



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL



**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
CIIDIR MICHOACÁN**

**PRODUCCIÓN DE BIOCHAR A PARTIR DE LODOS RESIDUALES UTILIZANDO
ENERGÍA TÉRMICA SOLAR**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGRÍCOLA SUSTENTABLE**

**PRESENTA:
JUAN ROSARIO EQUIHUA SORIANO**

**DIRECTORES:
DRA. MARTHA ALICIA VELÁZQUEZ MACHUCA
DR. JOSÉ VENEGAS GONZÁLEZ**

JIQUILPAN, MICHOACÁN, MÉXICO, AGOSTO 2016.

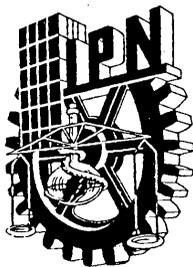
AGRADECIMIENTOS

A mis directores de tesis: Dra. Martha y Dr. Venegas por su invaluable apoyo para la culminación de este trabajo de investigación.

A Doña Cata, por su hija extraordinaria que vivió junto a mí durante los 10 años más hermosos de mi vida, que su dios la premie y me permita horrarla muchos años más.

A CONACYT por el apoyo económico durante el periodo de maestría.

A Paulo, Erika, Lupita y Silvia Chávez fieles testigos de nuestro caminar.



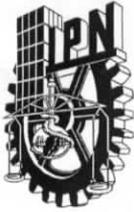
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de Jiquilpan de Juárez Michoacán el día 12 del mes Noviembre del año 2015, el que suscribe Juan Rosario Equihua Soriano alumno del Programa de **Maestría en Ciencias en Producción Agrícola Sustentable** con número de registro B131026, adscrito a **C.I.I.D.I.R. I.P.N. Unidad Michoacán**, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Martha Alicia Velázquez Machuca y José González Venegas cede los derechos del trabajo titulado Producción de biochar a partir de lodos residuales utilizando energía térmica solar al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección malivelazquez@hotmail.com, equihua_soriano@hotmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Juan Rosario Equihua Soriano



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de Jiquilpan, Michoacán siendo las 12:00 horas del día 12 del mes de Noviembre del 2015 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CIIDIR Unidad Michoacán para examinar la tesis titulada:

“Producción de biochar a partir de lodos residuales utilizando energía térmica solar”.

Presentada por el alumno:

Equihua

Soriano

Juan Rosario

Apellido paterno

Apellido materno

Nombre

Con registro:

B	1	3	1	0	2	6
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

Maestría en Ciencias en Producción Agrícola Sustentable

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA
Directores de tesis

Martha Alicia

Dra. Martha Alicia Velázquez Machuca

Dr. José Venegas González

Dr. José Luis Montañez Soto

Dr. Luis Fernando Ceja Torres

Dr. José Luis Pimentel Equihua

Dra. Hortencia Gabriela Mena Violante

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES



ÍNDICE	PAG.
RESUMEN.....	10
ABSTRACT.....	11
I. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1 Calidad y disponibilidad del agua	12
1.2 Problemática del tratamiento de las aguas residuales.....	12
1.3 Problemática de los lodos residuales	13
II. OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo general.....	14
2.2 Objetivos específicos	14
III. REVISIÓN DE LITERATURA.....	14
3.1 Tratamiento de aguas residuales	15
3.2 Alternativas de tratamiento de aguas residuales.....	15
3.2.1 Pre-tratamiento.....	16
3.2.2 Tratamientos primarios y secundarios.....	16
3.2.3 Tratamientos avanzados.....	17
3.3 Propiedades físico-químicas de lodos residuales	18
3.4 Alternativas de tratamiento aplicables a lodos residuales	21

3.4.1 Digestión anaerobia de lodos residuales	21
3.4.2 Digestión aerobia de lodos residuales	22
3.4.3 Tratamiento químico de lodos residuales	22
3.4.4 Compostaje de lodos residuales.....	23
3.4.5 Pirólisis de lodos residuales	25
3.5 Características del biochar	29
3.6 El Biochar en el medio ambiente	30
3.7 Efecto del Biochar en la asimilación de nutrientes para las plantas.....	31
3.8 Efecto del Biochar sobre contaminantes t	31
3.9 Alternativas para la producción de Biochar	32
3.10 Energía solar	34
3.11 Sistemas de captación solar	37
3.11.1 Colectores no concentradores.....	38
3.11.2 Colectores concentradores	41
IV. MATERIALES Y MÉTODOS	47
4.1 Diseño del sistema de pirólisis.....	47
4.1.1 Reactor de pirolisis	48

4.1.2 Sistema de captación solar	49
4.1.3 Fluido de trabajo.....	53
4.2 Generación de Biochar	56
4.2.1 Selección del sitio para recolección de material básico.....	56
4.2.2 Acopio de material primario	57
4.2.4 Ensayo preliminar	57
4.2.5 Ensayo en el reactor de pirolisis solar	58
4.3 Análisis físico-químico del Biochar generado	58
4.3.1 pH y CE.....	59
4.3.2 Densidad aparente y porosidad	59
4.3.3 Contenido de materia orgánica (%)	59
4.3.4 Cuantificación de micronutrientes.....	59
4.3.5 Cuantificación de elementos totales	60
V.RESULTADOS Y DISCUSIÓN	61
5.1 Dispositivo generador de biochar	61
5.1.1 Medidas de seguridad y pruebas de operación.....	63
5.2 Producción de Biochar.....	64

5.2.1 Ensayo de laboratorio.....	64
5.2.2 Ensayo en el reactor de pirólisis.....	65
5.3 Propiedades físico-químicas del Biochar generado.....	67
5.3.1 Composición elemental	67
5.3.2 Propiedades físico-químicas en relación con el uso agronómico del Biochar	75
VI.CONCLUSIONES	79
VII.BIBLIOGRAFÍA	80

ÍNDICE DE CUADROS Y FIGURAS

CUADROS

Cuadro 1. Concentración de metales pesados contenidos en los lodos residuales de una planta típica.....	18
Cuadro 2. Composición química de los lodos residuales de una planta de tratamiento..	19
Cuadro 3. Composición porcentual del gas generado en un digestor anaeróbico.....	21
Cuadro 4. Principales tipos de colectores solares.....	36
Cuadro 5. Tratamientos de pirólisis utilizando un reactor solar.....	57
Cuadro 6. Tratamiento de temperatura y tiempos de exposición de lodos residuales en condiciones de laboratorio.....	64
Cuadro 7. Tratamientos térmicos (pirólisis) de lodos residuales a distintos tiempos de residencia. Reactor solar de pirólisis.....	65
Cuadro 8. Concentración total de Carbono, Nitrógeno y Oxígeno en el Biochar generado a diferentes tratamientos de pirólisis.....	67
Cuadro 9. Relación molar O:C en el Biochar generado.....	68
Cuadro 10. Concentración total de Ca, Mg, Na y K en el Biochar generado a diferentes tratamientos de pirólisis.....	69
Cuadro 11. Concentración total de fósforo (P), azufre (S) y cloro (Cl) en el Biochar generado a diferentes tratamientos de pirólisis.....	71
Cuadro 12. Concentración total de aluminio (Al), Silicio (Si) y Titanio (Ti) totales en el Biochar generado a diferentes tratamientos de pirólisis.....	72
Cuadro 13. Concentración total de hierro (Fe), Manganeso (Mn), Cobre (Cu) y Zinc (Zn).	73
Cuadro 14. Valores de pH, conductividad eléctrica (CE), materia orgánica (M.O.), densidad aparente (Dap), porosidad y humedad en el Biochar generado a diferentes tratamientos de pirólisis.....	75
Cuadro 15. Concentración de micronutrientes (mg kg ⁻¹) en el Biochar.....	76

FIGURAS

Figura 1. Esquema general de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR).	14
Figura 2. Esquema general del proceso de pirólisis de lodos residuales.....	25
Figura 3. Esquema básico del funcionamiento de un horno de pirólisis.....	28
Figura 4. Valores de insolación en México en el mes de mayo.....	34
Figura 5. Radiación solar en la República Mexicana.....	35
Figura 6. Colector solar plano.....	38
Figuras 7 y 8. Colector solar de tubos evacuados y esquema general de su funcionamiento.....	39
Figura 9. Colector cilíndrico parabólico orientable.....	41
Figura 10. Colector solar parabolóide.....	42
Figura 11. Sistema de helióstatos con su torre central en el Desierto de Mojave, California, EE.UU.....	43
Figura 12. Colector solar tipo Fresnel.....	44
Figura 13. Diseño CAD del reactor de pirólisis.....	46
Figura 14. Proceso de construcción del dispositivo para generar Biochar por pirólisis.	60
Figura 15. Proceso de construcción del dispositivo para generar Biochar por pirólisis.	61
Figura 16. Detalles del proceso de construcción del dispositivo para generar Biochar por pirólisis.....	61
Figura 17. Termopar utilizado para la medición de la temperatura interna en el dispositivo y válvulas de control de temperatura y presión.....	62
Figura 18. Aspecto del biochar obtenido por pirólisis (tratamiento T4) en mufla a partir de lodos residuales.....	63
Figura 19. Tratamientos de pirólisis y masa final del producto obtenido (Biochar).....	65
Figura 20. Concentración total de carbono (C), nitrógeno (N) y oxígeno (O) en el Biochar producido a diferentes tratamientos de pirólisis.....	68

Figura 21. Concentración total de calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na) y potasio (K) en el Biochar producido a diferentes tratamientos de pirólisis.....	70
Figura 22. Concentración de fósforo (P), Azufre (S) y Cloro (Cl) totales en el Biochar producido a diferentes tratamientos de pirólisis.....	71
Figura 23. Concentración de aluminio (Al), Silicio (Si) y Titanio (Ti) totales en el Biochar producido a diferentes tratamientos de pirólisis.....	73
Figura 24. Concentración de Hierro (Fe), Manganeso (Mn), Cobre (Cu) y Zinc (Zn) totales en el Biochar producido a diferentes tratamientos de pirólisis.....	74
Figura 25. Concentración de micronutrientes en relación con el tiempo de pirólisis. Extracción con DTPA.....	77
Figura 26. Concentración de micronutrientes en relación con el tiempo de pirólisis. Extracción con EDTA.....	77

RESUMEN

Los lodos residuales son sólidos producidos durante el tratamiento de las aguas residuales y su disposición segura representa actualmente un severo problema debido a su contenido de patógenos y sustancias tóxicas. El tratamiento por pirólisis de lodos residuales, usando energía térmica solar, se plantea en esta investigación como una alternativa para su uso sustentable en agricultura. Los objetivos específicos del trabajo fueron: diseñar y construir un prototipo para realizar pirólisis que funcione con energía solar térmica; caracterizar las propiedades físico-químicas del Biochar generado y analizar la factibilidad de su uso como mejorador de suelos agrícolas. El sistema de pirólisis diseñado constó de un reactor ANSI 310, con un volumen de 0.001 m³, sistema intercambiador de calor a base de cobre; un sistema de captación solar con espejos reflectores, espejo colector y el tubo absorbente y el fluido de trabajo (aceite?). Los lodos residuales se obtuvieron de la PTAR Atapaneo de Morelia, Michoacán y se sometieron a tratamientos de pirólisis (0.5 a 4 horas, 280 a 355°C) en el reactor. El Biochar obtenido se analizó para elementos totales (C, N, O, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Fe, Ti, Mn, Cu, Zn), pH, CE, M.O., densidad aparente (Dap), porosidad, humedad, Fe, Cu, Mn y Zn disponibles (DTPA y EDTA). El Biochar generado presentó altos porcentajes de C, N y O y bajo grado de aromatización. Los contenidos de Mg, Na, K, P, S, Cl, Al, Si y Mn totales aumentaron significativamente con los tratamientos de pirólisis mientras que Ca, Ti, Fe, Cu y Zn no fueron significativos. La CE, M.O. y humedad disminuyeron significativamente con los tratamientos, en tanto que el pH, la Dap y la porosidad no fueron afectadas. El Cu, Mn, Zn y Fe disponibles disminuyeron con los tratamientos de pirólisis, siendo el Cu el elemento más afectado. El Biochar obtenido puede ser adecuado como mejorador de suelos por su baja salinidad (CE), pH neutro, alto contenido de N total y M.O. La disminución del Cu, Fe, Mn, Zn disponibles con los tratamientos de pirólisis indica que el Biochar generado retiene fuertemente estos metales y contribuye a disminuir su movilidad en los suelos donde potencialmente se aplique. Es conveniente, sin embargo, realizar estudios más detallados sobre el comportamiento de este Biochar en los suelos donde es factible su utilización como mejorador.

Palabras clave: Lodos residuales, Biochar, retención de metales, mejorador agrícola.

ABSTRACT

Sewage sludge are solids produced during wastewater treatment and safe disposal represents a severe problem because of its content of pathogens and toxic substances. Treatment by pyrolysis of sewage sludge using solar thermal energy, is proposed in this research as an alternative for sustainable use in agriculture. The specific objectives were: to design and build a prototype for pyrolysis work with solar thermal energy; characterize the physicochemical properties of Biochar generated and analyze the feasibility of its use as an agricultural soil improver. The pyrolysis system designed consisted of a 310 ANSI reactor with a volume of 0.001 m³, heat exchanger system based on copper; a system of solar collector with reflector mirrors, mirror collector and the absorber tube and the working fluid (oil?). The sludge is obtained from the Atapaneo WWTP Morelia, Michoacán and underwent treatments pyrolysis (0.5 to 4 hours, 280 to 355°C) in the reactor. Biochar obtained was analyzed for total elements (C, N, O, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Fe, Ti, Mn, Cu, Zn), pH, EC, OM, bulk density, porosity, moisture, Fe, Cu, Mn and Zn available (DTPA and EDTA). The Biochar generated showed high percentages of C, N and O and low degree of aromatization. The contents of total Mg, Na, K, P, S, Cl, Al, Si and Mn increased significantly with pyrolysis treatments, while Ca, Ti, Fe, Cu and Zn were not significant. EC OM and humidity significantly decreased with pyrolysis treatments, while pH, Dap and porosity were unaffected. The Cu, Mn, Zn and Fe available decreased with pyrolysis treatments; Cu was the most affected element. The Biochar obtained may be suitable as a soil improver due to it is low salinity (EC), neutral pH, high total N and M. O. The decrease of Cu, Fe, Mn, Zn available with pyrolysis treatments indicates that the generated Biochar strongly retains these metals and helping to decrease their mobility in soils where potentially it is applies. It is convenient, however, to realize more detailed studies on the behavior of this Biochar in soils where its use as a builder is feasible.

Keywords: Sewage sludge, Biochar, retention metals, agricultural improver.

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Calidad y disponibilidad del agua

El agua es la sustancia de mayor importancia para el desarrollo y trascendencia de los seres vivos y, además, una importante materia prima en los diferentes procesos de las actividades productivas que desarrolla la humanidad. La calidad y disponibilidad de este vital líquido ha pasado a ser un grave problema social, abordado desde diferentes contextos, tanto por gobiernos, instituciones educativas y organizaciones civiles (Chávez-Alcántar *et al.*, 2011). La calidad y disponibilidad del agua son los factores donde confluyen la mayoría de las problemáticas de dicho recurso, siendo la actividad humana el principal factor que afectan la calidad del vital líquido (Pond, 2005). Las aguas contaminadas poseen un complejo nivel de residuos que debido a su peligrosidad requieren sean sometidas a diversos procesos de tratamiento para recuperar en el mejor grado posible su viabilidad de inclusión en los procesos bióticos.

1.2 Problemática del tratamiento de las aguas residuales

En México la industria destinada para el tratamiento de las aguas residuales sufre grandes rezagos, tanto en infraestructura como en operatividad. De acuerdo con lo reportado, en el año 2010 las 2186 plantas tratadoras que se encuentran instaladas en el país lograron un flujo volumétrico de 93.6 m³/s, equivalente a menos del 45% de las aguas que son colectadas por los sistemas de alcantarillado de las zonas urbana, industrial y semiurbana (CONAGUA, 2012). En Michoacán el panorama es similar e incluso peor. Para el año 2009 se reporta en la entidad una cobertura de alcantarillado global de 84%(SEMARNAT, 2009). De acuerdo con estimaciones de la misma dependencia federal, en el estado se producen anualmente 376 hm³ de aguas residuales, de las cuales la infraestructura disponible solo aplica algún método de tratamiento al 31% de dichas aguas. La infraestructura de la entidad para el tratamiento de aguas residuales es mínima, pues solo se cuentan con 45 plantas instaladas que en conjunto logran una capacidad total de 3.55 m³/s, pero en términos reales únicamente ofrecen un total de 2.47 m³/s de agua factible a reutilizarse. En la región Ciénega de

Chapala, Estado de Michoacán, el sistema de tratamiento es nulo, ello a pesar de que se cuenta con infraestructura; sin embargo, los costos de operación y la falta de personal técnico han contribuido a que dichas instalaciones sean abandonadas.

1.3 Problemática de los lodos residuales

Los lodos residuales son aquellos sólidos producidos durante el tratamiento de las aguas residuales. La composición química, origen y método de obtención de los lodos es variable, pues ello depende del método de tratamiento, el grado de remoción e infraestructura a la que han sido sujetos. Aunque la composición es diversa, en general puede decirse que los lodos residuales principalmente están constituidos de material orgánico no descompuesto, microorganismos, partículas no biodegradables, sales y otros compuestos tanto tóxicos como inocuos (Ortiz *et al.*, 1995). En la actualidad, la norma mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 establece las especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes contenidos en los lodos residuales antes de ser aprovechados o vertidos en depósitos finales. Las alternativas de tratamiento aplicables al manejo de lodos residuales son diversas, tanto en control de emisiones como el aprovechamiento de los subproductos producidos. Las opciones de manejo de los lodos comprenden desde la digestión anaerobia y aerobia, fosas sépticas, compostaje, empleo como biofertilizantes e incluso incineración.

En México, una de las principales limitaciones para la reutilización de los lodos residuales en actividades como la agricultura es su contenido microbiológico (Barrios *et al.*, 2000). Junto a esto, se carece de protocolos específicos de tratamiento y existe una deficiente vigilancia de las dependencias correspondientes, por lo que los lodos generados en las plantas de tratamiento terminan en campos de cultivo, en los centros de residuos sólidos municipales e incluso en cuerpos de aguas, todo ello sin cumplir las mínimas especificaciones de la normatividad aplicable. Una alternativa de tratamiento que se plantea, es ofrecer un manejo integral de los lodos residuales mediante el proceso químico denominado pirólisis, esto con la finalidad de estabilizar los contaminantes contenidos en dicho material en un producto denominado Biochar,

además de reducir hasta un del 40% la masa total del material. Este material obtenido de la transformación química de los lodos es factible a emplearse como un mejorador de suelos en zonas estratégicamente seleccionadas. En relación con los beneficios planteados por la generación de Biochar a partir de lodos, el sistema de tratamiento comprende un método de operación sustentable donde los requerimientos de energía son cubiertos en su totalidad mediante la incorporación de sistemas autónomos de captación térmica solar. Una de las limitantes de dicho método es la variabilidad de contenidos contaminantes en los distintos Biochar. Esta condición demanda un monitoreo constante del material producido, seguido de las enormes infraestructuras necesarias para llevar acabo los niveles térmicos necesarios.

II. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

- ✓ Diseñar y construir un prototipo para generar Biochar como mejorador de suelos a partir de lodos residuales utilizando energía térmica solar.

2.2 Objetivos específicos

- ✓ Diseñar y construir un prototipo para realizar pirolisis que funcione con energía solar térmica.
- ✓ Caracterizar las propiedades físico-químicas del Biochar relacionadas con su potencial uso como mejorador de suelos.
- ✓ Analizar la factibilidad del Biochar generado para su uso como mejorador de suelos agrícolas.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 Tratamiento de aguas residuales

Los procesos de tratamiento de aguas residuales (AR) contemplan diversos métodos de operación que se enfocan en la regeneración de la calidad de estas aguas; estos métodos son muy diversos en términos tecnológicos, así como su alcance en la remoción de contaminantes. En México, la infraestructura para el tratamiento de las AR presenta grandes rezagos sobre su operatividad. Así, para el año 2010 sólo se trataron 93.6 m³/s en las 2,186 plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), lo que equivale a menos del 45% de las aguas colectadas en los sistemas de alcantarillado (CONAGUA, 2012). La Figura 1 muestra gráficamente un proceso de tratamiento de AR completo, aunque pocas PTAR incluyen todos los dispositivos que se muestran.

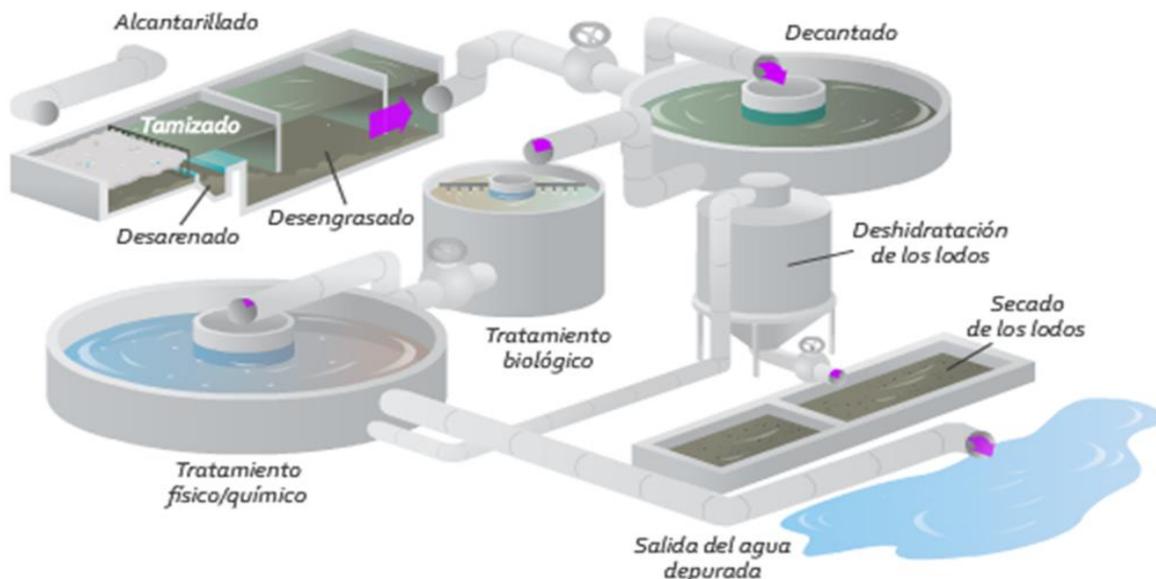


Figura 1. Esquema general de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR).

3.2 Alternativas de tratamiento de aguas residuales

Los procesos de tratamiento de aguas residuales son diversos, según su complejidad de limpieza pueden ser clasificados en: pretratamiento, tratamiento primario y tratamientos avanzados.

3.2.1 Pre-tratamiento

Estos sistemas son los más sencillos en cuanto a nivel de contaminantes removidos; su función principal radica en preparar el agua para los procesos subsecuentes. El pre-tratamiento limpia el agua de aquellas partículas de dimensiones considerables que puedan obstruir o dificultar los procesos primarios e incluye el cribado, sedimentación y flotación. La función del cribado es remover partículas de mayor tamaño como plásticos, papel y partículas que puedan ocasionar obstrucciones en los mecanismos posteriores; regularmente se capturan partículas mayores a 2 cm. El objetivo principal de la sedimentación es separar las partículas suspendidas en el agua; este sistema funciona por gravedad y emplea procesos coagulantes para atraer partículas más finas. La flotación es un proceso de clarificación para aguas de baja turbiedad y con gran contenido de algas; consiste básicamente en la separación de partículas naturales mediante el uso de sales de aluminio, hierro y/o polímeros (Marín-Ocampo y Osés-Pérez, 2013).

3.2.2 Tratamientos primarios y secundarios

El objetivo de estos tratamientos es eliminar aquellas partículas cuyo tamaño sea menor al que se pueden captar por decantación y en las rejillas. Estos sistemas se basan en métodos mecánicos y biológicos. Los principales sistemas son: 1) Percolación, que consiste en un sistema de filtros de escurrimiento por el cual las aguas negras se filtran hasta que las bacterias oxidantes crean una película y finalmente el agua es recolectada por bloques de desagüe; 2) sistema anaeróbico, el cual consiste en un proceso mediante el cual los organismos catalizan y asimilan sus alimentos en ausencia de oxígeno; 3) Lagunas de estabilización, que consisten en una excavación

en el suelo donde el agua residual se almacena para su tratamiento por medio de la actividad bacteriana con acciones simbióticas de algas y otros organismos; en este caso el agua entra en un proceso de autopurificación o estabilización natural teniendo lugar fenómenos físicos, químicos y biológicos; 4) Humedales, en los cuales se depuran las aguas residuales una vez que éstas han recibido un tratamiento previo. Estos sistemas son aeróbicos y se adaptan según cada región dependiendo del suelo y flora (Marín-Ocampo y Osés-Pérez, 2013).

3.2.3 Tratamientos avanzados

Lodos activados. Es el proceso que mayor implementación tiene en México y cerca del 46% de la infraestructura emplea este método. Consiste en que el agua residual, una vez pasado los procesos primarios, se conduce hacia un tanque aireador donde el lodo activado rico en microorganismos se mezcla con la materia orgánica de las AR. La materia orgánica es degradada en compuestos más simples por los microorganismos los cuales la utilizan como fuente de energía (Marín-Ocampo y Osés-Pérez, 2013).

Osmosis inversa. Consiste en el uso de membranas a través de las cuales se hace pasar el agua para su purificación; se emplea para la remoción de sólidos disueltos totales, incluyendo una variedad de iones, metales y partículas muy pequeñas, además de remover materia orgánica y algunos detergentes. El sistema requiere la aplicación de presión para realizar la ósmosis inversa. Estos sistemas tienen la desventaja de altos costos energéticos y que los gases disueltos si atraviesan las membranas.

Oxidación. Consiste en una oxidación química que opera mediante condiciones de presión y temperatura bajas hasta la mineralización completa de contaminantes; el agente oxidante es una especie reactiva con una elevada capacidad oxidante y con tiempos de reacción muy cortos. Este proceso permite eliminar compuestos tanto orgánicos como inorgánicos. Existe actualmente una amplia variedad de métodos de oxidación. La implementación de estos procesos se encuentra estancada debido a los

elevados costos de construcción y operación, además de requerir mano de obra calificada y la instalación de una infraestructura compleja.

3.3 Propiedades físico-químicas de lodos residuales

Los contaminantes presentes en las aguas residuales, una vez que éstas han sido sometidas al proceso de tratamiento, pasan a formar parte de los lodos residuales. En estos lodos se concentran gran variedad de contaminantes, dependiendo del nivel de tratamiento de las aguas residuales y el origen de éstas. Los lodos residuales una vez que se han depurado de las planta son sometidos a procesos de análisis para determinar sus características y su posterior evaluación para su disposición final.

Los análisis que deben realizarse a los lodos residuales, de acuerdo con las normas oficiales mexicanas, comprenden: corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad y reacciones biológico-infecciosas (análisis CRETl). A partir de estos análisis y los fundamentos establecidos en la norma mexicana NOM-052-ECOL-1993, se determina si dichos lodos son considerados como residuo peligroso o no peligroso para posteriormente realizar una correcta disposición final. Dependiendo del origen, proceso y del grado de remoción de contaminantes que se aplique a las aguas residuales será la concentración de contaminantes presentes en los lodos residuales. Considerando los sistemas de tratamiento de aguas residuales convencionales, se tiene tres tipos principales de lodos residuales: 1) lodos primarios, son aquellos residuos sólidos generados durante las primeras etapas del proceso de limpieza y generalmente se obtienen después que al agua ha pasado la etapa de desarenado; 2) lodos secundarios, que comprende los residuos sólidos generados durante las etapas de mayor remoción de contaminantes (procesos biológicos) y son el resultado de la conversión de productos de desechos solubles; 3) lodos químicos, que son el resultado directo de la aplicación de productos químicos usados para causar una precipitación química de los compuestos y la remoción de sólidos suspendidos. Los productos químicos usados regularmente son las sales de aluminio o fierro y cal, principalmente.

Los lodos residuales son producidos principalmente por el tratamiento biológico, aunque no necesariamente; su formación tiene lugar en mayor medida durante los procesos de tratamiento de aguas residuales como lodos activados, filtros rociadores y biodiscos, entre otros (Cardoso y González, 1995). La composición general de los lodos residuales es importante, dependiendo del uso que se quiera dar a éstos y para el control del proceso de tratamiento; por ejemplo, la medición de parámetros como el pH y el contenido de ácidos orgánicos es importante para el control del proceso de digestión anaeróbica. Las concentraciones de metales pesados, pesticidas y componentes de origen petroquímico; por otro lado, son referentes determinantes cuando se pretende someter a los lodos residuales a un proceso de tratamiento por medio de la incineración. La concentración usual de elementos tóxicos en los lodos residuales se muestra en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Concentración de metales pesados contenidos en los lodos residuales de una planta típica.

Metal	Concentración (mg kg ⁻¹)
Arsénico	1.1-230
Cadmio	1-3410
Cromo	10-99000
Cobalto	11.3-2490
Cobre	84-17000
Estaño	2.6-329
Hierro	1000-154000
Plomo	16-26000
Manganeso	32-9870
Mercurio	.6-54
Molibdeno	.1-214
Níquel	2-5300
Selenio	1.7-17.2
Zinc	101-49000

Asimismo, el contenido energético de los lodos residuales es un factor considerable para aquellos sistemas de tratamiento donde se contempla un proceso de reducción térmica o con fines de generación de energía para cogeneración y abastecimiento. La utilización de los lodos residuales con fines agrícolas, específicamente como fertilizantes, debe considerar un análisis de aquellos componentes que pueden afectar el desarrollo de los cultivos y aspectos sanitarios, puesto que pueden ser una vía para la introducción de elementos tóxicos a la cadena alimenticia (ejemplo, metales pesados, microorganismos y otros elementos y compuestos tóxicos). Desde el punto de vista de la nutrición vegetal, es importante el contenido de nitrógeno, fósforo y potasio principalmente; en relación con los micro-elementos con fines agrícolas, dado su baja demanda por las plantas, casi cualquier presencia de éstos en los lodos residuales serán considerados como perjudiciales (Campos-Medina *et al.*, 2009). En el Cuadro 2 se muestra la concentración de los principales contaminantes que pueden estar presentes en los lodos residuales de una planta de tratamiento típica.

Cuadro 2. Composición química de los lodos residuales de una planta de tratamiento.

Parámetro	Lodos primarios	Lodos secundarios	Lodos digeridos
Sólidos totales	2-8	.83-1.16	6-12
Volátiles (% ST)	60-80	59-88	30-60
Grasas (% ST)	13-65	5-20	-
Proteínas (% ST)	20-30	32-41	15-20
Nitrógeno (% ST)	1.5-4	2.4-5	1.6-6
Fósforo (% ST)	.8-2.8	2.8-11	1.5-4
Potasio (% ST)	0-1	.5-.7	0-.3
Celulosa (% ST)	8-15	-	0-.3
Hierro	2-4	-	3-8
Silicio (% ST)	15-20	-	6
pH	5-8	6.5-8	6.5-7.5

3.4 Alternativas de tratamiento aplicables a lodos residuales

El aprovechamiento y disposición final de los lodos residuales debe incluir un procesamiento previo para su correcto manejo final. Durante el proceso de tratamiento de las aguas residuales, los lodos residuales deben ser aglutinados y separados mediante un proceso de espesamiento; éste consiste en incrementar el contenido de dichos sólidos por unidad de volumen con la finalidad de reducir al mínimo posible el porcentaje de lodos en solución. Los procesos de aglutinación utilizan las técnicas de gravedad, flotación, centrifugación, filtros banda y tambor rotatorio. Una vez que los lodos han sido aglutinados, y que poseen valores de humedad cercanos al 90%, son sometidos a procesos de tratamiento que comprenden diferentes técnicas así como diferentes alcances de remoción de contaminantes. La implementación de estos tratamientos se determina de acuerdo al contenido de contaminantes y nivel de estabilización que se requiera aplicar. Dentro de las técnicas de estabilización que se manejan están la oxidación biológica, oxidación química o por suministro de calor. Estas técnicas de estabilización comprenden la digestión aeróbica y anaeróbica, el compostaje y la estabilización con cal (Cardoso y González, 1995).

3.4.1 Digestión anaerobia de lodos residuales

Este proceso comprende la transformación de materiales orgánicos por medio de microorganismos. Durante este proceso, los lodos residuales son transformados por las bacterias generando sub-productos como metano, dióxido de carbono y ácido sulfúrico, además de un residuo sólido denominado lodos estabilizados. El objetivo es lograr la degradación de compuestos complejos a moléculas más simples tales como ácidos grasos, monosacáridos, aminoácidos y compuestos aromáticos, todos ellos compuestos de cadenas cortas. Una vez llevadas a cabo estas transformaciones, los ácidos comienzan su transformación en metano, dióxido de carbono y otros gases. En el Cuadro 3 se presentan las composiciones típicas de un biogás generado en un reactor anaeróbico (Cardoso y González, 1995).

Cuadro 3. Composición porcentual del gas generado en un digestor anaeróbico.

Gas	Volumen (%)
Metano (CH ₄)	55-75
Bióxido de Carbono (CO ₂)	25-45
Nitrógeno (N ₂)	2-6
Hidrógeno (H ₂)	0.1-2
Ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄)	1-1.5

3.4.2 Digestión aerobia de lodos residuales

La estabilización de los lodos residuales mediante este proceso se basa en la digestión por parte de microorganismos, los cuales debido al poco alimento disponible comienzan a consumir su propio protoplasma. En este proceso el tejido celular es oxidado y transformado a dióxido de carbono, agua y nitratos. Entre el 75 y 80 % de las células son oxidadas, el resto lo conforman compuestos orgánicos no biodegradables (Cardoso y González, 1995). La digestión aerobia no requiere de sofisticados equipos ni personal calificado, los costos de operación son mínimos y de igual forma los problemas seguridad. Un factor considerable en este método son los elevados costos energéticos y la disminución de la eficiencia durante episodios de disminución de temperatura. Los tiempos de retención de los lodos varían de cinco a seis días llegando a presentarse temperaturas de 55°C.

3.4.3 Tratamiento químico de lodos residuales

La incorporación de productos químicos a los lodos residuales es otra opción para la estabilización de dichos residuos. Las aplicaciones de cal son las técnicas más comúnmente implementadas por los sistemas de tratamiento, debido al alcance en

cuanto a oxidación de la materia orgánica, eliminación de microorganismos y desinfección. Este proceso consiste en aplicar cal con fines de elevar el pH y provocar la inactivación de bacterias. Existen dos procesos de encalado: pre-estabilización y pos-estabilización. El primer tipo de encalado es aplicable a pequeñas plantas de tratamiento y consiste en agregar cal a los lodos residuales inmediatamente después de salir del tratamiento de las aguas residuales; posteriormente estos lodos pueden ser utilizados con fines agrícolas. Los niveles de cal requeridos son los necesarios para elevar el pH hasta 12 puntos y se mantiene el tiempo de contacto por 2 horas. El segundo método de encalado considera la aplicación de cal una vez que dichos lodos han sido deshidratados; una de las limitantes de este método es la homogeneización de la mezcla (Castrejón *et al.*, 2000; Hospido *et al.*, 2005).

3.4.4 Compostaje de lodos residuales

El funcionamiento de este método consiste en la descomposición biológica del material orgánico que se encuentra contenido en los lodos; este proceso puede tener lugar tanto de forma aerobia como anaerobia. Las condiciones de compostaje comprenden rangos de temperatura de entre 50 y 70°C, lo cual destruye organismos patógenos y convierte los lodos en un producto apto para resolver problemas de fertilidad de suelos. Este proceso se desarrolla en tres etapas: 1) transformación de lodos en materia orgánica mediante la estabilización del material residual; 2) condiciones térmicas para la eliminación de patógenos; 3) reducción del volumen de dichos lodos ya transformados en materia orgánica.

Los procesos de compostaje, independientemente del material que se requiera transformar el compost, comprende tres procesos fundamentales: el mezclado, la digestión aerobia termofílica y el curado. El mezclado de lodos consiste en preparar el material que será sometido a transformación en compost. En esta etapa se pretende lograr una estructura y porosidad al material para lograr una correcta aireación, aumentar la relación carbono:nitrógeno (30:1, puesto que los lodos son ricos en nitrógeno) y, finalmente, realizar un correcto mezclado ya que este definirá la rapidez de

la digestión. La digestión aerobia termofílica es una etapa avanzada del proceso de compostaje que comprende la estabilización de los lodos por medio de microorganismos degradadores, los cuales al digerir el material en cuestión elevarán la temperatura a más de 60°C provocando la destrucción de organismos patógenos. El curado es la etapa final y consiste en retirar la mezcla del área de compostaje con el fin de asegurar una correcta estabilización del compost, así como remover los compuestos orgánicos tóxicos; este proceso tiene una duración aproximada de 30 días (Defrieri *et al.*, 2005; Vicencio-De La Rosa *et al.*, 2011; Salazar-Briones *et al.*, 2011).

Los parámetros de humedad, porosidad, temperatura, relación carbono-nitrógeno(C/N), pH y aireación son determinantes en el proceso de compostaje y afectan directamente el tiempo de residencia de los lodos, así como la calidad de los mismos. En relación con la humedad, los lodos vertidos por las plantas tratadoras de aguas residuales poseen regularmente entre el 85 y 95% de humedad, siendo necesaria la deshidratación de estos, ya que un proceso de compostaje demanda una humedad del orden de 60%. La humedad es un factor determinante dado que un exceso afecta la porosidad y por ende la aireación. La porosidad es una propiedad determinante para mantener una correcta aireación y favorecer un mezclado homogéneo, siendo el tamaño de las partículas el factor principal a observar; es recomendable un tamaño de partícula de 10 a 15 cm. La temperatura influye en las poblaciones microbianas que ayudan a la degradación de los lodos y en la sobrevivencia los agentes patógenos; éstos últimos son susceptibles a humedad y temperatura elevadas. Los rangos de temperatura óptimos para un desarrollo estable del compostaje oscilan sobre los 55°C, ya que a mayores temperaturas los organismos promotores del compostaje no sobreviven (Barrios *et al.*, 2000; Hospido *et al.*, 2005; Limón-Macías, 2013).

Otro de los parámetros importante, la relación carbono:nitrógeno (C/N), se basa en que los microorganismos descomponedores demandan carbono como alimento, a la vez que requieren de nitrógeno para la síntesis de las proteínas. La relación C:N que se considera adecuada es 30:1. El valor de pH es un factor determinante para el desarrollo de los microorganismos transformadores del material orgánico; el intervalo del pH de 5-

8 favorece el desarrollo de estos microorganismos, de lo contrario el proceso es más prolongado. Durante las fases iniciales del proceso de compostaje se forman ácidos orgánicos que benefician el proceso de neutralización, además de incrementar la presencia de microorganismos. Al finalizar el proceso de compostaje los productos tienen rangos de pH cercanos a 7.

La aireación del material es importante para que el proceso de transformación tenga lugar, puesto que los microorganismos encargados de la degradación requieren de oxígeno para realizar sus actividades metabólicas. Así, durante el compostaje es necesario mantener una aireación adecuada. Las demandas de oxígeno en etapas iniciales requieren del 5-15%, el cual puede ser suministrado por movimiento mecánico o por ventilación utilizando sistemas de inyección y succión (Barrios *et al.*, 2000; Hospido *et al.*, 2005; Limón-Macías, 2013).

3.4.5 Pirólisis de lodos residuales

La pirólisis como proceso de transformación química se lleva a cabo en ambientes libres de oxidantes. El proceso involucra el rompimiento molecular de los componentes más débiles, estructuralmente hablando, dando así origen a nuevos compuestos con estructuras simples. Para que la pirólisis tenga lugar es necesario una fuente de trabajo que excite las moléculas del material, esta fuente de trabajo se limita principalmente al suministro de energía térmica (Gil *et al.*, 2007; Fajardo-Villaquiran, 2011; Chun *et al.*, 2013).

El resultado de la transformación química por pirólisis comprende la generación de diversos productos que pueden ser físicamente identificables: productos sólidos, líquidos y gaseosos. Dentro de los productos gaseosos pueden presentarse compuestos de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), etano (C₂H₆) y otros hidrocarburos en bajas concentraciones. Los productos líquidos son muy diversos y puede encontrarse en ellos agua, cetonas, ácido acético y compuestos aromáticos en diferentes porcentajes. Uno de los productos sólidos es un

residuo con alto contenido de compuestos hidrocarbonados denominado Biochar. La Figura 2 muestra un esquema general del proceso de pirólisis de lodos residuales.

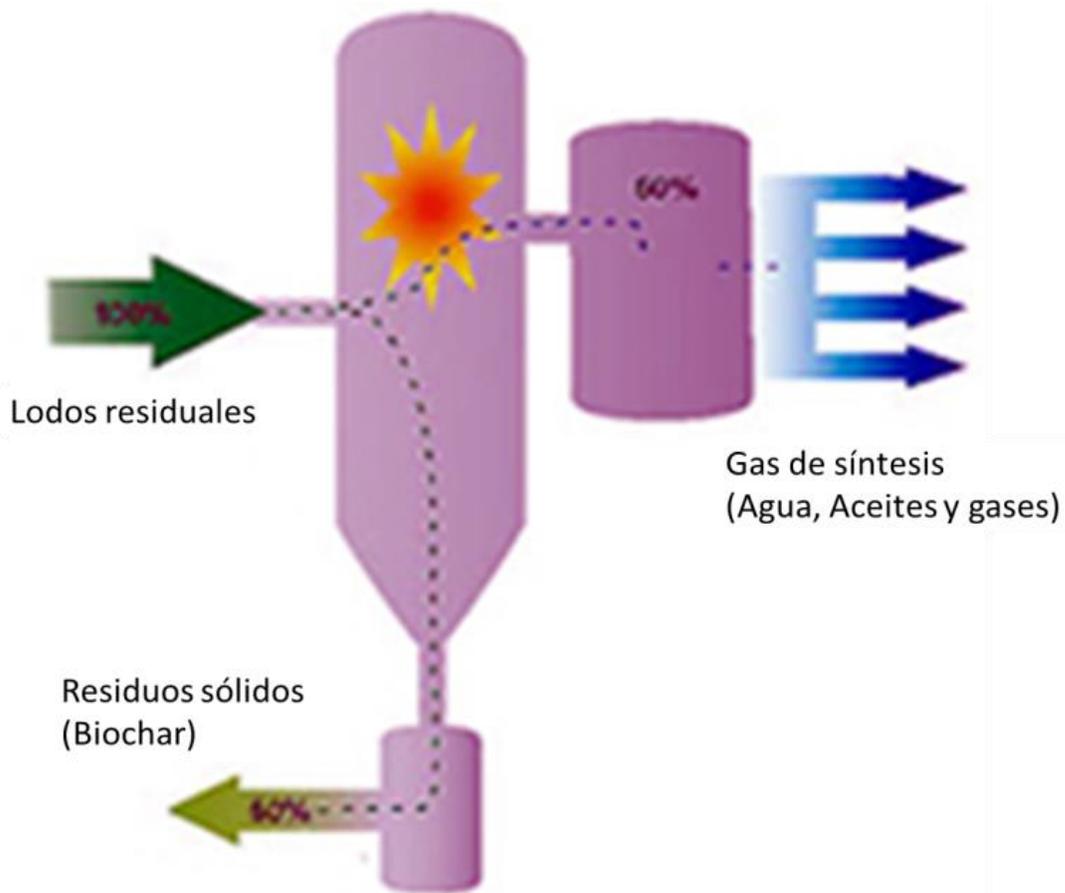


Figura 2. Esquema general del proceso de pirólisis de lodos residuales.

La pirólisis, aplicada al tratamiento de aguas residuales, consiste en la aplicación de calor en condiciones anaeróbicas a los lodos que han sido desechados durante el tratamiento del agua, una vez que dichos lodos se encuentren con la menor cantidad de humedad posible (menos del 10%). El proceso se divide en dos etapas principales (Xia *et al.*, 2011): 1) absorción de energía por parte de los lodos, puesto que la materia demanda grandes cantidades de energía para romper los enlaces que unen sus

moléculas y 2) liberación de energía por saturación y la formación de compuestos simples, así como la de gases.

Estas dos etapas comprenden el desarrollo gradual de cuatro fases. En la primera fase del proceso, los lodos residuales alcanzan un grado de energía que provoca que se libere la mayor cantidad de masa y energía; la segunda fase comienza con el rompimiento de enlaces moleculares que dan origen a la descomposición de compuestos orgánicos polares; en la tercer fase tienen lugar reacciones que originan la descomposición de aquellos compuestos orgánicos pesados; en la cuarta y última fase los lodos residuales, cuyas propiedades químicas están relacionadas con estructuras complejas, son degradados hasta sus componentes elementales (Xia *et al.*, 2011).

La variabilidad de los productos generados durante la pirólisis es muy amplia y depende de las condiciones de entrada que se manejen durante las reacciones. Las condiciones de entrada incluyen el control de la velocidad en que son llevadas a cabo las reacciones internas y por ende los volúmenes de productos obtenidos. La velocidad de las reacciones en la pirólisis da lugar a una clasificación de este proceso: a) pirólisis lenta, b) pirólisis rápida y c) pirólisis “flash”.

Pirólisis lenta. En éste proceso se puede obtener tanto combustibles líquidos como bio-carbón o Biochar y gas de síntesis; estos dos últimos productos en menores proporciones. En este tipo de pirólisis los rendimientos de productos líquidos se maximizan bajo condiciones de bajas temperaturas (300-450°C) (Kwapinski *et al.*, 2010).

Pirólisis rápida. En este tipo, la ausencia de productos viscosos es común pero no es así para la producción de Biochar y gas como el metanol. Este proceso se caracteriza por manejar altas temperaturas con incrementos moderados, obteniendo mayormente elevados niveles de gases factibles de combustionar.

Pirólisis flash. Este tipo de pirólisis ha sido implementada mejorando la eficiencia en los productos obtenidos, y se caracteriza por manejar altos flujos másicos y demandar gradientes de temperaturas elevados.

Independientemente al tipo de pirólisis que se maneje en el tratamiento de lodos residuales, éstos deben de someterse a una preparación para lograr un proceso más eficiente. Estos procesos de preparación comprenden la disminución de la humedad al menor grado posible (menor al 10%) y la reducción máxima posible del tamaño de las partículas.

La demanda de energía para el proceso de pirólisis dependerá de la composición química de los lodos, tamaño de las partículas y humedad presente, (Kwapinski *et al.*, 2010), siendo éstas últimas las propiedades que deber ser sometidas a un proceso de pre-tratamiento con la finalidad de reducir los tiempos y gastos energéticos del proceso. Los componentes principales de un reactor de pirólisis constan de una sección suministradora de materia prima, extracción de productos y suministro de energía.

La Figura 3 muestra gráficamente los componentes básicos y el funcionamiento del reactor de pirólisis, el cual es alimentado de manera continua. Los productos que se obtienen son expulsados mecánicamente a un separador; posteriormente tanto el Biochar como los gases de síntesis y los aceites son destilados por fuerzas de gravedad. En el esquema que se muestra, la pirólisis funciona mediante el suministro de energía térmica, la cual es operada mediante convección forzada para dar origen a las reacciones de transformación.

Los productos resultantes de la pirólisis de los lodos residuales se clasifican en sólidos, líquidos y gases; sus proporciones están definidas por las características de operación del reactor. Los productos líquidos y gaseosos poseen altos contenidos energéticos que los convierte en una opción factible como sustitutos de combustibles derivados de hidrocarburos o similares; la parte sólida es de gran importancia por sus características

físicas que la convierten en material de sencilla manipulación (Klug, 2012; Chun et al., 2013).

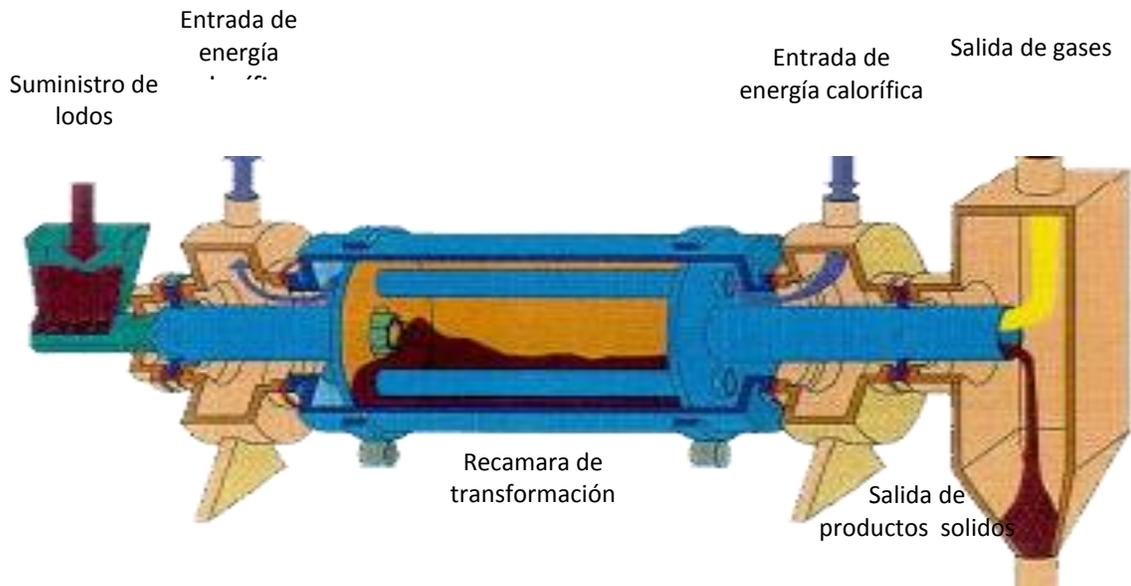


Figura 3. Esquema básico del funcionamiento de un horno de pirólisis.

3.5 Características del Biochar

El Biochar es un producto sólido, de textura granular fina, rico en carbono y con propiedades similares al carbón vegetal. El Biochar se produce a partir de la transformación química de distintos tipos de materiales poliméricos, y para ello es necesario someter el material original al proceso térmico denominado pirólisis. Regularmente el término “Biochar” se utiliza exclusivamente para referirse al material de origen orgánico cuya utilidad principal son las aplicaciones agrícolas, específicamente su utilización tiene lugar en aquellas zonas que han sido degradadas por las extensas y malas prácticas agrícolas, contribuyendo de esta forma en la remediación de suelos

que han sido expuestos a intensas prácticas de cultivos. El Biochar puede diferenciarse del carbón vegetal por el fin con que éste es producido. La producción de carbón vegetal está orientada en su mayor porcentaje a la utilización con fines energéticos, específicamente la generación de energía térmica (Kwapinski *et al.*, 2010; Lehmann y Joseph, 2012).

El origen del Biochar se remonta a tiempos precolombinos, y su descubrimiento ocurrió en el Amazonas, donde se encontró un material similar al carbón en suelos muy fértiles de la zona, el cual localmente se denominaba “*terra preta*”. Estos suelos fueron el resultado de prácticas ancestrales sobre el manejo de suelos por parte de los pobladores locales. Las características sobresalientes de estos suelos radican en la presencia de un horizonte color negro en un punto del perfil edáfico, elevado nivel de materia orgánica y un elevado porcentaje de nutrimentos como nitrógeno, fósforo, potasio y calcio (Kwapinski *et al.*, 2010; Conte, 2014; Evangelou *et al.*, 2015).

3.6 El Biochar en el medio ambiente

Las ciencias medioambientales que luchan por desarrollar alternativas eficaces para mitigar las alteraciones de la actividad antropogénica son grandes aliadas en el aprovechamiento del Biochar, ello debido a que este material incide directamente en el ciclo del carbono, elemento que es considerado uno de los elementos causantes del calentamiento global debido a los elevados niveles de emisiones a la atmósfera en forma de bióxido de carbono (CO₂).

El Biochar aplicado a los suelos actúa como almacén de carbono debido a su alto contenido de este elemento, reduciendo así las emisiones de CO₂. Esta propiedad del Biochar lo convierte en una eficaz alternativa a largo plazo para la captura del carbono antropogénico (Lehmann y Joseph, 2012; Shackley *et al.*, 2013) que ha causado al ambiente diversas problemáticas. El poder recalcitrante que posee el Biochar impacta positivamente en la conservación de los suelos, ya sea por la retención de nutrimentos

o por la capacidad que dicho material tiene para que se desarrollen las condiciones necesarias para la fauna microbiana (Purakayastha *et al.*, 2015).

3.7 Efecto del Biochar en la asimilación de nutrientes para las plantas

El Biochar es un producto altamente estable y resistente a la descomposición microbiana (Purakayastha *et al.*, 2015), por tanto promete ser una alternativa viable a ser utilizada como un sumidero de carbono a largo plazo, además de favorecer a las propiedades de fertilidad del suelo y el crecimiento de los cultivos debido al impacto sobre las propiedades físicas del suelo. Específicamente el fósforo (P) se encuentra con mayor disponibilidad en suelos donde se han aplicado dosis regulares de Biochar. Los métodos de tratamiento del material original son similares para las diferentes alternativas del uso del Biochar. Se parte de un carbono orgánico (biomasa) que tiene un ciclo de vida relativamente corto y se transforma a un carbón sólido recalcitrante que se mantiene estable durante largos periodos de tiempo.

Dentro de los beneficios que ofrece el Biochar respecto al mejoramiento de la fertilidad del suelo, se tiene el potencial de incremento de la capacidad de intercambio catiónico (CIC), contribuyendo a una mayor retención y disponibilidad de cationes tales como NH_4^+ y K^+ (Butnan *et al.*, 2015). Otra de las propiedades del Biochar es su alta porosidad, que facilita la retención de agua principalmente en suelos arenosos cuyas propiedades de baja retención de agua son una problemática generalizada en dichos suelos (Butnan *et al.*, 2015).

3.8 Efecto del Biochar sobre contaminantes tóxicos

Otro de los beneficios que brinda el Biochar a la actividad agrícola es su capacidad de retención de elementos tóxicos para las plantas. En investigaciones recientes se ha mostrado que su uso en suelos ácidos, favorece la mitigación de la fitotoxicidad atribuida principalmente al aluminio (Al). Bajo el mismo aspecto se han realizado investigaciones que reportan dentro de los grandes beneficios del Biochar su capacidad

como absorbente de diferentes compuestos tóxicos, entre ellos los metales pesados. El plomo (Pb), por sus propiedades químicas, es fácilmente acumulable en el ambiente debido a que es un elemento no biodegradable y tiene efectos tóxicos en los organismos. El Biochar puede actuar como adsorbente del Pb, ya sea por adsorción en los microporos, intercambio iónico o precipitación de componentes orgánicos (Wang *et al.*, 2015a y 2015b); debido a la estabilidad del Biochar, el Pb puede mantenerse “atrapado” en este material evitando así su difusión al ambiente.

3.9 Alternativas para la producción de Biochar

Investigaciones recientes han realizado evaluaciones con Biochar obtenido a partir de diferentes tipos de materiales orgánicos; ejemplo de ello es el Biochar producido a partir de madera de eucalipto (Butnan *et al.*, 2015). En este caso, el Biochar fue producido a dos temperaturas (350°C y 800°C) y para evaluar sus efectos se utilizaron dos tipos de suelo en los cuales fueron cultivadas plantas de maíz.

En otros trabajos se ha investigado con Biochar producido a partir de residuos agrícolas entre ellos rastrojo de maíz, cascarilla de arroz y paja de trigo (Purakayastha *et al.*, 2015); en este caso las temperaturas a las que fue expuesto el material primario fueron de 400°C, realizándose su caracterización físico-química y la estabilización del carbono fue observada por un año.

En relación con el aprovechamiento de los residuos forestales mediante la generación de Biochar, se han realizado investigaciones utilizando madera de pino y bambú (Huff *et al.*, 2014) y aserrín de roble (Wang *et al.*, 2015). En el primero de los casos los tratamientos a que fue sometido el material primario fueron: 300, 400 y 500°C, obteniendo como resultado que las bajas temperaturas favorecen a la oxigenación del material, así como una menor cantidad de emisiones aromáticas al momento de la pirólisis. En el Biochar generado a partir de aserrín de roble, las temperaturas empleadas fueron de 300 y 600°C; en este caso se reporta que el Biochar producido a

300°C benefició la absorción de NH_4^+ , mientras que el Biochar producido a temperaturas cercanas a 600°C favorece la absorción de NO_3^- .

El Biochar tiene muchas propiedades: posee una matriz de carbono relativamente estructurada, alto grado de microporosidad, extensa área superficial y altos pH y CIC; de esta manera, este material puede actuar como una superficie adsorbente (Downie y Zwieten, 2013; Jiang *et al.*, 2015). Debido a que es altamente recalcitrante, los efectos benéficos de su aplicación pueden prolongarse por un largo periodo de tiempo (Conte, 2014). La biomasa carbonizada, por otro lado, se estima que tiene un tiempo de residencia de miles de años en el suelo (Lehmann y Joseph, 2012). Caporale *et al.* (2016) obtuvieron Biochar derivado de biomasa de podas de huertos a través de una pirólisis lenta, a temperatura de 500°C para estudiar su capacidad adsorbente para metales pesados como Pb, Cr y Cu. Los autores encontraron que el material obtenido posee buenas cualidades como adsorbente de estos metales, y que los sitios de adsorción en el Biochar son ocupados preferencialmente por Pb, seguido de Cr y Cu; de esta manera, los metales pesados Pb y Cr parecen tener mayor afinidad con el Biochar que el Cu cuando se encuentran de forma individual; si están presentes los tres metales, la adsorción competitiva favorece al Cu.

Para la producción de Biochar se tienen diferentes materiales que pueden ser utilizados como materia prima y que ofrecen beneficios a la actividad agrícola; el reto actual es incorporar el Biochar producido a partir de la pirólisis de lodos residuales dentro de los procesos productivos agrícolas sin alterar en mayor medida los ecosistemas. Algunas investigaciones alientan el uso de Biochar producido a partir de lodos residuales ya que favorece la retención de ácido sulfhídrico (H_2S), eliminando este compuesto presente en aguas contaminadas (Xu *et al.*, 2014). Con la aplicación de procesos de pirólisis a los lodos residuales se pretende eliminar los patógenos contenidos en éstos, además utilizar el Biochar producido con fines agrícolas, específicamente como mejoradores de suelos.

Existen diversas fuentes de energía que pueden ser aprovechables como fuente de calor para la pirólisis, entre ellas se encuentran la solar térmica, el poder calorífico de la biomasa, la transformación de un flujo de electrones (electricidad) en energía térmica, la combustión de hidrocarburos, entre otras formas de transferencia de calor. Específicamente esta investigación se lleva a cabo implementando un uso sostenible de los recursos utilizando energía solar térmica para la generación de Biochar.

3.10 Energía solar

Debido a las problemáticas actuales respecto al deterioro del ambiente, analizadas bajo el marco de la sostenibilidad y eficiencia de los recursos naturales, se estudian las diferentes opciones de energía que satisfagan los requerimientos necesarios para llevar a cabo el proceso de pirólisis, específicamente la demanda de energía térmica.

La energía solar es el origen de casi todo tipo de energía existente en la tierra, siendo una fuente relativamente inagotable. La radiación electromagnética que es emitida desde el sol, al llegar a la superficie y atmósfera terrestres, es transformada de acuerdo a la segunda ley de la Termodinámica en diferentes tipos de energía: térmica, cinética y química. En este caso, la energía térmica es la de mayor importancia dado su simplicidad para ser transformada (Yunus y Boles, 2009). Cuando la radiación solar incide sobre una superficie, parte de ella es rechazada al ambiente dependiendo de la superficie sobre la cual incide; el resto es transformada en energía térmica.

La posición geográfica de México lo ubica en un lugar privilegiado para el aprovechamiento de la energía solar por situarse entre el trópico de cáncer y el trópico de capricornio, que es la región del planeta donde la radiación solar incide durante todo el año. Este cinturón lo conforman 66 países que reciben los mayores índices de radiación solar durante el año. De acuerdo con datos del sistema de geo-información de la Comisión Nacional sobre Biodiversidad (CONABIO, 2015), el registro de la insolación máxima para el mes de mayo en el territorio nacional fue de 340 horas (Figura 4); en el

estado de Michoacán alcanzó un máximo de 300 horas de insolación (CONABIO, 2015), siendo la región de la Ciénega una de las más favorecidas con este índice.

La radiación solar es otro parámetro fundamental en el aprovechamiento de la energía, ya que la eficiencia de cualquier dispositivo solar dependerá tanto de las horas de insolación efectiva, como del flujo de energía electromagnética incidente sobre la superficie captadora.

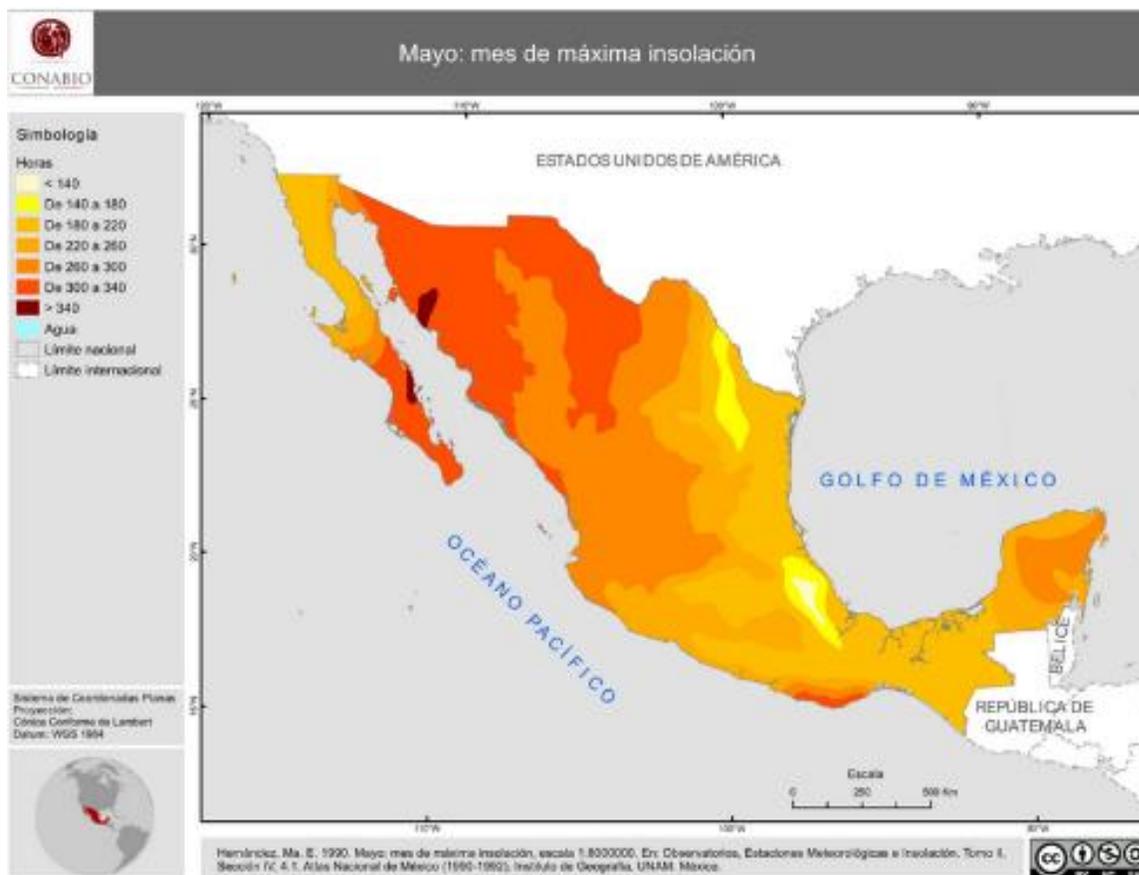


Figura 4. Valores de insolación en México en el mes de mayo.

En México, la mayor parte de su territorio recibe altos niveles de radiación, logrando una máxima incidencia en el territorio de Baja California Sur superior a los 25 MJ/m² en el mes de mayo; en relación con Michoacán los valores de incidencia solar son 21 y 24 MJ/m² como valores máximos y mínimos, respectivamente (Figura 5). En la región

Ciénega de Chapala, Michoacán, los valores reportados corresponden a 23 MJ/m². Al realizar los cálculos aritméticos del rango de insolación y los niveles de radiación correspondientes a la región Ciénega de Chapala, Michoacán, se tiene que son 2.13 W/m² promedio aprovechables, llegando a presentarse en horas pico valores superiores a los 1,000 W/m².

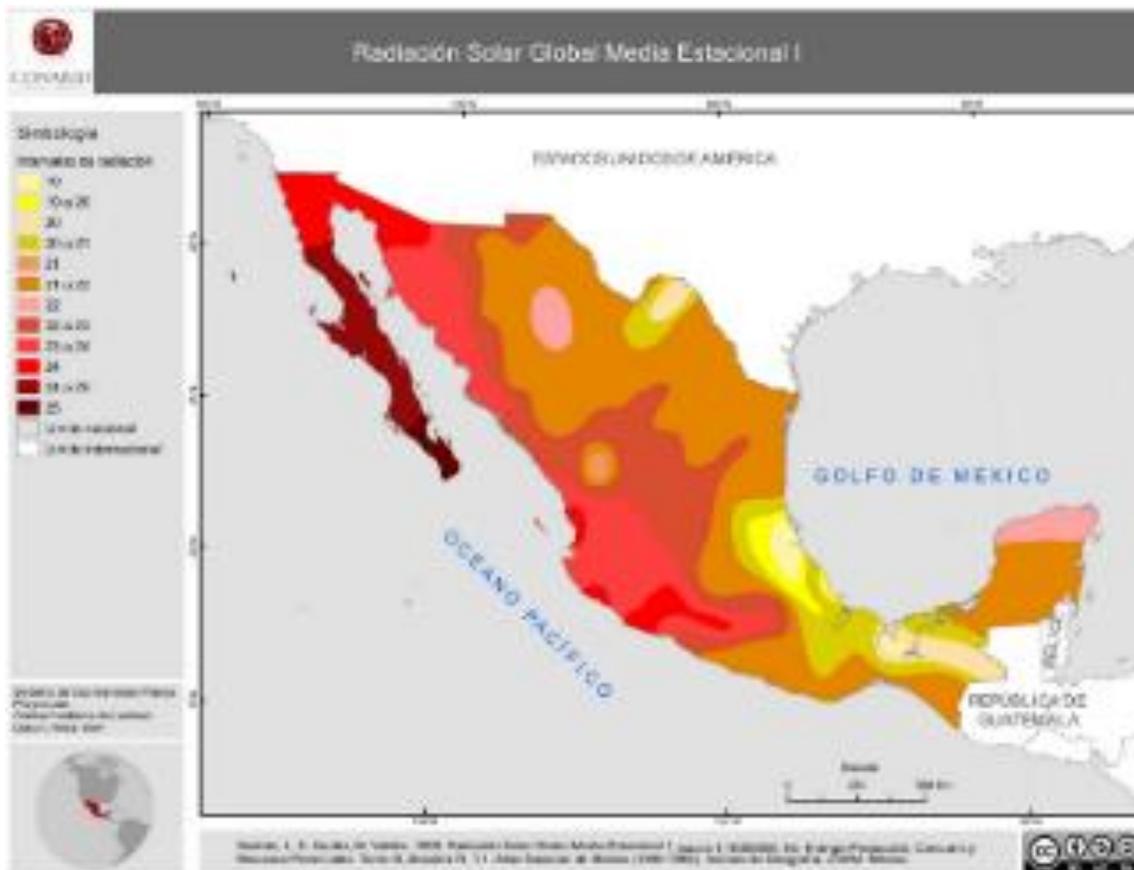


Figura 5. Radiación solar en la República Mexicana.

3.11 Sistemas de captación solar

El aprovechamiento de la energía térmica solar involucra como principal componente el dispositivo colector. De acuerdo con los requerimientos necesarios y los niveles de temperatura deseados, los dispositivos colectores son de dos tipos: colectores concentradores y no concentradores (Cuadro 4).

Un colector no concentrador tiene una estructura amplia, en la cual la mayor parte está orientada a la absorción de la energía radiante cercana al mecanismo de intercepción. Los colectores concentradores son más diversos, caracterizándose por tener una superficie reflectante cóncava y concentrar la radiación solar en un área reducida (Yunus y Boles, 2009; Paredes, 2012; Iglesias-Ferrer y Morales-Salas, 2013; Quiñonez y Hernández, 2013).

Cuadro 4. Principales tipos de colectores solares.

Clasificación	Tipo	Absorbente	CR	Temperaturas (°C)
No concentrador	Plano	Plano	1	< 80
No Concentrador	Tubos al vacío	Plano	1	< 200
Concentrador	Cilindrico parabólico	Tubular	15-45	< 300
Concentrador	Disco parabólico	Focal	100-1000	< 1000
Concentrador	Helióstatos	Focal	100-1500	≈ 2000
Concentrador	Tipo Fresnel	Focal	3-12	≈500

La razón del área de intercepción (A_{in}) y el área de absorción (A_{ab}) es identificada con la razón de concentración (RC) del colector, propiedad intrínseca al aprovechamiento solar. Dicha deducción se expresa como:

$$RC = \frac{A_{in}}{A_{ab}} \quad (1)$$

3.11.1 Colectores no concentradores

Este tipo de colectores, también conocidos como estacionarios, tienen como característica principal que carecen de un seguimiento a la trayectoria del sol, únicamente son enfocados con un grado de inclinación dependiente de la ubicación geográfica en el sentido latitudinal, además de los bajos rangos de temperatura en los que operan (80-200 °C). El factor o razón de concentración de estos equipos siempre será igual a 1. El empleo de estos dispositivos está orientado principalmente al uso doméstico, dado los niveles de temperatura y los bajos costos tanto de instalación como de operación. Se describen enseguida los principales tipos de colectores no concentradores (Yunus y Boles, 2009; Paredes, 2012; Iglesias-Ferrer y Morales-Salas, 2013; Quiñonez y Hernández, 2013).

Colector plano. La configuración podrá ser variable, pero el principio será idéntico. En la Figura 6 se muestra un diseño típico de este colector. La operación inicia cuando la radiación solar penetra la cubierta protectora de vidrio, e incide sobre la placa absorbidora que se encuentra en contacto con los ductos de cobre; en este momento una gran cantidad de energía radiante es transformada en energía interna del material el cual la transfiere al fluido (regularmente agua). Finalmente, este líquido es almacenado en un termotanque para proceso o utilizado directamente. La base, así como los laterales y parte frontal y posterior, poseen un sistema de aislamiento térmico de lana de vidrio con un fondo de poliestireno, esto con la finalidad de reducir al mínimo la

transferencia de calor (Yunus y Boles, 2009; Paredes, 2012; Iglesias-Ferrer y Morales-Salas, 2013; Quiñonez y Hernández, 2013).

La configuración de los ductos de cobre consta de dos tubos principales en los extremos, a los cuales son unidos los tubos de verticales de menor diámetro. La inclinación anteriormente mencionada favorece la dinámica de las temperaturas, siendo la parte baja la entrada de agua de menor temperatura (mayor densidad), y la parte alta la salida del fluido con mayor temperatura (menor densidad). Para proteger los componentes, es necesario colocar una cubierta protectora de vidrio que resulta ser uno de los elementos de mayor importancia, debido a que tiene como función principal permitir el paso de la radiación solar (onda corta) y a la vez, retener las radiación emitida por la placa absorbedora, disminuyendo de esta forma las pérdidas de energía creando a su vez un efecto invernadero en el interior.

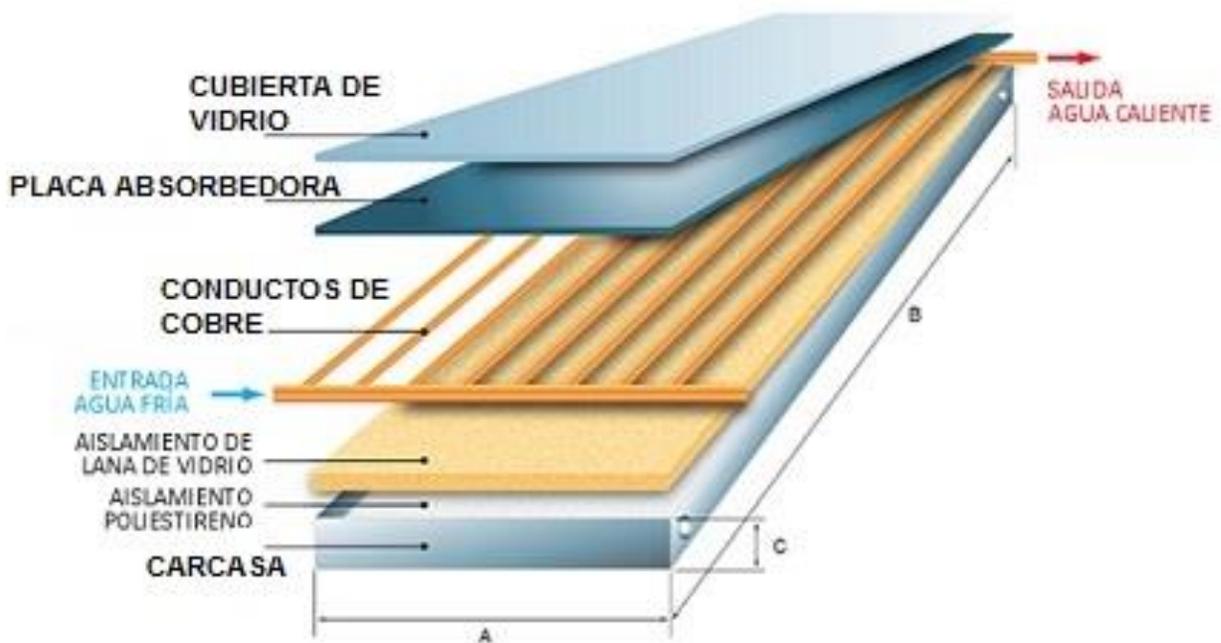
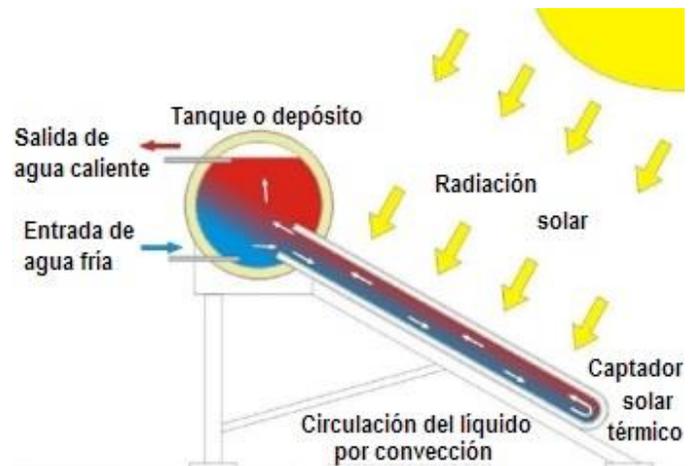


Figura 6. Colector solar plano.

Colector de tubos evacuados (Figuras 7 y 8). Este tipo de dispositivos térmicos solares, al igual que el colector plano, son de estructura fija y con ángulo de inclinación según la latitud. Estos colectores difieren de los anteriormente descritos en que están constituidos de una serie de tubos de vidrio conectados a un termotanque, como se aprecia en la Figura 7. El sistema de tubos está conformado por dos tubos concéntricos, cuyo espacio de separación entre ambos se encuentra al vacío para evitar pérdidas de calor por conducción y convección. El tubo interior, además de contener el fluido para elevar su temperatura, se encuentra cubierto de un material que evita la emisión y favorece la eficiencia térmica.



Figuras 7 y 8. Colector solar de tubos evacuados y esquema general de funcionamiento.

En la Figura 8 se muestra esquemáticamente la incidencia de la radiación solar sobre la superficie superior de los tubos, los cuales, a su vez, elevan la temperatura del agua, al mismo tiempo que inicia una distribución del calor por convección natural; finalmente el agua es almacenada en el termotanque para su posterior uso, dicho tanque se

encuentra revestido de un material aislante para evitar transferencia de calor con el ambiente (Yunus y Boles, 2009; Paredes, 2012; Iglesias-Ferrer y Morales-Salas, 2013; Quiñonez y Hernández, 2013).

3.11.2 Colectores concentradores

Cuando la demanda energética requiere de una mayor temperatura en un determinado fluido, es necesario hacer uso de los colectores concentradores cuya superficie de captación aumentará la concentración de la radiación solar y por ende la temperatura alcanzada; esto se logra modificando las dimensiones geométricas del concentrador y mejorando las propiedades físicas y químicas del dispositivo absorbente.

Colector cilíndrico parabólico. Una de las características principales de este tipo de colectores son los rangos de temperatura (hasta 400°C). Su aplicación principal es la generación de energía eléctrica. Su arquitectura es conformada por una parábola construida de un material altamente reflectante, un tubo receptor metálico recubierto de pintura color negro con un nivel de emisividad relativamente bajo; este tubo se encuentra concéntrico con un tubo exterior de vidrio para evitar pérdidas de calor. Su funcionamiento inicia con la orientación de la superficie parabólica en dirección al sol, para que los rayos incidan sobre dicha superficie; estos rayos son reflejados al tubo receptor (absorbente) que transforma la radiación solar en energía térmica de alta temperatura absorbida por el fluido contenido en el interior de dicho tubo (Yunus y Boles, 2009; Paredes, 2012; Iglesias-Ferrer y Morales-Salas, 2013; Quiñonez y Hernández, 2013).

La Figura 9 muestra gráficamente los componentes básicos del colector cilíndrico parabólico. Un componente elemental de este tipo de colectores es el seguidor solar, dispositivo mecánico-electrónico encargado de mantener orientado el colector perpendicularmente a los rayos del sol.

Colector de disco parabólico: Su estructura se encuentra basada en uno o varios reflectores cuya geometría es un paraboloide en revolución; posee además un sistema de seguimiento solar para mantenerlo enfocado hacia el sol y así captar la mayor radiación solar posible. El paraboloide (Figura 10) concentra la energía captada a un receptor ubicado justamente en el foco de la parábola; en dicho receptor se encuentra un pequeño sistema de generación eléctrica o en algunos casos únicamente proporciona calor a un fluido de trabajo que comprende varios colectores conectados entre sí.

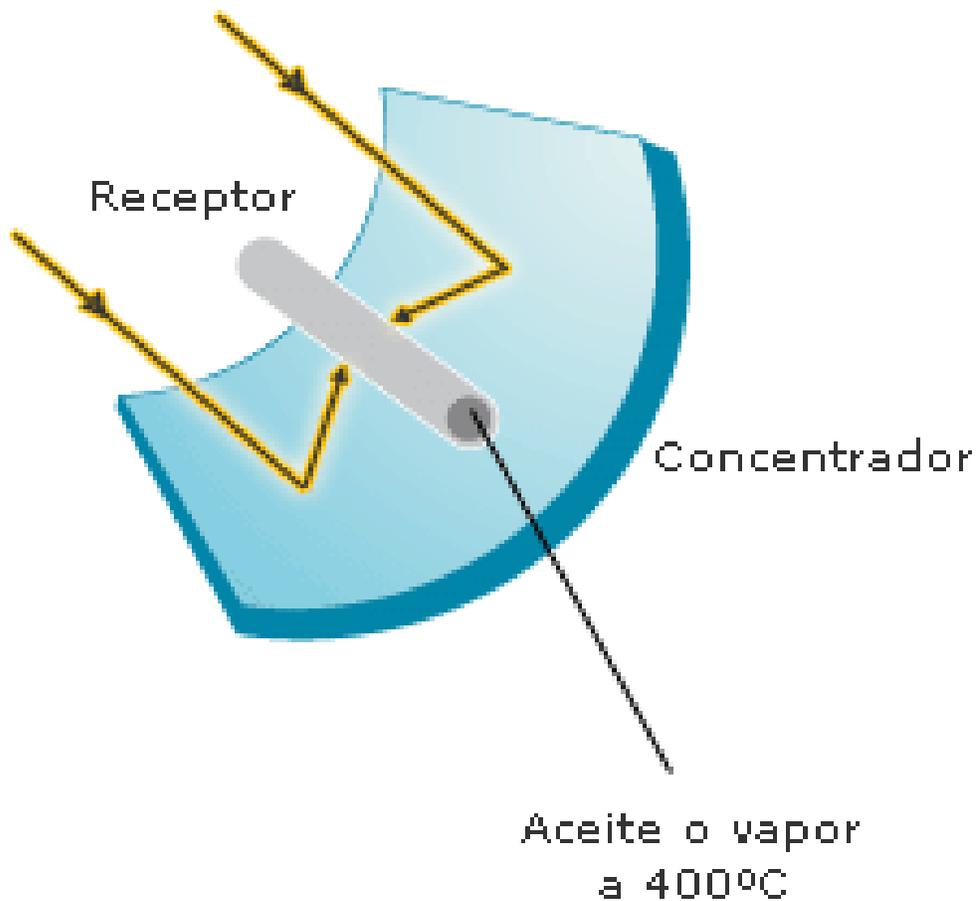


Figura 9. Colector cilíndrico parabólico orientable.

Estos sistemas de colectores solares han tenido aplicaciones a gran escala, ejemplo de ello son las centrales termo-solares instaladas en Castilla La Mancha, España, cuya capacidad instalada sobrepasa los 151 MW (Fuentes-Hernández y Recio-Recio,2005; Fajardo-Villaquiran, 2011).

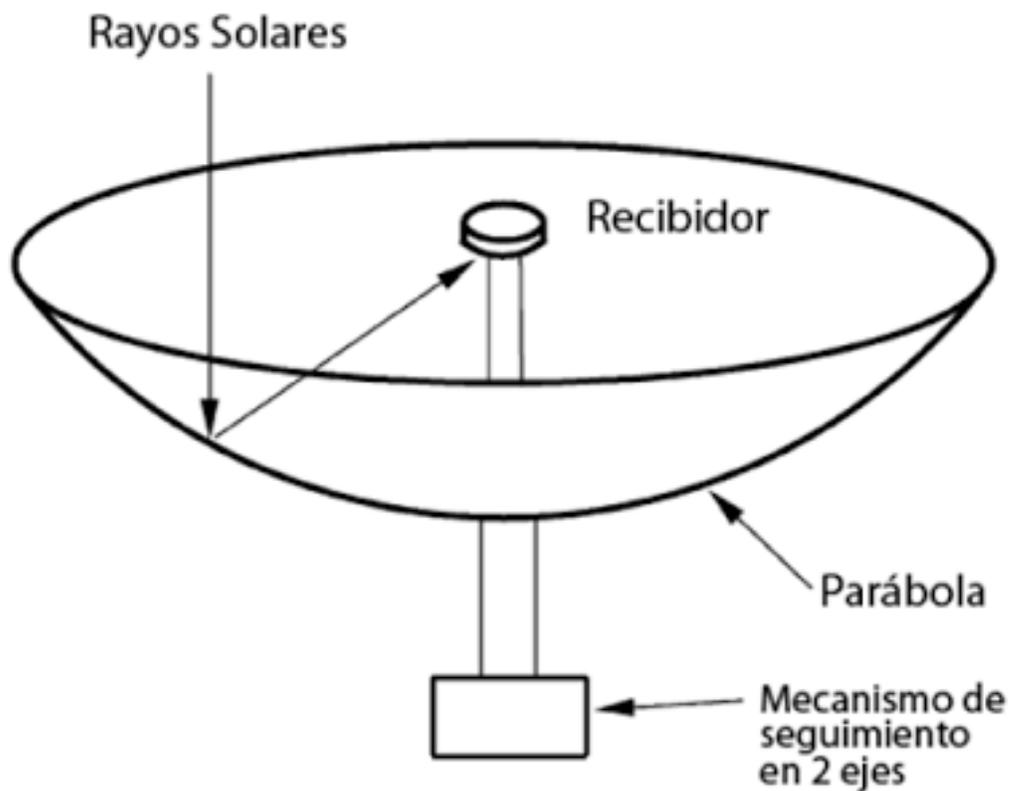


Figura 10. Colector solar paraboloide.

Colector solar de receptor central. Este mecanismo de captación solar consiste en un complejo sistema de espejos colectores denominados helióstatos. Estos espejos reflejan la radiación solar sobre un punto específico, localizado en lo alto de una torre

central. Este sistema es tan robusto según los requerimientos necesarios llegando a alcanzar hasta los 2000°C. Actualmente es uno de los sistemas de generación eléctrica en desarrollo debido a las prometedoras temperaturas alcanzadas que permiten accionar ciclos de potencia como el Bryton (Yunus y Boles, 2009). La Figura 11 muestra una foto del campo solar *Ivanpah Solar Electric Generating System*, uno de los más grandes campos solares en el mundo, el cual se encuentra instalado en el desierto de Mojave en California. El complejo consta de 170,000 espejos dirigidos mediante un sistema informático que en su conjunto contribuyen a una potencia instalada de 377 MW.



Figura 11. Sistema de helióstatos con su torre central en el Desierto de Mojave, California, EE.UU.

Colector solar tipo Fresnel. Este colector es un híbrido de un colector cilíndrico parabólico y un sistema concentrador de helióstatos. Se diferencia del primero por tener un tubo absorbente en una posición fija. Su funcionamiento es similar a un campo de

helióstatos ya que consta de un pequeño grupo de espejos orientables que concentran la radiación en el tubo absorbente; la diferencia radica en los rangos de temperatura logrados, además de los bajos costos de operación. La Figura 12 muestra la configuración de un colector tipo Fresnel donde el tubo absorbente se encuentra en la parte superior y los espejos reflectores están posicionados a diferentes alturas para lograr una mayor captación solar (Yunus y Boles, 2009).



Figura 12. Colector solar tipo Fresnel.

Bajo este amplio antecedente sobre el aprovechamiento de la energía térmica solar a nivel mundial y muy extendido a nivel tecnológico, se plantea la viabilidad de proveer la

demanda de energía necesaria para el proceso de pirólisis de lodos residuales únicamente mediante dicha fuente. Actualmente la producción de Biochar es una alternativa viable para disminuir la huella antropogénica de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y la demanda para producir tal producto se resume en el requerimiento de energía térmica la cual podría ser cubierta mediante colectores solares.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Diseño del sistema de pirólisis

La conformación del sistema de pirólisis comprende tres secciones: 1) el reactor de pirólisis, cuyo interior constituye una cámara donde se colocan los lodos residuales a tratar; 2) el sistema encargado de coleccionar, concentrar y suministrar la energía necesaria para la operación de la pirólisis, 3) el fluido de trabajo, que transfiere la energía térmica necesaria para propiciar las reacciones químicas de transformación. La Figura 13 representa un esquema general de los componentes principales del sistema generador de Biochar propuesto.

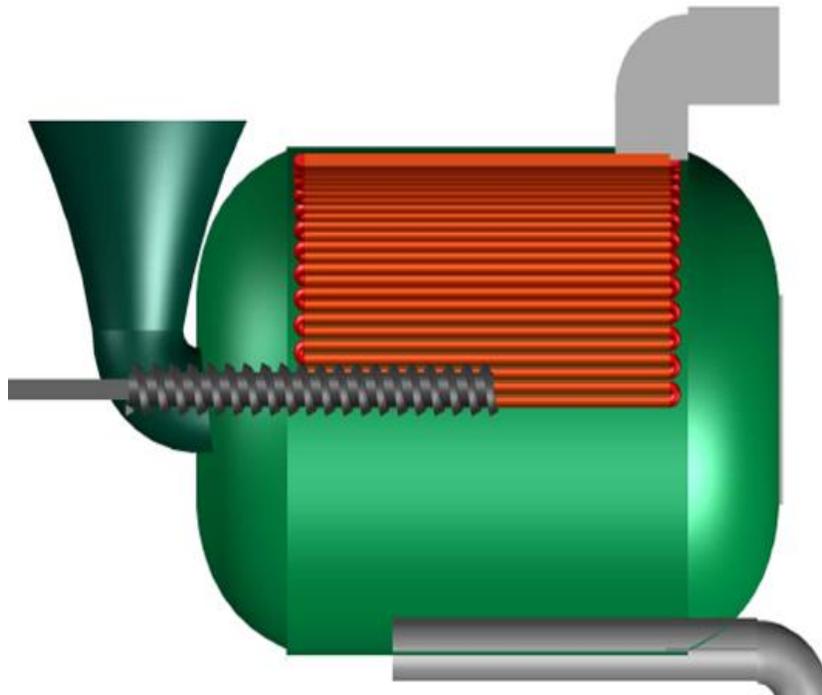


Figura 13. Diseño CAD del reactor de pirólisis.

4.1.1 Reactor de pirólisis

El Reactor de pirólisis es el espacio donde se llevan a cabo las reacciones químicas y de transferencia de calor para la generación de Biochar. Las características requeridas del reactor para este trabajo, considerando los materiales y volumen de tratamiento, se diseñaron para una capacidad de 0.001 m³ de volumen de muestra; este volumen se calculó de acuerdo a las necesidades de material de trabajo (lodos residuales) necesario para la realización de las determinaciones y análisis correspondientes, así como la capacidad del dispositivo para alcanzar determinadas temperaturas.

Para el diseño y construcción de la carcasa, se consideraron los siguientes principios: la superficie del reactor debe ser de un material inerte a las condiciones de oxidación, con alto grado de resistencia a deformaciones por calentamiento, resistente a altas presiones y maleable para favorecer a las adecuaciones y correcciones necesarias. Dado los requerimientos señalados anteriormente, el material que cumple con mencionadas características es al acero inoxidable, específicamente el denominado “Austenítico” que consiste en aleaciones de Níquel, Cromo y Molibdeno; específicamente se utilizó el ANSI 310 por sus propiedades de resistencia a la corrosión, excelente soldabilidad y que puede ser empleado tanto a temperaturas elevadas como criogénicas.

El sistema intercambiador de calor del reactor de Biochar se muestra también en la Figura 13, en color rojo. Estos componentes corresponden a los mecanismos de transferencia de calor cuyo material de fabricación es principalmente cobre; específicamente se utilizó tubería rígida de cobre tipo K, que cumple las especificaciones de la NMX-W018-SCFI-2006. Esta norma establece los requerimientos para instalaciones donde se involucran altas presiones y elevada temperaturas. Este sistema intercambiador de calor consta de 17 m lineales de ducto de 0.25 pulgadas de diámetro, que en conjunto tiene un área superficial de 0.0630 m²; puesto que el sistema intercambiador se encuentra recubierto por una capa aislante de poliuretano expandido,

la transferencia de calor solo comprende el área interior, por tanto, ésta se reduce a 0.0315 m². El interior debe mantener una temperatura mínima de 300°C, por tanto los cálculos realizados fueron:

$$E_{ent} - E_{sal} = \Delta E_{sistema}$$

$$\text{Sí; } E_{ent} = E_{ent,agua}$$

$$\Delta E_{sistema} = E_{ent} \left(-KA \left(\frac{dT}{dx} \right) \right) \quad (12)$$

Donde;

K = Coeficiente de conductividad térmica del material

A = Area de conducción de calor

$\frac{dT}{dx}$ = *Gradiente de temperatura*

dx = Espesor del material conductor

4.1.2 Sistema de captación solar

Este componente es el encargado de coleccionar, concentrar y orientar la energía necesaria para la operación del reactor; los componentes principales que lo conforman son el sistema de espejos reflectores, el espejo colector y el tubo absorbente.

Espejos reflectores. Es un arreglo de 4 espejos planos de tipo comercial constituidos a base de vidrio de 3mm de espesor recubierto de estaño líquido seguido de una solución a base de plata y pintura protectora. Éstos son posicionados según la trayectoria solar, además de permanecer cuasi estáticos durante el día, esto con la finalidad de aprovechar al máximo la radiación solar ya que son mecánicamente orientables ajustando su posición según el horario y la época del año. El arreglo de los espejos reflectores consiste en captar un área superficial de 3 m² por reflector que en conjunto equivale a 12m². Debido a que la ciudad de Jiquilpan de encuentra ubicada a 19°99" N y 102.70" W, el sistema de espejos deben ser posicionados con una ligera inclinación norte-sur de 20° respecto a la horizontal, ello con la finalidad de incrementar la eficiencia de captación solar.

Partiendo de una radiación solar de 750 W/m² y 6 horas efectivas de radiación además de una reflectividad del vidrio de 0.754 (Echazú y Cadena, 1998; Echazú *et al.*, 2008) y factor de interceptación solar correspondiente de 0.95 (Paredes, 2012), se tiene que:

$$\eta_{opt,esp} = \rho * \gamma * \tau * \alpha \quad (1)$$

$\eta_{opt,esp}$ = *Perdidas ópticas en los espejos reflectores*

ρ = *Reflectividad*

γ = *Indice de interceptación solar*

τ = *Factor de transmisividad*

α = *Indice de absortividad*

Además;

$$I_{ef,esp} = I_o * \cos \theta * \eta_{opt,esp} \quad (2)$$

$$I_o = \text{Radiación directa} \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

$\phi = \text{Ángulo de incidencia}$

Finalmente la energía incidente aprovechable está dada por:

$$Q_{sol,esp} = Sc * I_o * \cos \theta \quad (3)$$

$Sc = \text{Area de captación solar} [m^2]$

$$I_o = I_{ef,esp} \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Espejo colector: Componente constituido por una superficie cilíndrico-parabólica de acero inoxidable tipo espejo, cuya área de captación es de 3 m². El espejo colector se encuentra suspendido sobre un eje horizontal que permite orientar la superficie de captación al mejor ángulo de recepción solar. Dicha geometría permite concentrar la radiación solar que incide sobre su superficie en un área reducida comúnmente llamada foco.

La energía aprovechable por este componente está determinada por (1) que a su vez representa una irradiación efectiva total según sus propiedades:

$$\eta_{opt,colector} = \rho * \gamma * \tau * \alpha \quad (4)$$

Donde;

$$\rho_{acero\ inox} = 92$$

$$\gamma_{acero\ inox} = 76$$

τ y α son despreciables

Por consiguiente:

$$I_{ef,colector} = I_{ef,esp} * \cos \phi * \eta_{opt,colector} \quad (5)$$

Donde;

$$\phi = 0$$

Por lo tanto:

$$Q_{sol,colector} = S_{c_{colector}} * I_{ef,colector} * \cos \phi \quad (6)$$

Donde;

$$\phi = 0$$

Tubo absorbente. Dispositivo encargado de transformar la radiación solar incidente en energía térmica aprovechable. Este elemento consiste de un ducto comercial de cobre de 1.5 pulgadas y 3 m de longitud, en cuyo interior fluye agua baja en sales que actúa como fluido de trabajo. El ducto se recubrió con tres capas de pintura Pyromark® y está concéntrico por tubo de vidrio transparente de alta absorptividad. La energía incidente sobre la superficie del tubo absorbente está determinada por:

$$I_{ef,abs} = I_{ef,colector} * \cos \sigma * \eta_{opt,abs} \quad (7)$$

Donde;

$$\eta_{opt,abs} = 0.95$$

$$\sigma = 0$$

Por lo tanto

$$Q_{sol,abs} = Sc_{abs} * I_{ef,abs} * \cos \sigma \quad [W] \quad (8)$$

Donde;

$$Sc_{abs} = \text{Area total de la superficie absorbedora [m]}$$

$$\sigma = 0$$

4.1.3 Fluido de trabajo

El volumen del tubo absorbente se encuentra ocupado por agua cuya capacidad es de 3.42 L equivalente a 3.42 kg. Los requerimientos necesarios para la transformación a Biochar varían desde los 300°C hasta los 600°C (Fang *et al.*, 2015), por tanto se tiene que:

$$E_{ent} - E_{sal} = E_{sistema} \quad [KJ] \quad (9)$$

Por lo consiguiente;

$$E_{ent,agua} = (mc\Delta T)_{agua} + (mc\Delta T)_{vidrio} \quad [KJ] \quad (10)$$

Donde;

$$E_{ent} = \text{Energía de entrada} = Q_{sol,abs}$$

$$E_{sal} = \text{Energía de salida}$$

$$E_{sistema} = \text{Energía total de sistema}$$

$$m = \text{masa}$$

$$c = \text{calor específico}$$

$$\Delta T = T_{final} - T_{inicial}$$

$T = \text{Temperatura en } ^\circ\text{C}$

Por tanto se tiene;

$$\Delta t = \frac{E_{ent}}{Q_{sol,abs}} \quad [S] \quad (11)$$

Intercambiador de calor. Es un dispositivo encargado de suministrar la energía necesaria para la producción de Biochar. En su interior un fluido termodinámico (fluido de trabajo) se encuentra en fase saturada a elevadas temperaturas y presiones inferiores al punto crítico, dicha energía es transferida a los lodos residuales mediante el principio de la ley de Fourier (Yunus y Boles, 2009) donde se establece que:

$$E_{transferida} = (-KA \left(\frac{dT}{dx} \right)) \quad [W] \quad (12)$$

Donde;

$K = \text{Coeficiente de conductividad térmica del material}$

$A = \text{Area de conducción de calor}$

$\frac{dT}{dx} = \text{Gradiente de temperatura}$

Por tanto se tiene que;

$$Q_{sol,abs} \approx E_{transferida}$$

$$E_{transferida} = -KA \left(\frac{dT}{dx} \right) \quad [W] \quad (12)$$

El dispositivo así diseñado y construido fue instalado en la ciudad de Jiquilpan de Juárez, Michoacán, específicamente en el área que ocupan los invernaderos del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Michoacán.

4.2 Generación de Biochar

4.2.1 Selección del sitio para recolección de material básico

El procedimiento para la obtención de los lodos residuales se llevó a cabo mediante visitas a las diferentes plantas de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Morelia, Michoacán. El protocolo de visitas se realizó con el objetivo de identificar los procesos de tratamiento empleados para la el tratamiento de aguas, así como los niveles de remoción de contaminantes, tecnologías utilizadas, capacidad instalada y niveles de operación, porcentaje de generación de lodos, manejo de lodos residuales y aquellos problemas que afectan en gran medida la industria del tratamiento de aguas residuales.

Después de realizar las visitas de campo se determinó llevar a cabo el acopio de las muestras de la planta de tratamiento localizada en la Tenencia de Atapaneo, perteneciente al municipio de Morelia, Michoacán, la operatividad de la empresa se realiza por medio de un convenio con el H. Ayuntamiento de la ciudad de Morelia, dicha planta es operada por la empresa particular AquaSol Morelia, pertenece al grupo empresarial Tecnología Intercontinental S.A.P.I. de C.V. El origen de las aguas residuales corresponden a los desechos de la actividad doméstica e industrial de la ciudad de Morelia, llegando a presentarse flujos volumétricos de aproximadamente 2.19

$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$. El principio mediante el cual opera dicha infraestructura consiste en el sistema de lodos activados, además de incorporar como sistema de tratamiento avanzado la aplicación de hipoclorito de sodio como método estabilización. Una vez que las aguas han sido procesadas y que poseen un menor nivel de contaminantes, éstas son vertidas al Rio grande, que desemboca en el lago de Cuitzeo y única fuente de agua para el Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro durante la temporada de sequía.

4.2.2 Acopio de material primario

Los lodos residuales una vez desechados del proceso de tratado de aguas, son vertidos en contenedores y estabilizados químicamente mediante un sistema de encalado, posteriormente éstos son vertidos a rellenos sanitarios o utilizados como abonos orgánicos. El acopio de los lodos residuales para realizar la presente investigación se realizó durante los días 27y 28 de Mayo del 2014. El material fue recolectado antes de iniciar el tratamiento químico de encalado. En total se recolectaron 0.5 m^3 de lodos, los cuales fueron almacenados en bolsas plásticas de color negro.

4.2.3 Pre tratamiento de lodos residuales

El proceso de pre-tratamiento comenzó el día 29 de mayo del 2014 y consistió en someter los lodos a deshidratación natural, para lo cual se formó una película uniforme de aproximadamente 0.1 metros de espesor sobre una base de cemento cubierta con una membrana plástica para evitar contaminación. Estos lodos fueron removidos mecánicamente cada 72 horas durante 35 días hasta reducir el porcentaje de humedad a un 10%. Los lodos deshidratados se trituraron y se tamizaron a través de una malla circular de 2 mm, según las especificaciones de la norma NOM-021-RECNAT-2000. Posteriormente se almacenaron en un envase plástico a temperatura ambiente para realizar posteriormente los tratamientos de pirólisis y análisis correspondientes.

4.2.4 Ensayo preliminar

Se realizó un experimento preliminar en laboratorio empleando una Mufla para determinar tiempo y temperatura adecuada para generar Biochar a partir de los lodos residuales. En base a revisión de literatura, se seleccionaron dos rangos de temperatura (250-300°C y 550-600°C) y dos tiempos de operación (30 y 60 minutos). La prueba se hizo por duplicado y cada unidad experimental constó de 5 g de lodos residuales previamente secos, molidos y tamizados a través de la malla de 2 mm.

4.2.5 Ensayo en el reactor de pirólisis solar

Muestras de 150 g de lodos residuales secos, molidos y tamizados se introdujeron en el dispositivo generador de Biochar y se expusieron a temperaturas de 280-350°C por espacio de 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 3 y 4 horas (Cuadro 5). Estas temperaturas fueron las máximas obtenidas en el dispositivo utilizando como fluido aceite (describir), dado que el uso de agua como fluido de trabajo no incrementó la temperatura en los valores requeridos.

Cuadro 5. Tratamientos de pirólisis utilizando un reactor solar.

Tratamiento	Muestra (g)	Temperatura (°C)	Tiempo de residencia (h)
T0 (Testigo)	150	Secado a temperatura ambiente	--
T1	150	280-330	0.5
T2	150	280-355	1
T3	150	280-300	1.5
T4	150	280-355	2
T5	150	280-330	3
T6	150	280-330	4

4.3 Análisis físico-químico del Biochar generado

Las muestras obtenidas luego del tratamiento de pirólisis (T1,T2,T3,T4,T5 Y T6), así como el tratamiento testigo (T0, Lodos residuales deshidratados a temperatura ambiente), se analizaron para las variables: pH, CE (conductividad eléctrica), Dap (densidad aparente), %porosidad, %humedad, M.O., micronutrientes disponibles y composición total de elementos (C, N, O, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Fe, Ti, Mn, Cu, Zn), utilizando las metodologías estándar que se describen a continuación.

4.3.1 pH y CE

El pH se determinó en una relación Biochar:agua 1:2, de acuerdo con el método descrito por Sarkar y Halder (2005) para suelos. La conductividad eléctrica (CE) se determinó en una relación Biochar:agua 1:2, de acuerdo con el método descrito por Sarkar y Halder (2005) para suelos. Estos procedimientos fueron realizados en el Laboratorio de Análisis y Diagnóstico del Patrimonio (LADIPA) del Colegio de Michoacán, A.C. Campus La Piedad.

4.3.2 Densidad aparente y porosidad

Se utilizó el método descrito por Sarkar y Halder (2005) y fue realizado en el Laboratorio de Análisis y Diagnóstico del Patrimonio (LADIPA) del Colegio de Michoacán, A.C. Campus La Piedad.

4.3.3 Contenido de materia orgánica (%)

Se utilizó el método de “*loss for Ignition*”, descrito por Ben-Dor y Banin (1989), con una sensibilidad del 0.2-0.5%, y realizado en el Laboratorio de Análisis y Diagnóstico del Patrimonio (LADIPA) del Colegio de Michoacán, A.C. Campus La Piedad.

4.3.4 Cuantificación de micronutrientes

La concentración de micronutrientos (Cu, Mn, Zn y Fe) se realizó utilizando dos soluciones extractantes: el ácido dietilen-triamino-pentaacético (DTPA) y el EDTA (Lindsay y Norvell, 1978; Farrell *et al.*, 2013). En el primer caso se tomaron 10 gramos de muestra de Biochar y lodos residuales deshidratados, previamente molidos y tamizados, añadiéndose 40 mL de solución DTPA y se sometieron a agitación por dos horas. Posteriormente se centrifugó para recuperar el sobrenadante y, por último, se tomó la alícuota y se procedió a la lectura mediante espectrofotometría de flama (AA) utilizando lámpara de cátodo hueco para cada elemento. La extracción con EDTA se realizó utilizando una solución 0.05 M de EDTA, en una relación muestra:extractante de 1:10 (1 g Biochar y 10 ml de EDTA 0.05 M), con agitación recíproca por una hora, centrifugado, filtrado a través de papel Whatman 42 y lectura en el espectrofotómetro AA.

4.3.5 Cuantificación de elementos totales

A la par de las determinaciones agronómicas anteriormente descritas, se realizó un análisis de la composición elemental del material. Los elementos totales en pocos casos se han relacionado con su disponibilidad para las plantas (Mortvedt *et al.*, 1991) y por esta razón se han empleado tradicionalmente otras técnicas o procedimientos analíticos que sí se han correlacionado con la respuesta de las plantas. Sin embargo, el análisis elemental de los sustratos reviste especial importancia dado que el cambio en las condiciones donde se desarrollan las plantas (aumento/disminución de pH, condiciones redox) puede conducir a una liberación o disolución de los elementos presentes en el sustrato, en este caso el Biochar, y cambiar su disponibilidad para las plantas.

Para la determinación de elementos totales en el Biochar generado, se emplearon las técnicas de Espectrometría de Rayos X, Dispersión y Fluorescencia, acopladas a un microscopio electrónico de barrido (SEM-EDS-XRF, microscopio modelo JEOL-JSM-6390LV/LGS). Dicho procedimiento consistió en la preparación de una muestra, sometida a proceso de secado a 40°C, y analizada mediante SEM-EDS para

determinar C, N, O, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Fe, Ti, Mn, Cu, Zn. Estas determinaciones fueron realizadas en el Laboratorio de Análisis y Diagnóstico del Patrimonio (LADIPA), del Colegio de Michoacán, Campus La Piedad.

V.RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Dispositivo generador de biochar

El dispositivo constó de la estructura parabólica a la que se adicionaron cuatro líneas de cinco espejos planos (12m^2) para aumentar la radiación incidente en la parábola e incrementar la temperatura del fluido (Figuras 14 a 16). Esta modificación se realizó dado que en las pruebas preliminares de funcionamiento no se alcanzaron las temperaturas óptimas. Además, se usó como fluido el aceite (tipo), el cual tiene un coeficiente de transmisión de calor mayor que el agua.



Figura 14. Sistema de captación solar.



Figura 15. Sistema térmico para generar Biochar por pirólisis.



Figura 16. Detalles del proceso de construcción del dispositivo para generar Biochar por pirólisis.

5.1.1 Medidas de seguridad y pruebas de operación

Una vez terminada la etapa de construcción, se procedió a realizar una serie de pruebas de seguridad, mediante las cuales se determinaron las condiciones de temperatura, a las que se iniciaría la medición del tiempo de residencia de los lodos residuales en el interior del reactor. Las condiciones seleccionadas fueron: temperatura mínima de 280°C en el interior del reactor y presión del fluido de trabajo de ≈ 100 kPa. Se realizó un monitoreo constante sobre las válvulas de seguridad (manómetro), ya que mediante éstas se mantiene la temperatura interna en un rango mayor a 280°C y menor de 355°C. Este rango se controló mediante la manipulación del flujo másico y la presión manométrica del fluido de trabajo, esto a través de la liberación de la presión de vapor por apertura/cierre de la válvula. Se determinó un límite de 355°C para este sistema, puesto que temperaturas mayores desestabilizaron el dispositivo.

En la Figura 17 se aprecia el medidor de temperatura utilizado (termopar) y el valor de la temperatura obtenido en un momento de la puesta en marcha del dispositivo, así como una de las válvulas de control.



Figura 17. Termopar utilizado para la medición de la temperatura interna en el dispositivo y válvulas de control de temperatura y presión.

Las válvulas de control se manejaron manualmente cuando la temperatura interna sobrepasó los límites propuestos. Al accionar la válvula el fluido de trabajo que se encontraba a elevadas temperaturas y altas presiones fue expulsado por un diferencial de presión y a la vez fue sustituido por agua saturada a menor temperatura.

5.2 Producción de Biochar

5.2.1 Ensayo de laboratorio

Los materiales resultantes de someter los lodos residuales a distintos tratamientos de temperatura y tiempo de residencia en la mufla, presentaron distintas coloraciones, desde el pardo claro (tratamiento T1) hasta una coloración negro metálico (tratamiento 4, T4) (Figura 18); ésta última es una coloración característica de los materiales orgánicos sometidos a procesos de carbonización.



Figura 18. Aspecto del Biochar obtenido por pirólisis (tratamiento T4) en mufla a partir de lodos residuales.

Las pérdidas de volumen fueron de 11.4 a 66% (Cuadro 6). A bajas temperaturas de pirólisis (250-300°C) no hay variación significativa en la pérdida de volumen; esta variable es fuertemente afectada a altas temperaturas (550-600°C) combinadas con mayores tiempos de residencia como lo han observado Yuan *et al.* (2013).

Cuadro 6. Tratamiento de temperatura y tiempos de exposición de lodos residuales en condiciones de laboratorio.

Tratamiento	Temperatura (°C)	Temperatura	Reducción de volumen
T1	250-300	30 minutos	11.4%
T2	250-300	60 minutos	12%
T3	550-600	30 minutos	40.5%
T4	550-600	60 minutos	66%

5.2.2 Ensayo en el reactor de pirólisis

Después de realizar las pruebas de seguridad, así como la determinación de los parámetros de operación del dispositivo de pirólisis, se procedió a la producción de Biochar. En la cual, se realizó un monitoreo constante de la temperatura interior (termopar), la variación de presión en el fluido de trabajo y presión interna (válvulas de presión). Logradas las condiciones de operación requeridas se inició con los tratamientos. A pesar de los ajustes realizados al dispositivo, no pudieron obtenerse temperaturas constantes, por lo que se decidió a trabajar con los rangos de temperatura obtenidos (280 a 355°C) y los tiempos predeterminados (Cuadro 7).

Pérdidas de peso

Los resultados obtenidos muestran una relación directa entre lodos residuales tratados y masa del Biochar producido.

Cuadro 7. Tratamientos térmicos (pirólisis) de lodos residuales a distintos tiempos de residencia.

Tratamiento	Muestra (g)	Temperatura (°C)	Tiempo de residencia (h)
T0 (Testigo)	150	Temperatura ambiental	--
T1	150	280-330	0.5
T2	150	280-355	1
T3	150	280-300	1.5
T4	150	280-355	2
T5	150	280-330	3
T6	150	280-330	4

La Figura 19 muestra la correlación entre temperatura, masa final y tiempo de exposición con los tratamientos de pirólisis en el dispositivo solar. En ella se puede apreciar que en un tiempo menor a 0.5 h, los lodos residuales han sufrido transformaciones en más del 65%. En el siguiente tratamiento el cual fue sometido a 355°C y 1h, las transformaciones de masa son ligeramente mayores que en al primer caso, únicamente se tiene un diferencial de masas de 3.3%.

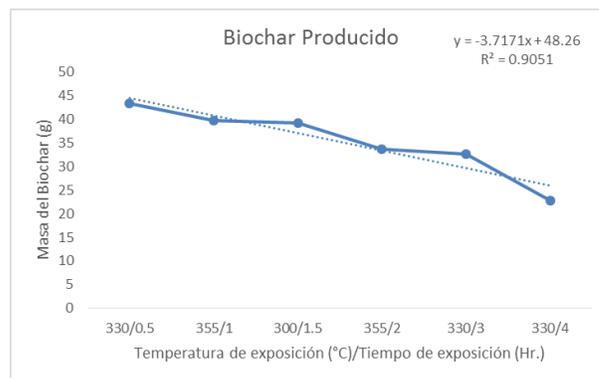


Figura 19. Tratamientos de pirólisis y masa final del producto obtenido (Biochar).

Del comportamiento generalizado observado en los resultados del Biochar obtenido se puede afirmar que la mayor conversión tiene lugar en los primeros 30 minutos de iniciado el proceso, además de lograr mejores resultados de transformación si las temperaturas superan los 350°C. Si bien los resultados de los tratamientos de T2, T3, y T4 horas arrojan una mayor concentración de residuos, éstos representan un costo energético mayor a 800%, y tan solo se logra una eficiencia de transformación menor a 15% (como pérdida de peso).

5.3 Propiedades físico-químicas del Biochar generado

5.3.1 Composición elemental

La composición total de elementos del Biochar fue obtenida por el método de Espectrometría de Rayos X, Dispersión y Fluorescencia, acopladas a un microscopio electrónico de barrido (SEM-EDS-XRF).

Carbono (C), Nitrógeno (N) y Oxígeno (O). En el Cuadro 8 se observa que el carbono total mostró altas concentraciones (31.23 a 38.1 %). El C total incluye formas químicas tanto orgánicas como inorgánicas de este elemento (Jiménez *et al.*, 2012), lo que puede explicar estos elevados valores. En el mismo Cuadro se aprecia que el porcentaje de Carbono, tanto en un inicio como al final de cada tratamiento, se mantiene sin cambios significativos ($r^2 = 0.027$); sin embargo, si bien los lodos residuales se encuentran en atmósferas libres de oxidantes durante el proceso de pirólisis, en estas condiciones se pueden generar reacciones químicas que permiten la liberación de Carbono en forma de gases o aceites (Huff *et al.*, 2014) de bajo poder calorífico.

La composición del Biochar respecto al porcentaje de Nitrógeno total en la muestra tuvo un comportamiento similar al de Carbono (Figura 20).e incluso las variaciones tampoco fueron significativas con respecto al tiempo de pirólisis ($r^2 = 0.036$); las concentraciones

fueron del orden de 6.54 a 7.33%, valores que se consideran elevados dada la naturaleza de los lodos residuales (Xia *et al.*, 2011); esto indica que estos lodos residuales tratados por pirólisis podrían ser una fuente alternativa de Nitrógeno para las plantas cultivadas. Los trabajos de otros autores indican que, para el caso de lodos residuales que se someten a procesos de pirólisis, una parte de estos materiales se libera a la atmósfera como cianuro de hidrógeno y amoníaco, los cuales posteriormente sufren una oxidación dando lugar a la formación de óxido nitroso y nítrico, mientras que una parte de Nitrógeno se fija al Biochar, afectando la relación N/Materia orgánica (Benzaoui *et al.*, 2013).

Cuadro 8. Concentración total de Carbono, Nitrógeno y Oxígeno en el Biochar.

TRATAMIENTOS	Concentración %		
	C	N	O
T0	31.23	7.00	45.25
T1	37.20	7.70	37.99
T2	32.19	7.69	38.61
T3	38.10	7.62	35.60
T4	31.46	6.54	39.09
T5	36.24	7.12	36.09
T6	34.21	7.33	36.53
r ²	0.027	0.036	0.416

El Oxígeno, por otro lado, mostró una relación significativa e inversa con el aumento del tiempo de pirólisis, esto como resultado de la gasificación de una parte de este elemento durante el proceso de generación del Biochar (Benzaoui *et al.*, 2013).

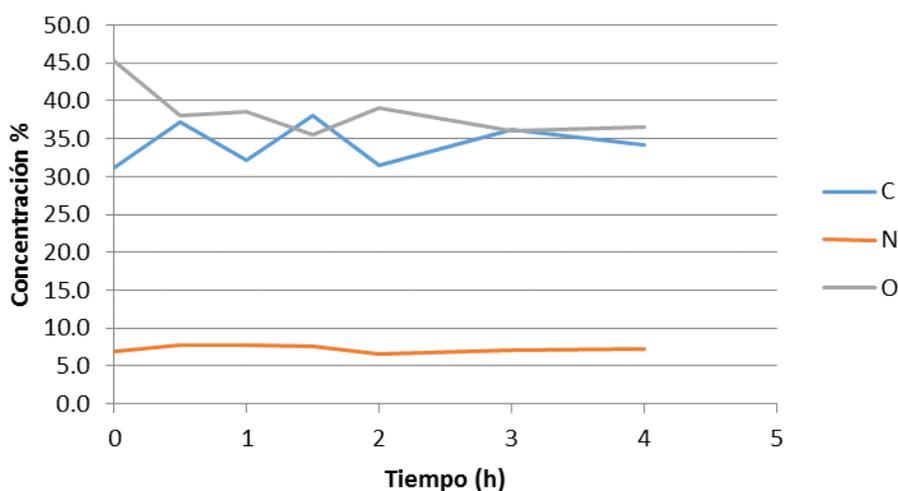


Figura 20. Concentración total de carbono (C), nitrógeno (N) y oxígeno (O) en el Biochar.

Considerando la concentración molar del C y O (Cuadro 9), se observa que la relación molar O:C es > 0.3 , lo que indica un bajo grado de aromatización del Biochar (Benzaoui *et al.*, 2013; Evangelou *et al.*, 2015).

Cuadro 9. Relación molar O:C en el Biochar.

Tratamiento	C			O			O/C
	%	mg kg ⁻¹	M	%	mg kg ⁻¹	M	
T0	31.2	312264.1	26.02	45.2	452519.5	28.28	1.09
T1	34.2	342073.6	28.51	36.5	365262.9	22.83	0.80
T2	36.2	362438.9	30.20	36.1	360885.8	22.55	0.75
T3	31.4	314599.6	26.22	39.1	390936.4	24.43	0.93
T4	38.1	381002.2	31.75	35.6	356046.3	22.25	0.70
T5	32.2	321901.5	26.82	38.6	386137.4	24.13	0.90
T6	37.2	371959.5	30.99	37.9	379862.2	23.74	0.77

Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Sodio (Na) y Potasio (K). Los elementos Calcio (Ca), Magnesio (Mg) y Potasio (K) son macro-elementos fundamentales para el desarrollo óptimo de las plantas; por otro lado, la concentración iónica del Ca, Mg y Na en los suelos determina la composición cuantitativa y cualitativa de las sales solubles existentes en este sistema. Estos aspectos influyen fuertemente en el desarrollo de las plantas cultivadas, de ahí la importancia de su cuantificación. En el Cuadro 10 se presenta la concentración obtenida de estos elementos con los tratamientos de pirólisis.

Cuadro 10. Concentración total de Ca, Mg, Na y K en el Biochar.

TRATAMIENTOS	g kg ⁻¹			
	Ca	Mg	Na	K
T0	23.4	11.3	2.7	6.0
T1	21.9	13.6	2.9	7.1
T2	32.0	14.4	3.6	8.2
T3	23.6	14.4	3.5	7.8
T4	33.5	16.0	3.9	9.1
T5	25.8	15.3	3.6	9.1
T6	30.7	15.1	4.3	9.5
r ²	0.209	0.536	0.798	0.810

En general, se observa un aumento en la concentración de estos elementos con el aumento en los tiempos de pirólisis, aunque esta relación no fue significativa para el Ca y sí para el Mg, Na y K ($r^2 = 0.209, 0.536, 0.798$ y 0.810 , respectivamente). Este aumento está relacionado con una reconcentración de los elementos debido a la pérdida de humedad con los distintos tratamientos, donde una proporción de éstos se va en los fluidos de desecho generados por la pirólisis. La excepción es el Ca debido a que una pérdida de humedad causa la formación de compuestos de baja solubilidad como el CaCO_3 que permanece como precipitado en el Biochar. La distribución gráfica de estos elementos se muestra en la Figura 21.

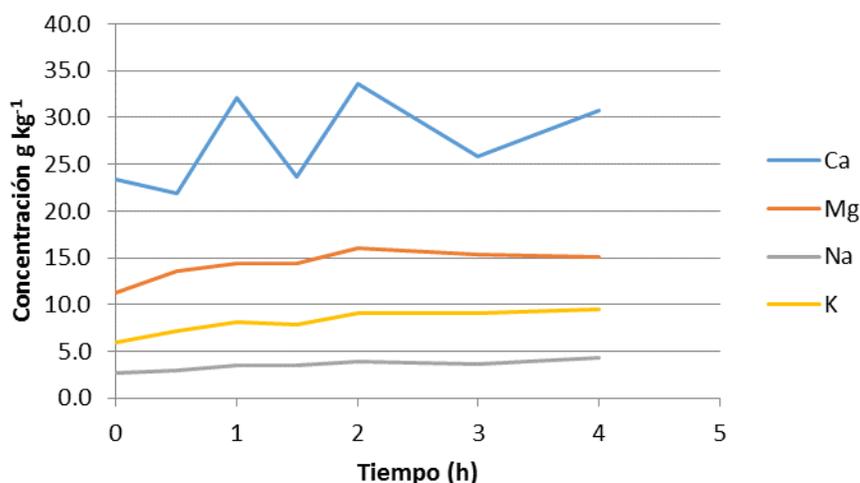


Figura 21. Concentración total de calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na) y potasio (K) en el Biochar.

Fósforo (P), Azufre (S) y Cloro (Cl). El P y S son macro-elementos esenciales para el desarrollo de las plantas y su presencia en el Biochar producido resulta de interés en el ámbito agrícola. Por otro lado, la oxidación del azufre elemental, en condiciones de aireación del Biochar cuando éste se aplica al suelo, da lugar a la forma química de sulfato (SO_4^{2-}) y puede incrementar la concentración de sales solubles sulfáticas en el sistema. El Cl es uno de los elementos principales que constituyen las sales solubles en los suelos agrícolas; su elevada solubilidad y baja capacidad de sorción a las partículas del suelo lo han hecho idóneo como elemento indicador de la acumulación de sales y del origen de las mismas (Wang *et al.*, 2015a).

El P y Cl mostraron una relación directa y significativa con los tratamientos de pirólisis, mientras que el S presentó una relación inversa y significativa (Cuadro 11 y Figura 22).

Cuadro 11. Concentración total de fósforo (P), azufre (S) y cloro (Cl) en el Biochar generado.

TRATAMIENTOS	g kg ⁻¹		
	P	S	Cl
T0	34.1	9.2	0.4
T1	37.7	7.8	0.0
T2	45.3	8.7	0.9
T3	40.1	6.1	0.7
T4	48.8	6.8	0.7
T5	44.2	4.4	1.3
T6	46.2	5.2	1.7
r ²	0.501	0.776	0.823

Es conocido que el P total no guarda relación con el P disponible para la planta; sin embargo, el cambio en las condiciones físico-químicas del suelo (aumento de condiciones reductoras y disminución de pH) causa un aumento en la solubilidad de P (Wang *et al.*, 2015a). El Biochar posee características similares a las del carbón activado (Xu *et al.*, 2014).

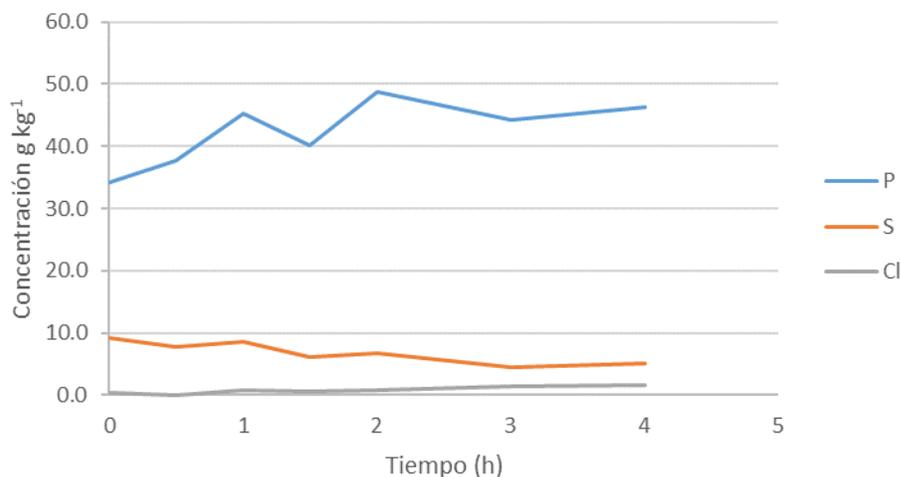


Figura 22. Concentración de fósforo (P), Azufre (S) y Cloro (Cl) totales en el Biochar.

Aluminio (Al), Silicio (Si) y Titanio (Ti). El Al y Si son constituyentes fundamentales de los minerales arcillosos en el suelo (Klein y Hurlbut, 1997). En el Cuadro 12 se muestran las concentraciones totales obtenidas del Al, Si y Ti con los distintos tratamientos de pirólisis. La distribución gráfica de estos elementos se observa en la Figura 23. Con excepción del Ti, se observa una relación directa y significativa entre los tiempos de pirólisis y la concentración de estos elementos; las concentraciones fueron de 15.9 a 22.7, 49.6 a 71.0 y 0.25 a 0.28 g kg⁻¹ para el Al, Si y Ti, respectivamente.

Cuadro 12. Concentración total de aluminio (Al), Silicio (Si) y Titanio (Ti) totales en el Biochar.

TRATAMIENTOS	g kg ⁻¹		
	Al	Si	Ti
T0	15.9	49.6	0.25
T1	16.7	50.7	0.25
T2	20.9	64.2	0.27
T3	18.5	58.6	0.27
T4	22.7	71.0	0.25
T5	21.5	64.9	0.28
T6	22.2	68.6	0.27
r ²	0.635	0.609	0.334

Las mayores concentraciones de Si en relación con el Al puede derivarse de la presencia en el Biochar de minerales arcillosos del tipo de las Esmectitas (minerales 2:1) u otros minerales silicatados. Los minerales silicatados se encuentran en las rocas volcánicas de tipo basalto que abundan en la zona, ubicada en lo que se conoce como Faja Volcánica Transmexicana o Eje Neovolcánico (Silva, 1988). La concentración prácticamente constante del Ti con los tratamientos de pirólisis indica que es un elemento poco afectado por las temperaturas a las que se expuso y es de baja solubilidad.

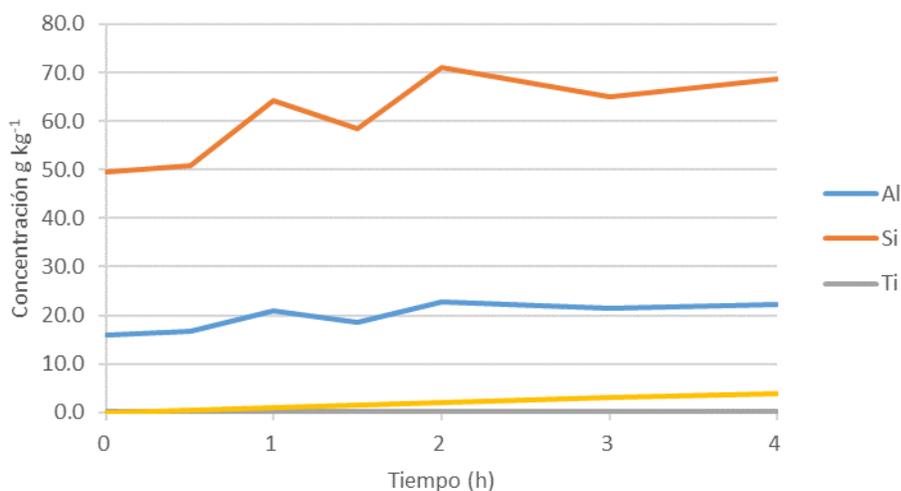


Figura 23. Concentración de aluminio (Al), Silicio (Si) y Titanio (Ti) totales en el Biochar producido a diferentes tratamientos de pirólisis.

Hierro (Fe), Manganeso (Mn), Cobre (Cu) y Zinc (Zn). En el Cuadro 13 se presentan los valores totales de estos elementos. La Figura 24 muestra la distribución de estos elementos con los tratamientos de pirólisis.

Cuadro 13. Concentración total de Fe, Mn, Cu y Zn en el Biochar.

TRATAMIENTOS	g kg ⁻¹			
	Fe	Mn	Cu	Zn
T0	12.57	0.23	0.19	1.45
T1	12.72	0.20	0.12	1.53
T2	16.90	0.19	0.18	1.29
T3	13.59	0.21	0.20	1.38
T4	16.52	0.19	0.20	1.27
T5	15.54	0.19	0.17	1.40
T6	15.96	0.17	0.16	1.29
r ²	0.335	0.676	0.000	0.313

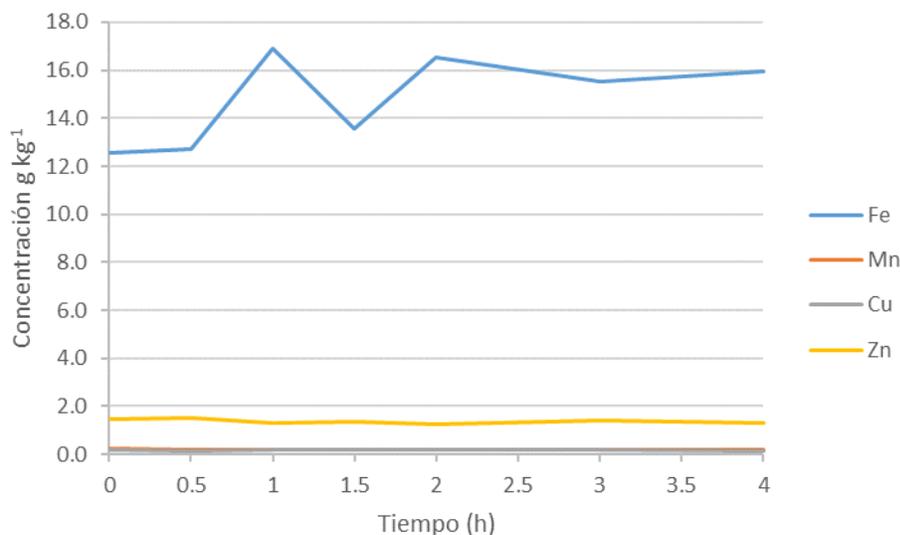


Figura 24. Concentración de Hierro (Fe), Manganeso (Mn), Cobre (Cu) y Zinc (Zn) totales en el Biochar.

5.3.2 Propiedades físico-químicas en relación con el uso agronómico del Biochar

Dentro de los múltiples estudios que se han realizado sobre la efectividad del Biochar destaca su implementación como un mejorador de suelos; diversos autores han realizado demostraciones en campo, así como evaluaciones en laboratorio sobre su efectividad (Escalante-Rebolledo, 2013; Conte, 2014; Windeatt *et al.*, 2014; Butnan *et al.*, 2015; Evangelou *et al.*, 2015).

pH, conductividad eléctrica (CE), materia orgánica (M.O.), densidad aparente (Dap) y porosidad. Los valores de pH fluctuaron entre 6.94 y 7.33, los cuales son considerados dentro del rango adecuado para el desarrollo de los cultivos (Lee *et al.*, 2013; Escalante-Rebolledo, 2013). El pH mostró un aumento con el tiempo de pirólisis (Cuadro 14), aunque no fue significativa ($r^2 = 0.375$). La CE presentó disminuciones significativas con el aumento del tiempo de pirólisis ($r^2 = 0.692$). Durante el experimento se colectaron líquidos derivados de la pirólisis, probablemente estos fluidos contenían

altas concentraciones de sales que se encontraban en el material original (T0), sin embargo no fue posible obtener mayores datos de estos extractos secundarios.

La materia orgánica (M.O.) presentó valores de 5.7 a 3.84 (Cuadro 14), indicando que el Biochar obtenido es una fuente importante de estos materiales para uso agrícola. Por otra parte, la M.O. mostró un decremento significativo con el aumento en el tiempo de pirólisis ($r^2 = 0.603$) al igual que la humedad ($r^2 = 0.610$), mientras que la relación de esta variable con la densidad aparente (Dap) y la porosidad no fue significativa ($r^2 = 0.26$ y 0.18 , respectivamente). Con el aumento de temperatura y tiempo de exposición a ésta, algunos compuestos orgánicos pudieron volatilizarse (Fang *et al.*, 2015) o fueron disueltos y excretados en los fluidos que se colectaron a la salida del dispositivo solar de Biochar. Esto explica la disminución de la M.O. observada.

Cuadro 14. Valores de pH, conductividad eléctrica (CE), materia orgánica (M.O.), densidad aparente (Dap), porosidad y humedad en el Biochar.

Tratamientos	pH	CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	M.O. (%)	Dap (g cm^{-3})	Porosidad (%)	Humedad (%)
T0	6.94	5240	5.7	0.89	53.28	61.33
T1	6.33	3110	5.61	0.93	15.45	57.86
T2	6.55	1737	4.33	0.89	7.50	45.18
T3	6.68	1538	4.98	0.91	15.87	51.32
T4	6.75	901	3.84	0.91	13.00	40.72
T5	7.33	715	4.39	0.93	54.41	46.17
T6	7.02	592	3.95	0.92	55.84	41.52
r^2	0.375	0.693	0.603	0.264	0.189	0.610

Micronutrientes disponibles. Los micronutrientes extractados con EDTA y DTPA (Cuadro 15) mostraron las mayores concentraciones en el tratamiento testigo (T0). El EDTA mostró mayor capacidad que el DTPA para extraer los metales analizados, como se ha observado en otros trabajos (Mortvedt *et al.*, 1991; Farrell *et al.*, 2013). Para el Cu, la concentración obtenida con DTPA fue el 5% en relación con aquella encontrada con el EDTA; para el Mn, Zn y Fe esta relación fue de 15, 7.0 y 0.8%, respectivamente. En general, la concentración de micronutrientes decreció con los tratamientos de

pirólisis, siendo el efecto más marcado para el Cu con los dos extractantes (DTPA y EDTA); este elemento no fue extractado con estas soluciones a partir del primer tratamiento de pirólisis (280-330°C y 0.5 h). El Mn mostró un comportamiento diferencial con el tipo de extractante. Con la solución de DTPA se obtuvieron bajas concentraciones a partir del tratamiento T1; en el tratamiento T4 no se detectó este micronutriente, mientras que el Zn extractado con DTPA no fue detectado a partir del tratamiento T2 (280-355°C y 1 h). Este comportamiento del Cu, Mn y Zn es causado por su fijación en complejos orgánicos que se forman durante el proceso de pirólisis (Klug, 2012). El Fe decreció en general con los tratamientos de pirólisis, independientemente de la solución extractante (DTPA y EDTA), detectándose en todos los tratamientos (Cuadro 15).

Cuadro 15. Concentración de micronutrientes (mg kg⁻¹) en el Biochar.

Tratamiento	Cu		Mn		Zn		Fe	
	DTPA	EDTA	DTPA	EDTA	DTPA	EDTA	DTPA	EDTA
T0	2.016	37.54	19.14	124.1	33.344	462.6	7.062	828.2
T1	nd	nd	8.192	67.64	19.448	243.0	10.11	571.8
T2	nd	nd	0.246	48.95	nd	87.26	2.254	278.0
T3	nd	nd	0.246	47.15	nd	80.92	2.564	405.12
T4	nd	nd	nd	51.78	nd	84.8	1.942	320.48
T5	nd	nd	nd	43.63	nd	65.24	2.642	379.2
T6	nd	nd	nd	50.47	nd	89.18	4.1	427.4

La concentración de estos metales disminuyó con el aumento del tiempo de pirólisis, tanto para el extractante EDTA como para el DTPA (Figuras 25 y 26).

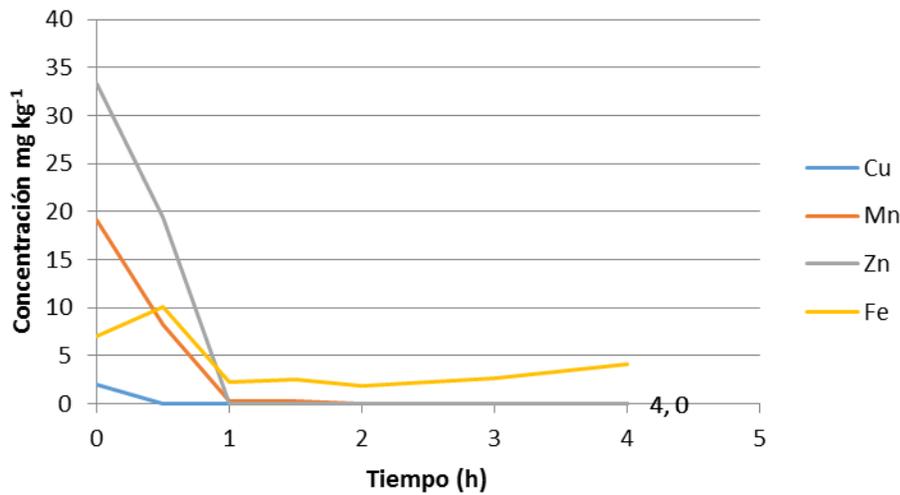


Figura 25. Concentración de micronutrientos extraídos con DTPA en relación con el tiempo de pirólisis.

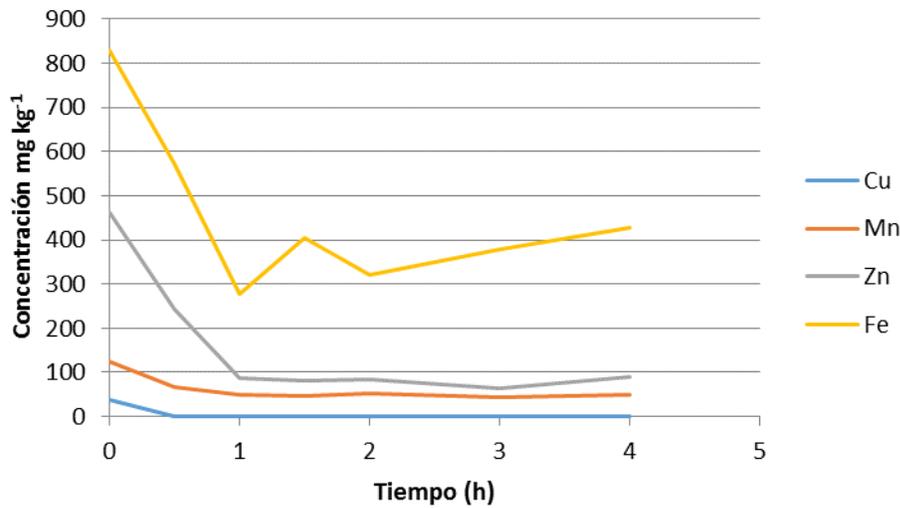


Figura 26. Concentración de micronutrientos extraídos con EDTA en relación con el tiempo de pirólisis.

VI.CONCLUSIONES

El diseño y construcción de un reactor de pirólisis lenta, con temperaturas bajas, basado en energía térmica solar, fue factible realizarlos a pequeña escala. La pirólisis de los lodos residuales utilizando un reactor de este tipo, puede ser un tratamiento adecuado para generar un mejorador de suelos a partir de estos materiales de desecho de las plantas de tratamiento de aguas residuales. Este mejorador podría ser adecuado para suelos de reacción ácida, neutra e incluso alcalina ya que el Biochar obtenido fue de baja salinidad (CE) y de reacción neutra o ligeramente ácida. Las elevadas concentraciones de N total, contenido de C y materia orgánica en el Biochar muestran que el producto puede ser una fuente importante de estos elementos y compuestos de importancia agronómica. La disminución en los índices de disponibilidad para las plantas (extracción con DTPA y EDTA) de los micronutrientes (Cu, Fe, Mn, Zn) con los tratamientos de pirólisis, puede considerarse un efecto positivo ya que se busca que el producto Biochar muestre bajos valores de movilidad de los metales pesados cuando éste es aplicado en suelos. Es conveniente, sin embargo, realizar estudios sobre contenido de metales pesados y su dinámica en los suelos donde es factible utilizar el Biochar generado por este procedimiento.

VII.BIBLIOGRAFÍA

- Abusoglu, A.; Demir, S. and M. Kanoglu. 2013. Assessment of sewage sludge potential from municipal wastewater treatment plants for sustainable biogas and hydrogen productions in Turkey. En: I. Dincer et al. (eds.). Causes, Impacts and Solutions to Global Warming, Springer Science+Business Media, New York. pp. 609-626.
- Barrios, J. A.; Rodríguez, A.; González, A.; Jiménez, B. y C. Maya. 2000. Destrucción de coliformes fecales y huevos de helmintos en lodos fisicoquímicos por vía ácida. Memorias XII Congreso Nacional 2000. FEMISCA. AIDIS. Morelia, Mich. México. Año 1. No. 1. Tomo 1. pp 913.
- Ben-Dor, E. and A. Banin. 1989. Determination of organic matter content in aridzone soils using a simple "loss-on-ignition" method. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 20(15-16): 1675-1695.
- Butnan, S.; Deenik, J. L.; Toomsan, B.; Antal, M.J.; P. Vityakon. 2015. Biochar characteristics and application rates affecting corn growth and properties of soils contrasting in texture and mineralogy. *Geoderma* 237-238:105-116.
- Benzaoui, A.; Vaxelaire, J.; Marias, F.; Gelix, F.; Pillet, S. and D. Cretenot. 2013. Emission of nitrogen compounds by incineration of a wastewater sludge particle under fluidized bed conditions: a numerical approach. *Waste Biomass Valor.* 4:181-195.
- Campos-Medina, E.; García-Rojas, N.; Alma Velásquez-Rodríguez, A. y M. García-Fabila. 2009. Análisis básico del reuso de lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales en suelos de pradera del Parque Nacional Nevado de Toluca. *Quivera* 2:35-51.
- Caporale, A.G.; Pigna, M.; Sommella, A. and P. Conte. 2014. Effect of pruning-derived biochar on heavy metals removal and water dynamics. *Biol Fertil Soils.* 50:1211-1222.
- Cardoso, L. y A.R. González. 1995. Identificación de sistemas de tratamiento de lodos residuales. CONAGUA-IMTA. Folleto Técnico. México, D.F. 57 p.
- Castrejón, A.; Barrios, J.A.; Jiménez, B.; Maya, C.; Rodríguez, A. y A. González. 2000. Evaluación de la calidad de lodos residuales de México. 14 p. <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsaidis/mexico13/061.pdf>. Consultado: 02/mayo/2015.
- Chávez-Alcántar, A., Velázquez-Machuca, M., Pimentel-Equihua, J.L., Venegas-González, J., Montañez-Soto, J.L., Vázquez-Gálvez, G. 2011. Hidroquímica de las aguas superficiales de la Ciénega de Chapala e índice de Calidad de Agua. *Terra Latinoamericana* 29(1): 83-94.
- Chia, Ch. H.; Singh, B.P.; Joseph, S.; Graber, E.R. and P. Munroe. 2014. Characterization of an enriched biochar. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis.* 108:26-34.
- Chun, Y.N.; Ji, D.W. and K. Yoshikawa. 2013. Pyrolysis and gasification characterization of sewage sludge for high quality gas and char production. *Journal of Mechanical Science and Technology.* 27 (1):263-272.
- Colín-Cruz, A.; Ayestarán-Hernández, L. M.; Gutiérrez-Segura, E. E. y J. Torres-Pérez. 2006. Nuevas aplicaciones de lodos residuales. Memorias V Congreso

- Internacional y XI Congreso Nacional de Ciencias Ambientales. Oaxtepec, Morelos. 6-9 de junio de 2006. 14 p.
- Conte, P. 2014. Biochar, soil fertility, and environment. *Biol Fertil Soils*. 50:1175.
- CONABIO (Comisión Nacional para la Biodiversidad). 2015. Insolación anual (en isolíneas). http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/insolav8mgw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no. [en línea]. Consultado 16/junio/2015.
- CONAGUA Comisión Nacional del Agua). 2012. Estadísticas del agua en México. Ed. 2012. <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/EAM2013.pdf>.
- Dapeng, L. and Q. Jihui. 2009. The progress of catalytic technologies in water purification: A review. *Journal of Environmental Sciences*, 21:713–719.
- Defrieri, R. L.; M. P. Jiménez, D. Efron y M. Palma. 2005. Utilización de parámetros químicos y microbiológicos como criterios de madurez durante el proceso de compostaje. *Agriscientia*, XXII (1): 25-31.
- Domínguez-Ramos, A. 2010. Electro-Oxidación solar fotovoltaica (ESOF) de aguas residuales con carga orgánica. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación-Universidad de Cantabria, España. 146 p.
- Downie, A. and Zwieten, L.V. 2013. Biochar: a coproduct to bioenergy from slow-pyrolysis technology. In: Lee, J.W. (ed.), *Advanced Biofuels and Bioproducts*. Springer Science Business Media. New York. pp. 97-117.
- Echazú, R. y C. Cadena. 1998. Mecanismo de Seguimiento para Cocinas Solares. *AVERMA.2*: 61-
- Echazú, R.; Saravia, L.; Alía de Saravia, D.; Quiroga, M. y M. Condorí. 2008. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. 12:141-148.
- Escalante-Rebolledo, M.A. 2013. Biocarbones (Biochars), caracterización y efecto en la biomasa y nutrición de N P K en una gramínea. Tesis Doctora en Ciencias. Colegio de Postgraduados. 152 p.
- Evangelou, M.W.H.; Fellet, G.; Ji, R and R. Schulin. 2015. Phytoremediation and Biochar application as an amendment. In: A.A. Ansari *et al.* (eds.). *Phytoremediation: Management of Environmental Contaminants*. Volume 1, 253. Springer International Publishing, Switzerland. pp. 253-263.
- Fajardo-Villaquiran, A. J. 2011. Diseño y construcción de una Unidad de Investigación en pirólisis continúa de biomasa. Tesis de grado. Universidad del Valle-Cali, Colombia. 82 p.
- Fang, Y.; Singh, B. and B. P. Singh. 2015. Effect of temperature on biochar priming effects and its stability in soils. *Soil Biology & Biochemistry* 80:136-145.
- Farrell, M.; Rangott, G. and E. Krull. 2013. Difficulties in using soil-based methods to assess plant availability of potentially toxic elements in biochars and their feedstocks. *Journal of Hazardous Materials*. 250– 251:29– 36.
- Fuentes-Hernández, A. C. y A. Recio-Recio. 2005. Propuesta de diseño de un horno-reactor para realizar la pirólisis de la cáscara de arroz. *Tecnología Química XXV* (2):87-98.
- Gascó, G.; Paz-Ferreiro, J. and A. Méndez. 2012. Thermal analysis of soil amended with sewage sludge and biochar from sewage sludge pyrolysis. *J Therm Anal Calorim*. 108:769–775.

- Gil, M. E.; Wilson A. Ruiz, W. A. y F. Mondragón. 2007. Cambios estructurales durante la pirólisis y la gasificación del carbón de Venecia con CO₂ a alta presión. *Revista Energética*. 38: 33-38.
- Grajales, S. J.; Monsalve, J. A. y J. M. Castaño. Programa de Manejo Integral de los lodos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Tecnológica de Pereira. *Scientia et Technica*. XII (31): 285-290.
- Hospido. A.; Moreira, M.T.; Martín, M.; Rigola, M. and G. Feijoo. 2005. Environmental Evaluation of Different Treatment Processes for Sludge from Urban Wastewater Treatments: Anaerobic Digestion versus Thermal Process. *Int. J. LCA*. 10 (5): 336 – 345.
- Huff, M. D.; Kumar, S. and J. W. Lee. 2014. Comparative analysis of pinewood, peanut shell, and bamboo biomass derived biochars produced via hydrothermal conversion and pyrolysis. *Journal of Environmental Management* 146:303-308.
- Iglesias-Ferrer, J. M. y J. Morales-Salas. 2013. Dimensionado de un sistema térmico solar mediante simulación y su validación energética. *XXXIV* (1):55–65.
- Jiang, J.; Yuan, M.; Xu, R. and D. L. Bish. 2015. Mobilization of phosphate in variable-charge soils amended with biochars derived from crop straws. *Soil & Tillage Research* 146:139–147.
- Jiménez, F.; Mondragón, F. y D. López. 2012. JCaracterización RAMAN de carbonizados de carbón obtenidos en un reactor de lecho fijo presurizado. *Ingeniería y Competitividad*. 14(1): 9-22.
- Klein, C. and C.S. Hurlbut, Jr. 1997. *Manual de Mineralogía*. Vol 2. Editorial Reverté. 679 pp.
- Klug, M. 2012. Pirólisis, un proceso para *derretir* la biomasa. *Revista de Química PUCP*. 26(1-2):37-40.
- Kwapinski, W.; Byrne, C. M. P.; Kryachko, E.; Wolfram, P.; Adley, C.; Leahy, J.J.; Novotny, E. H. and M. H. B. Hayes. 2010. Biochar from Biomass and Waste. *Waste Biomass Valor*. 1:177–189.
- Lee, J.W.; Buchanan, A. C.; Evans, B.R. and M. Kidder. 2013. Oxygenation of Biochar for enhanced cation exchange capacity. In: J.W. Lee (ed.). *Advanced Biofuels and Bioproducts*. Springer Science+Business Media. New York. pp. 35-45.
- Lehmann, J. and S. Joseph (eds.). 2012. *Biochar for environmental management: Science and Technology*. MPG Books. UK. 448 p.
- Leng, L.J; Yuan, X.Z.; Huang, H.J.; Wang, H.; Wu, Z.; Fu, L.; Peng, X.; Chen, X. and G. Zeng. 2015. Characterization and application of bio-chars from liquefaction of microalgae, lignocellulosic biomass and sewage sludge. *Fuel Processing Technology* 129: 8–14.
- Limón-Macías, J.G. Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿problema o recurso?. 2013. Folleto. Guadalajara, Jal. 45 p.
- Lindsay, W.L. and W.A. Norvell. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42:421-428.
- Llamas-Labela, J.M. 2003. Los residuos urbanos y asimilables. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía, España. Folleto. 20 p.
- Marín-Ocampo, A. y M. Osés-Pérez. 2013. Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales con el proceso de lodos activados. DOP-Comisión Estatal de Agua de Jalisco. 256 p.

- Moreno, H.A.; Droppelmann, C. V. y M. E. Verdejo. 2006. Evaluación de carbón activado producido a partir de Lodo Generado en una Planta de Tratamiento de Aguas Servidas. *Información Tecnológica*. 17(3):9-14.
- Mortvedt, J.J.; Cox, F.R.; Shuman, L.M. and R. M. Welch (eds). 1991. *Micronutrients in agricultura*. Second Edition. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA. 731 p.
- NORMA Oficial Mexicana NOM-052-ECOL-1993, que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente. [en línea]. Consultada: 12/mayo/2015.
http://www.vertic.org/media/National%20Legislation/Mexico/MX_NOM-052-ECOL-1993.pdf.
- NORMA Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. DOF: 31/12/2002. [en línea]. Consulta: 12/mayo/2015.
http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=717582&fecha=31/12/2002.
- NORMA Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. DOF: 15/08/2003.
- NMX-W-018-SCFI-2006: Productos de cobre y sus aleaciones-tubos de cobre sin costura para conducción de fluidos a presión-especificaciones y métodos de prueba. [en línea]. Consulta: 5/mayo/2015. http://vlex.com.mx/vid/cobre-aleaciones-tubos-fluidos-381841194?_ga=1.263971276.1587608627.1463004080.
- Ortiz-Hernández, M.L.; Sánchez-Salinas, E. y M. Gutiérrez-Ruiz. 1995. Propuesta de manejo de lodos residuales de la planta de tratamiento de la ciudad industrial del valle de Cuernavaca, Estado de Morelos, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 11(2):105-115.
- Paco-Abenza, D. 2012. Evaluación de efectos de varios tipos de biochar en suelo y planta. Tesis Licenciatura en Ciencias Ambientales. Universidad Autónoma de Barcelona, España. 111 p.
- Paredes, V. C. 2012. Diseño de captador solar cilíndrico parabólico para aplicaciones rurales en Paraguay. Proyecto Final de Carrera. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. 83 p.
- Pond, K. 2005. *Water recreational and disease*, Ginebra, World Health Organization. pp. 59-146.
- Prosperi, M. y C. Minneli. 2005. Energía solar térmica. Proyecto RES & RUE Dissemination [en línea]. Consultado 05/04/2015. 18 p.
<http://www.cecu.es/temas%20interes/medio%20am...e/res&rue/htm/dossier/3%20solar%20termica.htm>.
- Purakayastha, T. J.; Kumari, S. and H. Pathak. 2015. Characterisation, stability, and microbial effects of four biochars produced from crop residues. *Geoderma* 239–240: 293–303.
- Qian, K.; Kumar, A.; Zhang, H.; Bellmer, D. and R. Huhnke. 2015. Recent advances in utilization of biochar. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 42:1055–1064.
- Quiñonez, J. E. y A. L. Hernández. 2013. Evaluación y simulación computacional de un modelo físico-matemático del colector solar calentador de aire de doble paso en contracorriente diseñado para la calefacción de edificios. *Acta de la XXXVI*

Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente 1:123-130.

- Ruesga, L. 2010. Efecto de la aplicación de lodo durante el cultivo de cebollín (*Allium fistulosum* L) en barbacoas. Tesis Maestría. Universidad de Zulia, Maracaibo, Venezuela. 71 p.
- Salazar-Briones, C.; Reyes-López, J. A.; Concepción Carreón-Díazconti, C. y M. Lomelí-Banda. 2011. Lodos residuales provenientes de la planta termoeléctrica de la Rosita en Mexicali, Baja California. Alternativas de reuso y disposición final. En: (Eds.). Hacia la sustentabilidad: Los residuos sólidos como fuente de energía y materia prima. pp. 630-633.
- Sarkar, D. and A. Halder. 2005. Physical and Chemical Methods in Soil Analysis. Fundamental Concepts and Analytical Chemistry and Instrumental Techniques. New Age International (P) Ltd. Publishers, New Delhi. pp. 176.
- SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2009. Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Edición 2009. CONAGUA. http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/situacion_agua_potable2009.pdf.
- Shackley, S.; Sohi, S.; Ibarrola, R.; Hammond, J.; Masek, O.; Brownsort, P.; Cross, A.; Prendergast-Miller, M. and S. Haszeldine. 2013. Biochar, Tool for Climate Change Mitigation and Soil Management. In: T. Lenton and N. Vaughan (eds.), *Geoengineering Responses to Climate Change: Selected Entries from the Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*. Springer Science+Business Media. New York. pp. 73-140.
- Silva, L. 1988. Algunos aspectos de los basaltos y andesitas cuaternarios de Michoacán Oriental. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 7:89-96.
- St. Martin, C.C.G. and R.A.I. Brathwaite. 2012. Compost and compost tea: Principles and prospects as substrates and soil-borne disease management strategies in soil-less vegetable production. *Biological Agriculture & Horticulture*. 28(1):1–33.
- Vicencio-De La Rosa, M.A.; Pérez-López, M. E.; Medina-Herrera, E. Martínez-Prado, M. A. 2011. Producción de composta y vermicomposta a partir de los lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de un rastro. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 27(3): 263-270.
- Wang, Z.; Guo, H.; Shen, F.; Yang, G.; Zhang, Y.; Zeng, Y.; Wang, L.; Xiao, H. and S. Deng. 2015. Biochar produced from oak sawdust by Lanthanum (La)-involved pyrolysis for adsorption of ammonium (NH₄⁺), nitrate (NO₃), and phosphate (PO₄⁻³). *Chemosphere*. 119: 646–653.
- Wang, Z.; Liu, G.; Zheng, H.; Li, F.; Ngo, H.H.; Guo, W.; Liu, C.; Chen, L. and B. Xing. 2015. Investigating the mechanisms of biochar's removal of lead from solution. *Bioresource Technology*. 177:308–317.
- Windeatt, J. H.; Ross, A. B.; Williams, P. T.; Forster, P. M.; Nahil, M. A. and S. Singh. 2014. Characteristics of biochars from crop residues: Potential for carbón sequestration and soil amendment. *Journal of Environmental Management*. 146: 189-197.
- Xia, W.; Li-ping, X.; Xin-yu, L.; Xiao-hong, D.; Xue-ning, F. and J. Yuan-guang. 2011. Effect of wastewater treatment processes on the pyrolysis properties of the pyrolysis tars from sewage sludges. *Journal of Thermal Science*. 20(2):167-172.

- Xu, X.; Cao, X.; Zhao, L. and T. Sun. 2014. Comparison of sewage sludge- and pig manure-derived biochars for hydrogen sulfide removal. *Chemosphere*. 111:296–303.
- Yuan, H.; Lu, T.; Zhao, D.; Huang, H.; Noriyuki, K. and Y. Chen. 2013. Influence of temperature on product distribution and biochar properties by municipal sludge pyrolysis. *J. Mater Cycles Waste Manag.*15:357–361.
- Yunus, A. C. and M. A. Boles. 2009. *Thermodynamics an engineering approach*. Sixth edition. Editorial Mc. Graw Hill. U.S.A. 1008 p.