

BIOCHAR Y SUS BENEFICIOS COMO POTENCIAL MITIGADOR DE LA CONTAMINACIÓN HUMANA

**BIOCHAR YÉETEL TS'A' MAATAN BEY UCHI8L TI' MITIGADOR TI' LE
EEXTALIL WIINIKO'OB**

¹ Juan Manuel Terán Xaca, juanteranx7@gmail.com

* Delghi Yudire Ruiz Patrón, delghi.rp@valladolid.tecnm.mx

³ Christian Israel Aragón Briceño, caragonb@hotmail.com

RESUMEN

El biochar se genera a partir del calentamiento de biomasa en condiciones anaerobias, siendo capaz de producir cambios benéficos en áreas como suelos, cultivos, aguas, captura de carbono, emisiones a la atmósfera y energía. Sin embargo, el desarrollo de tecnología basada en biochar ha sido limitada por las múltiples variables a controlar en el proceso de producción, que además, influyen en la efectividad del producto final. En esta investigación se desarrolló un análisis crítico mediante una revisión de literatura proveniente de bases de datos académicas, científicas y periodísticas a fin de recabar la información necesaria para proveer un dictamen verídico y concreto acerca del potencial uso de las propiedades del biochar en las comunidades rurales. Se realizó una investigación documental, analizando en primera instancia los resultados de reportes e investigaciones previas. Se analizaron propiedades cualitativas y cuantitativas expuestas por diversos autores en condiciones variadas para llegar a la construcción de ideas sobre el desempeño que tendría un biochar producido en Yucatán. Los resultados obtenidos se centran en los potenciales beneficios de la inclusión mensual del biochar en una comunidad rural de aproximadamente 500 pobladores, obteniendo una reducción en la acumulación de residuos orgánicos hasta en un 42%, generación de energía equivalente a 6.23 t de carbón, prevención de la tala mensual de 403 árboles, reducción de daños a la salud, activación de la economía y desarrollo tecnológico.

PALABRAS CLAVE

Mitigación,
Remediación,
Residuos,
Revalorización.

KOOM T'AAN

Biochar letie' ku kaajal u chokaj yóolil le' biomasas u óolmal uchul anaeróbicas bey u paajtal u meetik jejeláas luumilio'ob ja'o'ob yéetel bix chukpachtik le' chuuko', le emisiones ichil le atmosfera yéetel le energía. Chen ba'ale u binil u meyajk'al le Tecnología ti chumulkik ts'a'an ichil le Biochar. U ts'o'okanil jejeláas ba'alo'ob k méetik u tsola'an bey xan ku okoj u ts'a'e' u jach jaajil u ts'o'ok ba'alil meeta'al. Le' kajan tsíikbal méeta'abi' yéetel jump'él analisis tu'ux ku yáalaj bix beyta'al. k xixta'al le ts'iiba'alo'ob. bey u kxatal ichil najil xooko'ob. Científicos yéetel periodísticos tial u paajta'al u meyejta'al u tsíikbalil tu'ux ku a'alik u jach jaajil ba'al bix u pajtal u ts'a' le Biochar, ichil le mejen kaajalo'ob. Meyajtabi' u jump'él kaxan tsiikbalil tu'ux ku ya'ax wilaj nu kaaxtal u yáax tsiiba'alo'ob análisis, laen bey bix u uchul (cualitativa) yéetel (cuantitativa) e'esa'an men yáab autores. tu'uxs k wilaj bix u paajtal u meyajta'al u tuukulo'ob yóosal u luuk' u y'aantal ichil le Biochar, bey xan meyajta'an wuay Yucatane', u paachil yáante' chumuuktik u múuk ts'abilaj u winalil Biochar, ichil le mejen kaajalo'ob tu'ux yáan 500 paak' kaajalo'ob ku meetik u jump'ítilil u lakal yalab ba'alo'ob ku k'áastal ichil 42% ku ts'aik u múukul meyajl keetlan ti 6.23 t ti' chúuk k páatal chen u píit u ch'aach'aakal bey ku tooj óolta'al a wóol ichil le taak'ino' bey méetik Tecnológico.

TAAN T'AANIL

Mitigación,
Paak óolal,
Yalab,
Revalorización

¹ Tecnológico Nacional de México campus Valladolid/Estudiante.

² Tecnológico Nacional de México campus Valladolid/Docente.

³ Universidad de Twente/Docente.

I. INTRODUCCIÓN

La aplicación de biochar como un subproducto de la pirólisis de biomasa residual, se considera viable para ciertas actividades en función de parámetros como temperatura de pirólisis, tiempo de residencia en reactor y materia orgánica a utilizar (Hagemann et al., 2018) así como características propias del biochar obtenido tales como área de superficie, distribución y tamaño de poros, capacidad de intercambio iónico y composición molecular (Ralebitso-Senior & Orr, 2016). Durante la década pasada la investigación sobre este material se diversificó en temas como cambio climático, mejoramiento de cultivos, inmovilización de metales pesados y contaminantes orgánicos (Wu et al., 2019), encontrando resultados favorables como abono para cultivos agrícolas (Martos et al., 2020), enriquecedor de suelos (Eseri & Muwaya, 2020), y uso prometedor como combustible sólido en el hogar (Sparrevik et al., 2014). La inquietud de analizar y discutir las aplicaciones de tecnologías de bajo impacto ambiental en comunidades rurales se desprende de la relación tan estrecha que existe entre estas poblaciones y el medio en el cual se desarrollan. En la mayoría de los casos, existe un vínculo notable entre la salud ecosistémica, las interacciones sociales y la estabilidad económica de estas comunidades, siendo Yucatán un caso que cumple con esto. Incluso encontrándose por debajo de la media nacional en generación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) diarios, es el Estado de la península con el mayor volumen generado con 2016 t/día (SEMARNAT, 2020). Esta cifra le cuesta a Yucatán un total de \$645,358.00 MXN al día en infraestructura y logística para la recolección de estos residuos y, aun así se recolecta aproximadamente un 74% de los RSU generados, por lo que la revalorización de residuos, sobre todo los orgánicos, debe atenderse a la brevedad posible.

El estado de Yucatán sostiene varias problemáticas de índole ambiental, entre las que destacan el uso de madera y carbón vegetal como fuentes principales de obtención de energía calórica para cerca de un tercio de la población del Estado (Casares, 2019). El aprovechamiento de bovinos, cuinos y pollos (De Alba, 2020; SADER, 2020; Méndez et al., 2009), agricultura en grandes volúmenes y gestión de residuos.

Es pertinente referirse a casos de estudio exitosos llevados a cabo alrededor del mundo, como sustento para poder considerar el desarrollo de investigación y aplicación de biochar en estos rubros.

El objetivo general es elaborar una investigación de revisión teórica del potencial uso y aplicación del biochar a partir de residuos sólidos orgánicos y materia orgánica disponible en el entorno y el impacto en la población rural del Estado de Yucatán. En México existen estudios de bioseguridad (Flesch et al., 2019) donde se remarca la importancia de realizar estas pruebas con cada variación de biochar antes de ser implementada. A nivel estatal Rodríguez (2019) y Agroware (2016) establecieron la base documental para el uso de materia vegetal como materia prima.

II. METODOLOGÍA

La revisión extensiva de bibliografía sobre el aprovechamiento de residuos para la obtención de biochar, se realizó de forma que sea posible contrastar los resultados obtenidos por diferentes autores. Se recopiló información proveniente de diferentes fuentes y enfoques, logrando un acercamiento detallado del tema a tratar, para comprender las tendencias de estudio y aplicación actuales del biochar. De esta forma el analizar y sintetizar la información aceptada, permitió desarrollar supuestos e ideas que se pusieron a prueba con los datos recabados. Todo ello basado en los pilares de la investigación, los cuales son: Tecnología, medio ambiente, factor social y adecuación al entorno.

Para este estudio se recolectó información de bases de datos diversas, como Microsoft Academic, Dialnet, SciELO, BASE, RefSeek, World Wide Science, iSeeK, ELSEVIER, JSTOR, REDALYC y Web of Science. Además de productos de investigación como tesis. Se tomó en cuenta material selecto de redes sociales como YouTube y Facebook. La información recabada fue analizada en distintos métodos de organización, tales como cuadros comparativos, mapas conceptuales y cuadros de doble entrada. Mediante un análisis crítico de datos se determinaron las tendencias y la manera adecuada de implementar este tipo de técnica y material en un entorno estatal basado en características principales del tipo de biomasa elegida como disponibilidad, volumen, composición y manejabilidad.

III. RESULTADOS O AVANCES

Para esta investigación se consideró como una población rural a una comunidad de aproximadamente 500 habitantes, por lo que, basados en los resultados encontrados en los siguientes subtemas, se sustenta la proyección del impacto de la inclusión del biochar en comunidades rurales de Yucatán, mostrado en la Figura 1.

3.1 Usos y beneficios del biochar en comunidades rurales.

La Tabla 1 muestra parámetros clave para la producción de biochar acorde a propósitos que tendrían relevancia en un escenario rural. Servirá como referencia, pero no son datos absolutos ya que el desempeño del biochar producido estará influenciado por el tipo de materia orgánica utilizada. Debido al contenido de lignina o celulosa, así como a la humedad, tiempo de retención y otros parámetros relativos al medio de producción y las condiciones del sitio de estudio.

Tabla 1. Parámetros aceptables del biochar en función de su uso.

Uso destinado	pH	Área de superficie (m ² g ⁻¹)	Porosidad	Temperatura (°C)
Combustible sólido	4.5-6	200-600	0.12-0.4 cm ³ g ⁻¹	300 - 330
Tratamiento de aguas	4-7	1500	435 cm ³ g ⁻¹	>500 C.O. <500 C.I. ¹
Remediador de suelos	7 - 11	21-26	2.05 - 8 (µm)	500 - 600
Adsorción de metales	4-6	15.82	0.52 cm ³ g ⁻¹	400 - 600

C.O: Más adecuado para remoción de contaminantes orgánicos

C.I: Más adecuado para remoción de contaminantes inorgánicos

Fuente: Elaboración propia con datos de Ahmad et al., 2014; Batista et al., 2018; Enaime et al., 2020; Han et al., 2015; Jien et al., 2015; Luo et al., 2011; Waqas et al., 2018; Yadav et al., 2016; Zheng et al., 2017

3.2 Identificación del tipo de biomasa con las mejores características como materia prima

En la Tabla 2 se presenta el análisis de las posibles fuentes contempladas en esta revisión. Con el objetivo de determinar aquella materia prima que promete mejores resultados, basado en su desempeño en estudios anteriores. Se propone el uso de excretas como materia prima, al demostrar los volúmenes generados de forma diaria, principalmente obtenida de fuentes bovinas y porcícolas generando 13,350 y 9858 t/día respectivamente. La Tabla 3 presenta un análisis numérico sobre la posibilidad de reutilizar las excretas generadas en el Estado de Yucatán con un fin distinto al de ser fertilizante en los campos. Ya que la presencia de fosfatos, grasas, proteínas y fibras no digeridas posibilitan el diseñar un panorama de aprovechamiento.

Tabla 2.

Valores de la potencial materia prima para producción de biochar en Yucatán

Materia prima de obtención	Utilidad Diaria (t)	Humedad (%)	Poder calorífico (MJ kg ⁻¹)	Rendimiento %	C %	N %	P (g/kg)
Materia vegetal ¹	----	-----	23.54	44.06	51	2.98	5.55
Residuos orgánicos	72	35	23	34.7	40	2.62	26.6
Excretas**	25490	88	22.3	40.7	41	8.86	17.6

¹Tanto la disponibilidad como la humedad de la materia vegetal estarán en función del tipo de biomasa que se encuentre disponible en el punto específico de producción

**Se toma como valor de referencia la cifra obtenida en ganado bovino

Fuente: Elaboración propia con datos de Aragón-Briceño et al., 2021; Cao et al., 2016; Cárdenas-Aguilar et al., 2019; Hang et al., 2021; Linares-Lujan et al., 2017; Pérez-Bravo et al., 2017; Rafiq et al., 2016; Williams, 2015

Tabla 3.

Caracterización de las excretas generadas anualmente.

Excretas	Generación anual (t)	P (t)	Al (t)	Mg (t)	C (t)	Cenizas (t)
Ganado vacuno	4,872,750	43,026	47,290	40,444	2,002,700	877,095
Humanas*	44,472	1868	---	---	5337	---
Industria porcícola	3,598,170	51,184	8,527	47,495	1,511,231	171,827
Granjas avícolas	788,181	13,501	2,163	6,554	267,981	212,809

Se considera que el Al y Mg se encuentran en cantidades muy pequeñas, casi nulas*

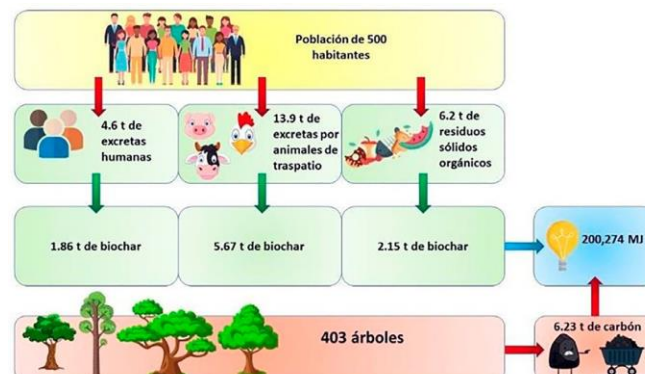
Fuente: Elaboración propia con datos de Aragón-Briceño et al., 2021; Rose et al., 2015; Vassilev et al., 2010.

3.3 Análisis del uso del biochar como agente de mitigación de la contaminación ambiental

La Figura 1 es una representación gráfica sobre la capacidad de producción y ahorro de energía que existe, una vez que se implementa la revalorización de residuos orgánicos en un esquema donde el biochar es una herramienta aplicada.

Figura 1.

Análisis del impacto de la inclusión del biochar como mitigador de la contaminación.



Fuente: Elaboración propia con datos de De la Concha et al., 2017; Del Real, 2018; Gutiérrez-Ruiz et al., 2012; Linares-Lujan et al., 2017; Méndez et al., 2009; SEMARNAT, 2020.

3.4 Recomendación para el diseño de un generador de biochar

Una vez seleccionado el biochar adecuado para las actividades a realizar o mejorar, es importante determinar el tipo de reactor adecuado para tal propósito. La Tabla 4 ofrece una perspectiva sobre diferentes aspectos a considerar para la selección del reactor.

Tabla 4.

Producción de biochar mediante diferentes reactores.

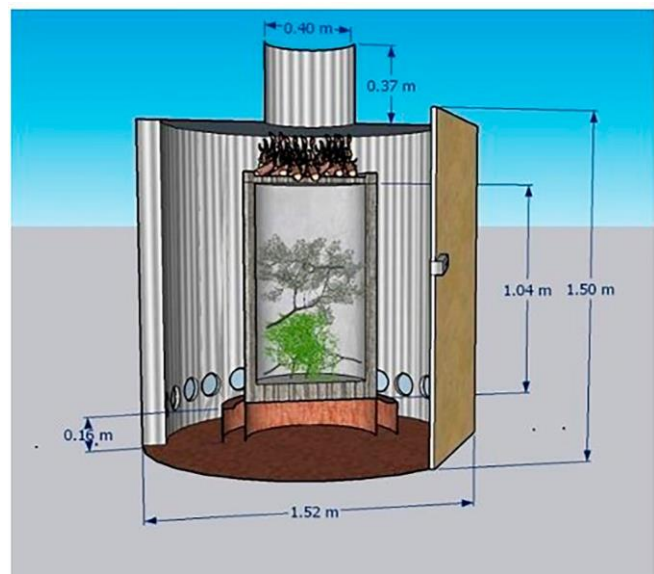
Modelo	Biomasa aplicada	Dimensiones	Tiempo de preparación (h)	Temperatura alcanzada (°C)	Producción (kg)	Energía generada (kWh)	Facilidad de uso
Horno de cortina	Restos de agricultura Residuos maderables	Ø= 2.4 m V = 2 m ³	3	680 – 750	500	3232	Requiere conocimientos técnicos, no es fácil de operar
Horno de retorta	Restos de agricultura Residuos maderables	V = 0.208 m ³ = 55 gal	2 - 4	400 – 730	9 – 18	58.17 – 116.35	No requiere conocimientos técnicos, fácil de operar
Horno de montículo	Restos de agricultura Residuos maderables	V = 1 m ³	36	200	0.56 – 1.2	3.62 – 7.75	No requiere conocimientos técnicos, fácil de operar
Producción artesanal (Bidón)	Excretas Residuos orgánicos	V= 200 L	2 - 6	700	4.9	30.35	Requiere de conocimientos técnicos, fácil de operar

Fuente: Elaboración propia con datos de Botnen et al., 2017; DW Español, 2017; Sparrevik et al., 2015; Yacob et al., 2018.

Realizando la comparación entre las distintas opciones, se define al horno de cortina como la opción con las mejores características debido a que el horno de montículo demanda una alta carga de esfuerzo físico para su instalación y la concentración de GEIs emitidos es la más alta de todas, mientras que el horno de retorta genera un 13% de CO₂ mayor que el horno de cortina y la producción mediante bidón genera apenas el 10% de material en comparación con la opción elegida. Sin embargo, en estudios previos analizados, no se contempla el uso de este tipo de reactor para la operación con excretas, no obstante, con un pretratamiento adecuado de deshidratación y neutralización, es posible realizar las adaptaciones correspondientes. En cuanto al análisis de costos para cada uno de los reactores expuestos, no hay información concreta en el contexto previsto, por lo que la atención se focaliza únicamente en el reactor tomado como la propuesta con mayor viabilidad. Aun así, los materiales requeridos para su ensamble son pocos y de fácil acceso, requiriendo únicamente un tambor de metal de 55 galones, un contenedor del mismo material, pero de menor volumen y una trampilla de metal a aproximadamente una décima parte de altura del sistema para filtrar los líquidos generados.

Figura 2.

Diseño de propuesta de reactor para la producción de biochar



Fuente: Elaboración propia con datos de Aprovecho Research Center, 2021; Cotton, 2021; Kearns, 2013.

IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Tomando el alcance proyectado en una comunidad de cerca de 500 habitantes y lo considerado en la información recabada, así como en el análisis realizado, se proyecta que para el caso de las comunidades rurales de Yucatán: Las excretas presentan el material con mayor volumen generado, por tanto deberá ser considerada como la fuente principal de obtención. En cuanto a la materia vegetal, las especies *L. yucatanensis* y *H. albicans* suponen una fuente de obtención viable. Aunado a los RSO aprovechados, se generarían 9.68 t mensuales de biochar. El uso de biochar en Yucatán mejoraría la calidad de vida de la población rural y reduciría los niveles de contaminación actuales al actuar como combustible sólido (poder calorífico hasta 21% mayor al carbón vegetal), remediador de suelos (adsorción de metales de hasta un 87%), abono (mejora de cosechas cerca de un 22%) y/o producto mercantil. El modelo de reactor con mayor adaptabilidad a las condiciones presentes en Yucatán es el que se muestra en la Figura 2, representando una inversión única de \$2900.00 MXN, esto debido a que los insumos requeridos para el funcionamiento y mantenimiento de la unidad son mínimos, la materia prima utilizada corresponde a residuos de diferentes actividades sin valor monetario alguno.

Se predice que los potenciales beneficios mensuales de la inclusión del biochar para un escenario propuesto de una comunidad de aproximadamente 500 pobladores son: Reducción en la acumulación de RSO hasta en un 42%, Generación de energía equivalente a 6.23 t de carbón, Prevención de la tala mensual de 403 árboles, Reducción de daños a la salud, Activación de la economía y Desarrollo tecnológico.

El manejo de este trabajo bajo la condicionante global detonada debido al COVID-19, trajo retos para su realización como la obligatoriedad de obtener información mediante fuentes digitales, omitiendo entrevistas o consultas presenciales, así como fuentes físicas de información. Además de una reducción de las horas efectivas de trabajo producto de la incertidumbre sobre una nueva realidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agroware. (2016). Agricultura en Yucatán México . <https://sistemaagricola.com.mx/blog/4-cultivos-con-alta-rentabilidad-en-yucatan/>
- Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., Vithanage, M., Lee, S. S., & Ok, Y. S. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*, 99, 19–33. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2013.10.071>
- Aprovecho Research Center. (2021). Natural Draft Mixing in the Kirk Harris TLUD | Aprovecho. <http://aprovecho.org/cleaner-burning-technologies/natural-draft-mixing-in-the-kirk-harris-tlud/>
- Aragón-Briceño, C. I., Pozarlik, A. K., Bramer, E. A., Niedzwiecki, L., Pawlak-Kruczek, H., & Brem, G. (2021). Hydrothermal carbonization of wet biomass from nitrogen and phosphorus approach: A review. *Renewable Energy*, 171, 401–415. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2021.02.109>
- Batista, E. M. C. C., Shultz, J., Matos, T. T. S., Fornari, M. R., Ferreira, T. M., Szpoganicz, B., de Freitas, R. A., & Mangrich, A. S. (2018). Effect of surface and porosity of biochar on water holding capacity aiming indirectly at preservation of the Amazon biome. *Scientific Reports* 2018 8:1, 8(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28794-z>
- Botnen, A., Sparrevik, M., Schmidt, H., & Cornelissen, G. (2017). Life-cycle assessment of biochar production systems in tropical rural areas: Comparing flame curtain kilns to other production methods. *Biomass and Bioenergy*, 101, 35–43. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2017.04.001>
- Cao, H., Xin, Y., & Yuan, Q. (2016). Prediction of biochar yield from cattle manure pyrolysis via least squares support vector machine intelligent approach. *Bioresource Technology*, 202, 158–164. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2015.12.024>
- Cárdenas-Aguiar, E., Gascó, G., Paz-Ferreiro, J., & Méndez, A. (2019). Thermogravimetric analysis and carbon stability of chars produced from slow pyrolysis and hydrothermal carbonization of manure waste. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 140, 434–443. <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2019.04.026>
- Casares, H. (2019, December 23). Una tercera parte de los yucatecos cocina aún con leña o carbón. <https://www.yucatan.com.mx/merida/una-tercera-parte-de-los-yucatecos-cocina-aun-con-lena-o-carbon>
- Cotton, F. (2021). Biochar Retort Design | Proyectos ecologicos, Proyectos. <https://www.pinterest.at/pin/259519997250894394/>
- De Alba, J. (2020, November 11). Granjas de cerdos para alimentar a China invaden la Península de Yucatán - Pie de Página. <https://piedepagina.mx/granjas-de-cerdos-para-alimentar-a-china-invaden-la-peninsula-de-yucatan/>
- De la Concha, H., Roche, L., & García, A. (2017). Inventario del Arbolado Urbano de la Ciudad de Mérida.

- Del Real, J. (2018, February 20). ¿Cuánta basura generas al año? - ExpokNews. <https://www.expoknews.com/cuanta-basura-generas-al-ano/>
- DW Español. (2017, November 29). Residuos fecales para producir carbón - YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=vW2EfDmQx_E
- Enaime, G., Baçaoui, A., Yaacoubi, A., & Lübken, M. (2020). Biochar for Wastewater Treatment—Conversion Technologies and Applications. *Applied Sciences* 2020, Vol. 10, Page 3492, 10(10), 3492. <https://doi.org/10.3390/APP10103492>
- Eseri, N., & Muwaya, S. (2020). Biochar Production and Field Application “A” Multiple-win success story for farmers in Uganda.
- Flesch, F., Berger, P., Robles-Vargas, D., Santos-Medrano, G. E., & Rico-Martínez, R. (2019). Characterization and Determination of the Toxicological Risk of Biochar Using Invertebrate Toxicity Tests in the State of Aguascalientes, México. *Applied Sciences* 2019, Vol. 9, Page 1706, 9(8), 1706. <https://doi.org/10.3390/APP9081706>
- Gutiérrez-Ruiz, E., Aranda-Crerol, F., Rodríguez-Vivas, R., Bolio-González, M., Ramírez-González, S., & Estrella-Tec, J. (2012). Factores sociales de la crianza de animales de traspatio en Yucatán, México. *Bioagrobiología*, 5(1), 20–28. https://nanopdf.com/download/factores-sociales-de-la-crianza-de-animales-de-traspatio-en-yucatan_pdf#
- Hagemann, N., Spokas, K., Schmidt, H.-P., Kägi, R., Böhler, M. A., & Bucheli, T. D. (2018). Activated Carbon, Biochar and Charcoal: Linkages and Synergies across Pyrogenic Carbon's ABCs. *Water* 2018, Vol. 10, Page 182, 10(2), 182. <https://doi.org/10.3390/W10020182>
- Han, X., Chu, L., Liu, S., Chen, T., Ding, C., Yan, J., Cui, L., & Quan, G. (2015). Removal of methylene blue from aqueous solution using porous biochar obtained by KOH activation of peanut shell biochar. *BioResources*, 10(2), 2836–2849. <https://doi.org/10.15376/BIORES.10.2.2836-2849>
- Hang, J., Haoxi, B., & Fengze, W. (2021). Effect of biochar prepared from food waste through different thermal treatment processes on crop growth. *Processes*, 9(2), 1–21. <https://doi.org/10.3390/PR9020276>
- Jien, S.-H., Wang, C.-C., Lee, C.-H., & Lee, T.-Y. (2015). Stabilization of Organic Matter by Biochar Application in Compost-amended Soils with Contrasting pH Values and Textures. *Sustainability* 2015, Vol. 7, Pages 13317–13333, 7(10), 13317–13333. <https://doi.org/10.3390/SU71013317>
- Kearns, J. (2013). Water Filter Biochar Generation System | Farm Hack. <https://farmhack.org/tools/water-filter-biochar-generation-system>
- Linares-Lujan, G. A., Echeverría-Pérez, C., Cespedes-Aguilar, T., Linares-Lujan, G. A., Echeverría-Pérez, C., & Cespedes-Aguilar, T. (2017). Potencial energético de la zona rural del Departamento de La Libertad (Perú) producido por biogás obtenido de excretas humanas. *Revista Tecnología En Marcha*, 30(4), 108–117. <https://doi.org/10.18845/TM.V30I4.3415>
- Luo, Y., Durenkamp, M., De Nobili, M., Lin, Q., & Brookes, P. C. (2011). Short term soil priming effects and the mineralisation of biochar following its incorporation to soils of different pH. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(11), 2304–2314. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2011.07.020>
- Martos, S., Mattana, S., Ribas, A., Albanell, E., & Domene, X. (2020). Biochar application as a win-win strategy to mitigate soil nitrate pollution without compromising crop yields: a case study in a Mediterranean calcareous soil. *Journal of Soils and Sediments*, 20(1), 220–233. <https://doi.org/10.1007/S11368-019-02400-9>
- Méndez, R., Castillo, E., Vázquez, E., Briceño, O., Coronado, O., Pat, V., & Garrido, P. (2009). Estimación del potencial contaminante de las granjas porcinas y avícolas del estado de Yucatán. *Ingeniería*, 13(2), 13–21.
- Pérez-Bravo, S., Bautista-Vargas, M., Hernández-Sánchez, A., & Enriquez-Padilla, J. (2017). Evaluación del potencial de generación de estiércol como materia prima para la producción de biogás en la Zona Altamira, Tamaulipas. *Artículo Revista de Sistemas Experimentales* Marzo, 4(10), 34–40. www.ecorfan.org/bolivia
- Rafiq, M. K., Bachmann, R. T., Rafiq, M. T., Shang, Z., Joseph, S., & Long, R. (2016). Influence of Pyrolysis Temperature on Physico-Chemical Properties of Corn Stover (Zea mays L.) Biochar and Feasibility for Carbon Capture and Energy Balance. *PLOS ONE*, 11(6), e0156894. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0156894>
- Ralebitso-Senior, T. K., & Orr, C. H. (2016). Microbial Ecology Analysis of Biochar-Augmented Soils: Setting the Scene. *Biochar Application: Essential Soil Microbial Ecology*, 1–40. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803433-0.00001-1>
- Rodríguez, S., & Canche, G. (2019). Aprovechamiento de biomasa leñosa de medio rural del estado de Yucatán mediante un proceso de gasificación para producción de energía eléctrica [Centro de Investigación Científica de Yucatán]. <https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1003/1586>
- Rose, C., Parker, A., Jefferson, B., & Cartmell, E. (2015). The Characterization of Feces and Urine: A Review of the Literature to Inform Advanced Treatment Technology. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45(17), 1827. <https://doi.org/10.1080/10643389.2014.1000761>
- SADER. (2020, March 6). Actividad ganadera en el estado de Yucatán. <https://www.gob.mx/agricultura/yucatan/articulos/dia-nacional-de-la-ganaderia-actividad-del-sector-primario-que-nos-garantiza-alimento?idiom=es>
- SEMARNAT. (2020). Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos 2020. *Lucart Estudio*. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/554385/DBGIR-15-mayo-2020.pdf>

- Sparrevik, M., Cornelissen, G., Sparrevik, M., Adam, C., Martinsen, V., Cornelissen, G., & Cornelissen, G. (2015). Emissions of gases and particles from charcoal/biochar production in rural areas using medium-sized traditional and improved “retort” kilns. *Biomass and Bioenergy*, *72*, 65–73. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2014.11.016>
- Sparrevik, M., Lindhjem, H., Andria, V., Fet, A. M., & Cornelissen, G. (2014). Environmental and Socioeconomic Impacts of Utilizing Waste for Biochar in Rural Areas in Indonesia—A Systems Perspective. *Environmental Science and Technology*, *48*(9), 4664–4671. <https://doi.org/10.1021/ES405190Q>
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, *89*(5), 913–933. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2009.10.022>
- Waqas, M., Aburizaiza, A. S., Miandad, R., Rehan, M., Barakat, M. A., & Nizami, A. S. (2018). Development of biochar as fuel and catalyst in energy recovery technologies. *Journal of Cleaner Production*, *188*, 477–488. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.04.0177>
- Williams, C. (2015). Gestión de residuos de aves de corral en los países en desarrollo. *Revisión Del Desarrollo Avícola*, 53–54. <http://www.fao.org/3/al716s/al716s00.pdf>
- Wu, P., Ata-Ul-Karim, S. T., Singh, B. P., Wang, H., Wu, T., Liu, C., Fang, G., Zhou, D., Wang, Y., & Chen, W. (2019). A scientometric review of biochar research in the past 20 years (1998–2018). *Biochar* 2019 1:1, 1(1), 23–43. <https://doi.org/10.1007/S42773-019-00002-9>
- Yacob, T. W., (Chip) Fisher, R., Linden, K. G., & Weimer, A. W. (2018). Pyrolysis of human feces: Gas yield analysis and kinetic modeling. *Waste Management*, *79*, 214–222. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2018.07.020>
- Yadav, A., Ansari, K. B., Simha, P., Gaikar, V. G., & Pandit, A. B. (2016). Vacuum pyrolysed biochar for soil amendment. *Resource-Efficient Technologies*, *2*, S177–S185. <https://doi.org/10.1016/J.REFFIT.2016.11.004>
- Zheng, H., Guo, W., Li, S., Chen, Y., Wu, Q., Feng, X., Yin, R., Ho, S. H., Ren, N., & Chang, J. S. (2017). Adsorption of p-nitrophenols (PNP) on microalgal biochar: Analysis of high adsorption capacity and mechanism. *Bioresource Technology*, *244*, 1456–1464. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2017.05.025>

