1-20. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126734>
- Berge, N. D., Li, L., Flora, J., y Ro, K. S. (2015). Assessing the environmental impact of energy production from hydrochar generated via hydrothermal carbonization of food wastes. *Waste Management*, **43**, 203-217. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.04.029>
- Berge, N. D., Ro, K. S., Mao, J., Flora, J. R., y Chappell, M. A. (2011). Hydrothermal Carbonization of Municipal Waste Streams. *Environmental Science and Technology*, **45**(13): 5696-5703. doi:<https://doi.org/10.1021/es2004528>
- Beristain. (2018). *Grupo Beristain*. Obtenido de <https://grupoberistain.com/quienes-integran-cadena-suministro>
- Blank, L. (2012). *Ingeniería Económica*. México: McGrawHill.
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2021). *Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos*. Diario Oficial de la federación . Obtenido de http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263_180121.pdf
- Castro, J. d., Peixoto-Assemany, P., Oliveira-Carneiro, A. C., Ferreira, J., y Júnior, M. M. (2020). Hydrothermal carbonization of microalgae biomass produced in agro-industrial effluent: Products, characterization and applications. *Science of the Total Environment*, **768**: 1-13.
- Cayo-Reinoso, E. L. (2018). Obtención de un biocombustible sólido por torrefacción húmeda a partir de la cáscara de la mazorca de cacao para la generación de energía. *Tesis Licenciatura*. Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Contreras, J. I. (2020). *Atlas consultora*. Obtenido de <https://www.atlasconsultora.com/estrategias-para-cadenas-de-suministro/>
- Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos. (2020). *Gobierno de México*. Obtenido de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/554385/DBGIR-15-mayo-2020.pdf>
- Du, Z., Shi, A., Ma, X., Cheng, Y., Chen, P., y Liu, Y. (2012). Cultivation of a microalga *Chlorella vulgaris* using recycled aqueous phase nutrients from hydrothermal carbonization process. *Bioresource Technology*, **126**.
- Escala, M., Zumbuhl, T., Koller, C., Junge, R., y Krebs, R. (2012). Hydrothermal Carbonization as an Energy-Efficient Alternative to Established Drying Technologies for Sewage Sludge: A Feasibility Study on a Laboratory Scale. *Energy and fuels*, 454-

- 460.
- Estrada, A. (2020). Le ahorra Ecori \$4 millones a orizabeños. *Diario el mundo*.
- Forgács, G., Pourbafrani, M., y Niklasson, C. (2012). Methane production from citrus wastes: process development and cost estimation. *Chem Technol Biotechnol*, **87**: 250-255.
- Geocycle. (2022). *Geocycle*., de <https://www.geocycle.com/> (consultada el 24 de 03 de 2022)
- González-Arias, J., Baena-Moreno, F. M., Sánchez, M. E., y Cara-Jiménez, J. (Abril de 2021). Optimizing hydrothermal carbonization of olive tree pruning: A techno-economic analysis based on experimental results. *Science of the Total Environment*, **784**: 1-12.
- Google. (s.f.). Obtenido de <https://www.google.com/maps/place/Orizaba,+Ver./@18.8590877,->
- Gronwald, M., Helfrich, M., y Don , A. (2016). tability of pyrochar and hydrochar in agricultural soil - a new field incubation method. *Geoderma*, **285**, 85-92.
- Heilmann, S. M., Davis, H. T., Jader, L. R., Lefebvre, P. A., y Sadowsky, M. J. (Junio de 2010). Hydrothermal carbonization of microalgae. *Biomass and Bioenergy*, **34**(6): 875-882.
- Hernandez, M. F. (2020). Se inaugura planta ECORI; Ayuntamiento firma convenio con Geocycle. *El sol de Orizaba*.
- Hernández-Nazario, L. (2018). 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*, **38**(2).
- Huang, Z., Shi, L., y Muhammad, Y. (2020). Effect of ionic liquid assisted hydrothermal carbonization on the properties and gasification reactivity of hydrochar derived from eucalyptus. *Journal of Colloid and Interface Science*.
- INEGI. (2014). *México en cifras*. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=30118#tabMCcollapse-Indicadores>
- INEGI. (Octubre de 2022). *Banxico*. Obtenido de <https://www.banxico.org.mx/tipcamb/main.do?page=inf&idioma=sp>
- Ishii, N., y Ohba, M. (2018). A supply chain analysis and design method based on the value of information. *International Symposium on Process Systems Engineering* , 1591.
- Jiménez-Sánchez , J., y Hernández-García, S. (2002). *Marco conceptual de la cadena de suministro: un nuevo enfoque logístico*. Secretaria de comunicaciones y transporte, Quintanarro.
- Jones, S., Zhu, Y., y Anderson, D. (2014). *Process Design and Economics for the Conversion of Algal Biomass to Hydrocarbons: Whole Algae Hydrothermal Liquefaction and Upgrading*. U.S: U.S. Department of Energy
- Kannan, S., Garipey, Y., y Raghavan, V. (2017). Optimization and characterization of hydrochar produced from microwave hydrothermal carbonization of fish waste. *Waste Management*.
- Kaushik, R., Parshetti, G. K., y Liu, Z. (Septiembre de 201). Enzyme-assisted hydrothermal treatment of food waste for co-production of hydrochar and bio-oil. *Bioresource Technology*, **168**: 267-274.
- Krysanovaa, K. O., Zaichenko, V. M., Sychev, G. A., Is'emin, R. L., y Krylova, A. Y. (2018). Effect of Temperature on the Hydrothermal Carbonization of Organic Fertilizers with the Production of Carbon Fuel. *Solid Fuel Chemistry*, **53**(2), 105-107.
- Lanzagorta, J. (agosto de 2022). Los riesgos de la inversión. *El economista*.
- Mahmood, R., Parshetti, G. K., y Balasubramanian, R. (2016). Energy, exergy and techno-economic analyses of hydrothermal oxidation of food waste to produce hydro-char

- and bio-oil. *Energy*, **102**: 187-189
- Maniscalco, M., Volpe, M., y Messineo, A. (2020). Hydrothermal Carbonization as a Valuable Tool for Energy and Environmental Applications: A Review. *Energies*, **13**(16).
- Maqhuzu, A. B., Yoshikawa, K., y Takahashi, F. (2019). Stochastic economic analysis of coal-alternative fuel production from municipal solid wastes employing hydrothermal carbonization in Zimbabwe. *Science of the Total Environment*, **716**.
- Marzbali, M., Kundu, S., Patel, S., y Halder, P. (2021). Hydrothermal carbonisation of raw and dewatered paunch waste: Experimental observations, process modelling and techno-economic analysis. *Energy Conversion and Management*, **245**.
- Medina-Martos, E., Istrate, I. R., Villamil, J. A., Gálvez-Martos, J. L., Dufour, J., y Mohedano, A. F. (2020). Techno-economic and life cycle assessment of an integrated hydrothermal carbonization system for sewage sludge. *Journal of Cleaner Production*, **277**: 1-13.
- Murillo, A. Á. (2016). Hidrocarbonización como técnica de valoración de materiales biomásicos. *Tesis Doctoral*. Universidad de extremadura, España.
- Nava-Pacheco, D. (2021). Evaluación del hidrochar obtenido de un residuo citrícola como mejorador de suelo. *Tesis de Maestría*. Instituto Tecnológico de Orizaba, Orizaba.
- Nugent, M. A. (2019). Gestión de cadena de suministro: una mirada desde la perspectiva teórica. *Revista Venezolana de Gerencia*, **24**(88): 1136-1146.
- Pacheco-Antero, R. V., Fonseca-Alves, A. C., y Botelho-Oliveira, S. (2019). Challenges and alternatives for the adequacy of hydrothermal carbonization of lignocellulosic biomass in cleaner production systems: A review. *Journal of Cleaner Production*, **1**.
- Palagot, L. I. (2020). *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.
- Pizarro, C. (2019). *Fraunhofer*. Obtenido de <https://www.fraunhofer.cl/es/fcrsb/BA/biotecnologia-ambiental/carbonizacion-hidrotermal-de-residuos-organicos-.html>
- Poowsawat, S. (2021). Analysis of hydrochar fuel characterization and combustion behavior derived from aquatic biomass via hydrothermal carbonization process. *Case Studies in Thermal Engineering*, **27**.
- Ramos, A. J. (2017). Diseño de cadenas de suministro en micro y pequeñas empresas en etapa de incubación, utilizando simulación. *Tesis*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ramos, L. G. (2018). Materiales de carbón microporosos obtenidos del brosimum alicastrum para aplicaciones en generación de energía. *Tesis*. Centro de investigación científica de Yucatán (CICY), Yucatán.
- Saha, N., McGaughy, K., Davis, S. C., y Reza, M. T. (2021). Assessing hydrothermal carbonization as sustainable home sewage management for rural counties: A case study from Appalachian Ohio. *Science of the Total Environment*, **781**: 1-9. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146648>
- San Juan. (2016). *San Juan Reciclados y Remoliciones*. Obtenido de <https://www.rdsanjuan.com/tratamiento-de-los-residuos-solidos-urbanos/>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (15 de Mayo de 2020). *Gobierno del estado*. Obtenido de <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/programas-para-la-prevencion-y-gestion-integral-de-los-residuos>
- Semaan, J.-N., Blandria, V., y Missaoui, A. (2022). Energy analysis of olive pomace valorization via hydrothermal carbonization. *Biomass and Bioenergy*, **165**.
- Segui-Amórtégui, L. (2014). Metodología para el análisis técnico-económico de los sistemas

- de regeneración y reutilización de las aguas residuales. *Scielo*, **5**(2).
- SEMARNAT. (2003). Obtenido de https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_12/pdf/Cap7_residuos.pdf
- SEMARNAT. (2019). Impacto Ambiental y Riesgo, Planta de Carbonización Hidrotermal. México.
- Sevilla, M., y Fuentes, A. B. (2009). Chemical and Structural Properties of Carbonaceous Products Obtained by Hydrothermal Carbonization of Saccharides. *Chemistry Europe*, 4195-4203.
- Solís, A. J. (2018). *Cadena de suministro y logística*. Fondo Editorial Ponfigica Universidad católica .
- Soobhany, N. (2018). Assessing the physicochemical properties and quality parameters during composting of different organic constituents of Municipal Solid Waste. *Elsevier*, **6**(2): 1979.
- Speight, J. G. (2018). *Reaction Mechanisms in Environmental Engineering*. (Butterworth-Heinemann, Ed.) Elsevier.
- Speight, J. G. (2019). *Handbook of Industrial Hydrocarbon Processes*. Wyoming: Elsevier.
- Tapia-Gómez. (2017). Codigestión de residuos sólidos orgánicos generados en las. *jeeos*, **1**(1): 71.
- Wilk, M., Sliz, M., y Gajek, M. (2021). The effects of hydrothermal carbonization operating parameters on high-value hydrochar derived from beet pulp. *Renewable Energy*.
- Wortmann, M., Waldemar, K., y Bennet, B. (2021). Pyrolysis of sucrose-derived hydrochar. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 161
- Wu, K., Gao, Y., Zhu, G., y Zhu, J. (2017). Characterization of Dairy Manure Hydrochar and Aqueous Phase Products Generated by Hydrothermal Carbonization at Different Temperatures. *Journal Analytical and Appued Pyrolysis*.
- Wust, D., Rodriguez-Correa, C., Suwelack, K., y Kohler, H. (2019). Hydrothermal carbonization of dry toilet residues as an added-value strategy – Investigation of process parameters. *Journal of Environmental Management*, 234, 537-545.
- Yokoyama, M. (29 de Septiembre de 2020). *News Medical*. Obtenido de [https://www.news-medical.net/life-sciences/What-is-Dehydration-Synthesis-\(Spanish\).aspx](https://www.news-medical.net/life-sciences/What-is-Dehydration-Synthesis-(Spanish).aspx)
- Youn, H. S., Kim, S. J., y Kim, G. H. (2022). Enhancing the characteristics of hydrochar via hydrothermal carbonization of Korean native kenaf: The effect of ethanol solvent concentration as co-solvent and reaction temperature. *Fuel*, **331**.
- Yuan, X., Dissanayake, P., Gao, B., Liu, W.-J., Lee, K. B., y Ok, S. Y. (2021). Review on upgrading organic waste to value-added carbon materials for energy and environmental applications. *Journal of Environmental Management*, **296**: 1-24.