



Diseño, costos y suministro de la cadena de rastrojo de maíz para etanol celulósico en México

LUIS A. BECERRA-PÉREZ ^{1,*}, MIGUEL Á. GASTÉLUM-DELGADO ², JOHN A. POSADA-DUQUE ³

¹ Facultad de Ciencias Económicas y Sociales, Universidad Autónoma de Sinaloa. Blvd. Universitarios y Av. de las Américas, Unidad 3 s/n, Ciudad Universitaria, Culiacán, Sinaloa, 80010, México.

² Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Sinaloa. Km 17.5, Carretera Culiacán-Eldorado s/n, Culiacán, Sinaloa, 80000, México.

³ Department of Biotechnology, Section Biotechnology and Society, Delft University of Technology. Van der Maasweg 9, 2629 HZ Delft, NL.

* Autor de Correspondencia: Luis A. Becerra-Pérez (e-mail: becerra@uas.edu.mx).

Se agradece el apoyo financiero al Fondo Sectorial Conacyt-Sener-Sustentabilidad Energética y a la Universidad Autónoma de Sinaloa (México) a través del proyecto 259930. Estos resultados son parte del proyecto posdoctoral "Cellulosic ethanol: economic analysis of alternative technologies for Mexico".

RESUMEN El mercado de residuos agrícolas en México está desintegrado y funciona de manera ineficiente en términos económicos. El aumento en los rendimientos de la agricultura de riego de las últimas décadas trajo aparejado una adición en los volúmenes de residuos producidos, los cuales están siendo desaprovechados. Aparte del *tradeoff* tradicional entre alimento animal e incorporación al suelo para controlar su calidad, pocas alternativas se han explorado en México para utilizar ese exceso de recursos, conduciendo al productor a deshacerse del mismo, ya sea incinerándolo *in situ* o, en el mejor de los casos, incorporándolo al suelo, lo que incrementa los costos económicos e impactos ambientales. Además, el efecto combinado de la forma tan dispersa como queda el rastrojo sobre el suelo después de extraer el producto y su baja intensidad energética, implica múltiples problemas logísticos para su cosecha, transporte y almacenaje. Por otra parte, la producción de etanol celulósico requiere del suministro confiable de residuos agrícolas suficientes y oportunos para garantizar la viabilidad económica de una biorefinería, por lo que es necesario desarrollar un mercado eficiente de este tipo de insumos. Aplicando la metodología de cadenas productivas y el análisis costo-beneficio, este artículo diseña la cadena de cosecha de rastrojo de maíz, para definir la logística de cada uno de sus eslabones y estima los costos de producción de la misma. Se obtiene el precio mínimo de venta del rastrojo de maíz (MCSSP, por sus siglas en inglés "minimum corn stover selling price") del comercializador de biomasa, que a su vez es la base para determinar el precio de compra por parte de la planta de etanol celulósico. Este artículo contribuye a la formación de un precio de mercado más transparente para

residuos agrícolas y a generar una mayor certidumbre en sus precios de compra-venta.

PALABRAS CLAVE: Residuos agrícolas; Etanol celulósico; Precio mínimo de venta de rastrojo de maíz.

ABSTRACT The Mexican market for agricultural residues is disaggregated, making it inefficient in economic terms. In the last decades, irrigated agriculture has led to both increased yields and, consequently, to additional volumes of residues being produced, which are wasted. Apart from their traditional tradeoff applications as animal feed or as materials to control soil quality, few alternatives have been explored in Mexico for their use; hence producers have been disposing of such residues by in-situ incineration or, at best, through their incorporation into the soil which increases economic costs and environmental impacts. Furthermore, the combined effect of disperse agricultural residues (after harvesting) and their low energy intensity results in multiple logistical challenges for their collection, transport and storage. On the other hand, the production of cellulosic ethanol requires a reliable supply of sufficient and timely agricultural wastes to secure the economic viability of a biorefinery, thus it is necessary to develop an efficient market for this type of resources. This article presents the design of a collection chain for corn stover through the application of the production chains methodology and the cost-benefit analysis, to both outline the required logistics of each step and estimate the collection costs. Hence, the minimum corn stover selling price (MCSSP) is obtained from the biomass trader, which in turn is the basis for determining the purchase price for the





cellulosic ethanol plant. This paper aims to contribute to the development of a more transparent market price for agricultural residues and also to help to gain a greater certainty in their purchase and sale prices.

KEYWORDS: Agricultural residues; Cellulosic ethanol; Minimum corn stover selling price.

1. INTRODUCCIÓN

La biomasa es el recurso renovable más abundante sobre la tierra y desde tiempos muy antiguos es usado como fuente de energía. El fuego, aunque descubierto desde inicios de la civilización, solo causó una verdadera revolución hasta que el hombre fue capaz de transformar la energía química contenida en la biomasa en calor y luz [1]. La historia de la humanidad está ligada a la energía y en la medida que la sociedad requería una mayor producción de bienes y servicios se fue transitando hacia nuevas fuentes energéticas, algunas veces por eficiencia y otras por disposición del recurso. Así, de la energía básica almacenada en la biomasa se pasó a la hidráulica, posteriormente al carbón (siglo XIX), petróleo y gas natural (siglo XX), incorporando en la década de 1950 la energía nuclear [2].

La siguiente gran transición energética (siglo XXI), tiene que ver con las energías renovables por dos razones fundamentales: el previsible agotamiento de las reservas de petróleo y el cambio climático global. Existe suficiente evidencia empírica de la vinculación entre consumo de energía fósil y los impactos ambientales, de tal forma que necesariamente el mundo tendrá que migrar a una matriz energética que sea económica, ambiental y socialmente viable. En ese contexto, las energías renovables en general y, la energía de la biomasa en particular, vuelve al escenario central, pero esta vez en una situación tecnológica y de desarrollo económico muy distinta.

Aunque existen diferentes clasificaciones de biomasa lignocelulósica (biocombustibles de segunda generación), para fines energéticos se puede dividir, por su origen, en primaria, secundaria y terciaria. La primaria, es la biomasa producida mediante el proceso de fotosíntesis, la cual incluye árboles, cultivos energéticos y residuos agrícolas y forestales; la biomasa secundaria son residuos agroindustriales (aserrín, bagazo de caña de azúcar, residuos de la industria tequilera, del café, del papel, etc.) y residuos de tratamientos biológicos (estiércol de origen animal, etc.); mientras la biomasa terciaria son residuos posconsumo, principalmente grasas animales, aceites vegetales usados y residuos urbanos y de la

construcción [3, 4]. En la biomasa terciaria, aunque no es propiamente un residuo, se incluyen también las algas como materia prima para biocombustibles de tercera generación.

Centrando nuestra atención en el tipo de biomasa primaria, específicamente la que es posible producir en tierras agrícolas y potencialmente convertir a etanol de segunda generación, ésta se clasifica en cultivos energéticos y residuos agrícolas [5]. La primera (cultivos energéticos), agrupa los cultivos herbáceos (miscanthus, caña energética, switchgrass, sorgo dulce, etc.) y leñosos (sauce, eucalipto, álamo, pino, etc.); mientras la segunda (residuos agrícolas), agrupa a todos los rastrojos/paja de los cultivos agrícolas (ver figura 1).

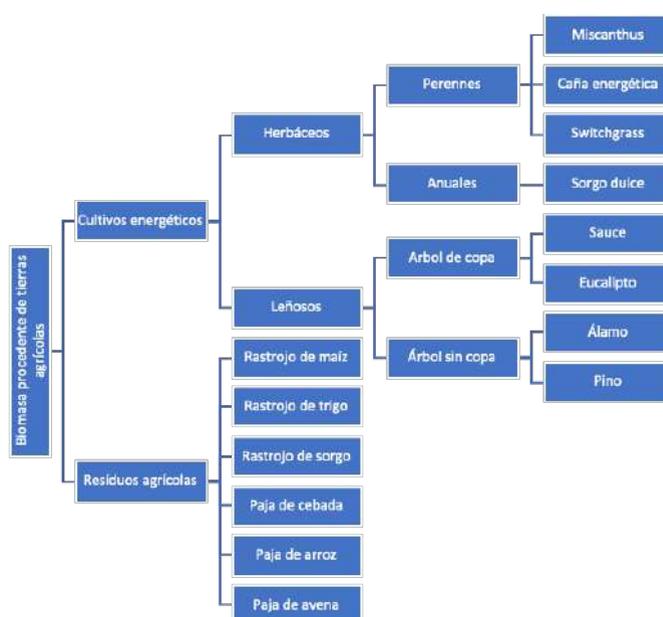


FIGURA 1. Clasificación de biomasa procedente de tierras agrícolas como insumo para etanol celulósico.

Fuente: adaptado de [5].

Respecto a los residuos agrícolas, existen diferentes estimaciones sobre su cantidad y disposición, dependiendo del método que se utilice de conteo y de los parámetros para su cálculo que incluyen: los rendimientos del cultivo, la logística de cosecha y el porcentaje de la disposición a vender por parte del agricultor. Por ejemplo, la referencia [6] estima residuos agrícolas globales de 3,700 millones de ton/año, de las cuales aproximadamente tres cuartas partes corresponden a maíz, arroz y trigo; mientras la referencia [7] estima 5,000 millones de ton/año, indicando que el mayor productor de residuos agrícolas es Asia (47%), seguido de América (29%), Europa (16%), África (6%) y Oceanía (2%).

Por volumen, los residuos agrícolas con mayor potencial para etanol celulósico son maíz, arroz, trigo y caña de azúcar [6].





Se estima que a nivel global al menos 1,000 millones de toneladas de residuos de maíz y 563 millones de residuos de caña de azúcar son generados cada año [7] de los cuales más del 50% son producidos en el Continente Americano.

En el caso de México, no obstante que existen varias estimaciones sobre el volumen de residuos agrícolas [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17], todas discordantes entre sí, subsiste una escasez de información precisa sobre varios aspectos, incluyendo su ubicación geográfica, la logística de cosecha, los costos de producción y su real disposición.

Este estudio tiene como objetivo diseñar la cadena de rastrojo de maíz, mediante la estructuración y costeo de cada uno de sus eslabones, investigando directamente en campo la logística de cosecha y comercialización, estimando el precio mínimo de venta del rastrojo de maíz (MCSSP, por sus siglas en inglés “*minimum corn stover selling price*”) del comercializador mayorista de biomasa, que a la vez es la base para determinar el precio de compra del rastrojo por parte de la planta de etanol celulósico. Lo anterior, contribuye a la formación de precio de mercado y genera mayor certidumbre en la compra-venta de residuos agrícolas, dado que es una información que no existe o es muy escasa.

2. MARCO TEÓRICO

Partiendo de uno de los principios fundamentales de la economía, que establece que todos los recursos son escasos, los residuos agrícolas no son la excepción por lo que se debe evaluar el mejor uso alternativo de los mismos. Luego entonces, este tipo de residuos tiene “*tradeoffs*” dado que, aparte de poder ser convertido a etanol celulósico, tradicionalmente es utilizado en alimentación animal, o para generación eléctrica y/o calor en algunas industrias (caña de azúcar, pan, ladrillo, etc.), así como para su incorporación al subsuelo con fines de nutrición y evitar la erosión de la tierra. La importancia de cada uno de los usos alternativos depende del tipo de biomasa, densidad energética del residuo, concentración geográfica, costos de cosecha, marco legal (prohibición de incineración de biomasa), políticas institucionales y, en general, de la existencia de un mercado eficiente que permita la comercialización de los residuos agrícolas en un esquema de libre oferta y demanda.

Con el objetivo de explicar mejor los *tradeoffs* de los residuos agrícolas [18, 19, 20, 21, 22], presentamos a continuación un análisis económico que permite entender el costo de oportunidad de los residuos, siguiendo la lógica teórica de la referencia [23]. Para esto se asume que solo existen dos usos alternativos de la biomasa, utilizarla como alimento animal o como insumo de etanol celulósico.

En la figura 2 se representa en el eje de las ordenadas la utilidad que proporciona el rastrojo al usarlo como alimento animal (A), mientras que en el eje de las abscisas se muestra la utilidad de usarlo como insumo para etanol celulósico (E). En la figura se representan tres posibles escenarios (A, B y C), y se asume que la calidad de los residuos no cambia en el tiempo, al menos en el corto plazo.

En la figura 2, panel (a), curva convexa al origen, se representa el escenario A, el cual suponemos se desenvuelve en un ambiente de alta competencia por los residuos agrícolas, lo que implica la existencia de tasas de intercambio distintas, dependiendo del punto que se desee analizar. Por ejemplo, en el punto $A_{3,1}$ el rastrojo representa una alta utilidad como alimento animal y una baja utilidad como insumo de etanol celulósico, semejante a una región ganadera donde se valora más esta actividad primaria; contrariamente el punto $A_{1,3}$ representa una baja utilidad para alimento animal y una alta valoración del residuo para etanol, semejante a una región más industrializada y/o con baja actividad ganadera. Nótese que si partimos del punto $A_{3,1}$ y el objetivo es producir una cierta cantidad de etanol (por ejemplo E_2), se tiene que estar dispuesto a reducir el residuo que se destina para alimento animal en una cantidad de $(A_3 - A_2)$ y aumentar el residuo que se destina para etanol en una cantidad de $(E_2 - E_1)$, lo que implica una tasa de intercambio de $-(\Delta A/\Delta E)$ entre los dos usos alternativos del rastrojo.

En la figura 2, panel (a), curva lineal, se representa el escenario B, el cual supone unas condiciones de perfecta sustitución del rastrojo entre los dos usos alternativos. Digamos que el *tradeoff* es equivalente desde el punto de vista de la utilidad económica que genera la biomasa. Por ejemplo, si partimos del punto $B_{3,2}$ en el cual el consumo de residuos agrícolas como alimento animal produce la utilidad A_3 , y el objetivo es producir una cierta cantidad de etanol (E_3), tendremos que sacrificar rastrojo como alimento animal en una cantidad de $(A_3 - A_2)$ y aumentar rastrojo para uso etanol en una cantidad de $(E_3 - E_2)$, lo que implica un volumen de la misma cuantía, expresado en una tasa de intercambio de $-(A_3 - A_2) / (E_3 - E_2) = -1$ (perfecta sustitución).

En la figura 2, panel (a), curva cóncava al origen, se representa el escenario C, el cual caracteriza unas condiciones de complementariedad económica entre los dos usos alternativos del residuo agrícola. Podría pensarse en puntos de consumo por debajo del nivel óptimo, tanto para alimento animal como para etanol celulósico; o bien, en puntos donde existe un exceso de consumo en uno de los usos, de tal forma que, al reducir el consumo en dicho uso, se incrementa más que proporcional la utilidad en el uso alternativo. Por ejemplo, transitar del punto $C_{4,2}$ al $C_{3,3}$ implica reducir la utilidad del rastrojo destinado a alimento animal en la cantidad de $(A_4 -$





A_3) y aumentar la utilidad del rastrojo destinado a etanol en la cantidad de ($E_3 - E_2$), siendo evidentemente mayor la utilidad ganada en etanol celulósico (E) que la utilidad perdida en alimento animal (A), con lo cual existe un beneficio económico neto para la sociedad.

La figura 2, panel (b), muestra las rutas alternativas que se pueden seguir si la región se encuentra en un escenario como A (curva convexa al origen) y en un punto como $A_{t,t}$ desde el cual se desea avanzar hacia un punto óptimo (escenario C, punto $C_{t+1,t+1}$). Una posibilidad es transitar por la ruta R_1 , pasando primero por el escenario B y el punto $B_{t,t+1}$, para luego dirigirse al punto óptimo. Otra posibilidad es moverse por la ruta R_2 , pasando primero por el escenario B y el punto $B_{t+1,t}$ para luego avanzar hacia el punto óptimo. Desde luego, la sociedad, a través de la suma de decisiones individuales de los agentes económicos, puede moverse por “n” cantidad de rutas, técnicamente demarcadas por el área del rectángulo central de la figura 2, panel (b).

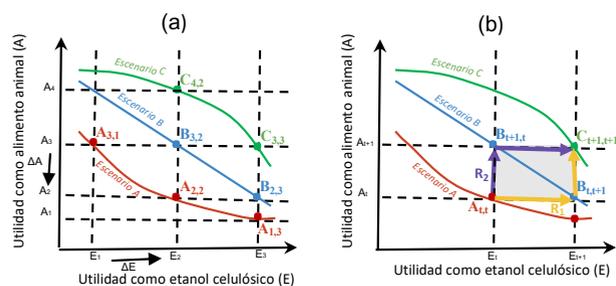


FIGURA 2. Panel (a), *tradeoffs* de los residuos agrícolas entre utilidad como alimento animal y utilidad como etanol celulósico con tres posibles escenarios (A, B y C). Panel (b), *tradeoffs* de los residuos agrícolas en el escenario A (punto $A_{t,t}$) y rutas alternativas (R_1 y R_2) para pasar al punto óptimo ($C_{t+1,t+1}$).

Fuente: adaptado de [23].

Hasta la fecha, el mayor uso de los rastrojos agrícolas en México (sin incluir los residuos agroindustriales) es para alimento animal [10, 11], además también son escasamente usados para calefacción y como combustible en algunas industrias artesanales, sobre todo en el centro del país. En el caso de alimento animal, se ha encontrado que aproximadamente entre el 15% y 25% tiene ese destino [10], mientras que el resto es simplemente dejado en el campo para su posterior incorporación al suelo o bien es incinerado *in situ* con las negativas consecuencias ambientales que ello implica. En general, el destino que tienen los residuos agrícolas depende en gran medida de las prácticas del agricultor, de las

labores culturales de la región, del tipo de agricultura (riego o temporal), de la técnica de cultivo utilizada (labranza de conservación o sistema tradicional), de si el agricultor tiene ganado, de la existencia de un mercado de residuos agrícolas, entre otras.

Al respecto, la referencia [10] estimó para la región central de México que los productores de maíz-grano, sorgo-grano, trigo y cebada dejan más del 50% de los residuos sobre el lugar de cultivo, usando solo un 24% para alimento animal, mientras un 20% es incinerado. En la investigación de campo que se llevó a cabo para este artículo, se encontró que solo el 15% en promedio de los residuos de maíz en el estado de Sinaloa (agricultura de riego) son destinados para alimento animal, el 7% es incinerado y más del 60% es dejado sobre el suelo cultivado.

Asumiendo que en México el uso principal de los rastrojos es alimento animal, e incluyendo solo cultivos forrajeros y residuos de maíz, se estima un promedio de 1.6 unidades de forraje por cabeza de ganado, lo que significa que quedan residuos agrícolas sobre el suelo mexicano que pueden ser utilizados para bioenergía sin comprometer la alimentación animal [10, 14].

Desde una perspectiva puramente económica, la maximización de la utilidad de los residuos agrícolas depende de las preferencias del agricultor (propietario de la biomasa), del costo-beneficio de la cosecha del rastrojo, de los riesgos percibidos por los rendimientos agrícolas futuros, de las limitaciones impuestas por factores endógenos (capital, maquinaria, logística de cosecha, etc.) y exógenos (precios) [23].

3. METODOLOGÍA

México cuenta con una frontera agrícola de 24.6 millones de ha (hectáreas), de las cuales en el año agrícola 2020 sembró un total de 21.68 millones de ha, 72% en sistema temporal y 28% en sistema de riego [24]. Los 10 principales cultivos que representan el 80% de la superficie total sembrada son: maíz-grano (34%), pastos y praderas (13%), frijol (8%), sorgo-grano (7%), caña de azúcar (4%), café cereza (3%), avena forrajera (3%), maíz forrajero (3%), trigo-grano (3%) y naranja (2%) [25]. De los cultivos anteriores, los más atractivos para etanol celulósico por volumen y características de sus residuos son: maíz-grano, sorgo-grano, caña de azúcar y trigo grano, sobresaliendo el primero con una superficie sembrada que superó los 7.4 millones de ha.

Evaluar la disposición de los residuos agrícolas en México con fines de biocombustibles implica adentrarse en su ubicación geográfica y en la determinación del volumen disponible neto





que garantice un abasto suficiente y oportuno en el radio de influencia de una planta de etanol (aproximadamente 80 Km). En ese sentido, primero determinamos las regiones agrícolas de México con mayor potencial aplicando los tres criterios siguientes:

- Excluir la superficie agrícola de temporal, dada su alta dependencia de las condiciones climáticas, lo que genera incertidumbre respecto a la producción de rastrojo; además, gran parte de ese tipo de agricultura es de autoconsumo, o bien, el agricultor también realiza actividades ganaderas, lo que hace muy improbable que decida vender sus residuos agrícolas.
- Incluir solo los estados del país con una superficie sembrada de riego promedio (2016-2020) mayor a 100 mil ha.
- Que el conjunto de las regiones seleccionadas representara, al menos, el 80% de la superficie total sembrada de riego en México.

El resultado de lo anterior se muestra en la tabla 1. Se definieron 12 regiones agrícolas de México, las cuales representan el 83% de la superficie sembrada de riego y el 66% del PIB primario. Nótese dos cosas: 1) las tres primeras regiones (Sinaloa, Sonora y Guanajuato) constituyen más del 40% de la superficie sembrada de riego, por lo que seguramente concentran el mayor volumen de residuos agrícolas; 2) en ocho de las 12 regiones agrícolas determinadas, el cultivo predominante es el maíz-grano.

TABLA 1. Estados agrícolas de México, según superficie sembrada (riego) y PIB primario

Rank	Estado	Area promedio 2016-2020 (ha)	Participación nacional (%)	PIB primario (participación nacional, 2019)	Principales cultivos
1	Sinaloa	853,476	20.1%	8.0%	maíz grano (65%), frijol (10%)
2	Sonora	479,912	11.3%	6.3%	trigo grano (53%), maíz grano (12%)
3	Guanajuato	431,902	10.2%	4.6%	maíz grano (31%), sorgo grano (21%)
4	Chihuahua	364,679	8.6%	6.5%	maíz grano (36%), algodón hueso (29%)
5	Tamaulipas	341,470	8.0%	2.4%	sorgo grano (63%), maíz grano (28%)
6	Michoacán	255,827	6.0%	10.4%	maíz grano (50%), trigo grano (17%)
7	Jalisco	168,604	4.0%	13.3%	maíz forrajero (27%), maíz grano (25%)
8	Zacatecas	135,233	3.2%	2.2%	maíz grano (22%), chile seco (21%)
9	Durango	127,523	3.0%	3.0%	maíz forrajero (34%), maíz grano (23%)
10	Puebla	127,404	3.0%	3.5%	maíz grano (36%), elote (13%)
11	México	124,149	2.9%	3.1%	maíz grano (63%), avena forrajera (13%)
12	B.C.	121,135	2.9%	2.8%	trigo grano (38%), algodón hueso (19%)
13	Resto	717,497	16.9%	34%	
	Total	4,248,810	100.0%	100%	

Fuente: elaboración propia con datos de [25 y 26].

Luego de definir que el maíz-grano es el cultivo principal en las regiones agrícolas de México, se procedió a determinar su ubicación geográfica. La tabla 2 presenta los 6 estados que

concentran el 80% del cultivo, observándose que solo una región (Sinaloa) participa con el 46% de la superficie sembrada total de maíz-grano (riego), con una producción superior a 6 millones de toneladas anualmente.

Lo precedente muestra que, de iniciar la producción de etanol celulósico en México, el rastrojo de maíz-grano es una buena opción y el estado de Sinaloa es la ubicación más adecuada por disponer en cantidad suficiente de este tipo de biomasa. Otros estudios también han encontrado que Sinaloa es el estado más idónea para establecer posibles plantas etanol a partir del rastrojo de maíz [16, 17].

En este sentido, la referencia [14] estima que el volumen disponible neto de rastrojo de maíz en Sinaloa como insumo para etanol celulósico es de 1.3 millones de toneladas/año, ubicando dos zonas altamente productoras: a) Valle de Culiacán-Navolato y b) Valle de Guasave-Los Mochis. Según estas estimaciones, el volumen de rastrojo de maíz en esas zonas es suficiente para producir 88.7 millones de galones/año de etanol proyectando la posibilidad de establecer dos biorefinerías (una en cada zona), lo que abastecería, al menos, el 20% de la demanda potencial de etanol en México. Por su parte la referencia [16] identifica, específicamente a partir del rastrojo de maíz, 11 localidades a nivel nacional que pueden abastecer una planta de etanol, de las cuales 6 están en Sinaloa, con un potencial de etanol de 260 millones de litros por año. Por otro lado, [17] ubica 8 municipios a nivel nacional que concentran la mayor cantidad de biomasa agrícola disponible para etanol celulósico, de los cuales 4 municipios están en Sinaloa (maíz), uno en Baja California (trigo) y 3 en Tamaulipas (sorgo). Debemos aclarar que la cantidad de biomasa disponible (nacional, estatal y municipal) varía según la metodología de estimación aplicada, los ciclos agrícolas incluidos (Primavera-Verano y Otoño-Invierno), el sistema hídrico, el índice de residuos del cultivo (CRI, por sus siglas en inglés "*Crop Residue Index*"), los tipos de residuos (primarios, secundarios y terciarios), el período de estimación, la tasa de remoción de residuos, las prácticas del agricultor, etc. No obstante, la mayoría de los cálculos determinan que tres cultivos producen más del 87% de los residuos en México: maíz (43%), sorgo (26%) y caña de azúcar (18%), destacando Sinaloa, Tamaulipas y Veracruz, respectivamente [17].

De lo anterior se deduce la importancia de definir y analizar la logística de cosecha de rastrojo de maíz, determinar sus costos y fomentar el desarrollo de un mercado de residuos agrícolas en esta región de México.





TABLA 2. Ubicación geográfica de la producción de maíz grano (riego) y consecuentemente rastrojo de maíz (año agrícola 2020)

Rank	Estado	Producción grano (ton)	Participación nacional	Participación acumulada
1	Sinaloa	6,204,815	46%	46%
2	Guanajuato	1,380,260	10%	56%
3	Chihuahua	1,226,803	9%	65%
4	Michoacán	930,624	7%	72%
5	Sonora	633,971	4%	76%
6	Tamaulipas	520,807	4%	80%
	Resto	2,668,827	20%	100%
	Total	13,566,107		

Fuente: elaboración propia con datos de [25].

Para el diseño logístico de cosecha de rastrojo de maíz se siguió una metodología de cadena productiva, definiendo secuencialmente cada uno de los eslabones que la componen desde una óptica del comercializador mayorista [27]. Este agente económico, que puede ser un agricultor o no, y funciona como la empresa que hace posible que el rastrojo se transfiera del agricultor (propietario original) al ganadero (uso como alimento animal) o a la biorefinería (uso como insumo de etanol celulósico). En esa transferencia, el comercializador le agrega valor al rastrojo por lo que su actividad económica se analizó con la metodología de costo-beneficio, estimando un costo total que equivale al precio mínimo de venta del rastrojo de maíz (MCSSP, por sus siglas en inglés “*minimum corn stover selling price*”), que a la vez es la base para determinar el precio de compra por parte de la biorefinería, sumándole un margen promedio de ganancia.

Cuatro comercializadores (mayoristas) y expertos en la logística del rastrojo de maíz fueron entrevistados directamente con cuestionarios semiestructurados. Estos mayoristas en conjunto representan el mayor porcentaje de rastrojo cosechado y vendido en la región como alimento para ganado, dado que el uso alternativo de etanol celulósico, por ahora, es inexistente. El área de estudio fue en el valle de Culiacán-Navolato, Sinaloa, México, una zona de agricultura comercial, de riego e intensiva en siembra de maíz-grano. La información fue levantada en el año 2020 y se costeó mediante métodos contables para cada uno de los eslabones de la cadena a precios corrientes, asumiendo un área de cosecha de 1000 ha, con 4.5 ton/ha de rastrojo efectivamente empacadas, a una tasa de interés del 16% y un tipo de cambio de 20 pesos por dólar (USD).

Se incluyeron todas las actividades del comercializador de rastrojo de maíz y la información fue validada directamente en campo y mediante cotizaciones de casas comerciales, distribuidores de maquinaria, compañías transportistas de carga y de empresas aseguradoras. Se visitaron diferentes predios en el momento de la cosecha (abril-junio) y se

estimaron los rendimientos de rastrojo de maíz por hectárea y se verificó *in situ* la logística. El rastrojo de maíz queda esparcido en el campo donde se cosecha el grano, requiriéndose una serie de labores para poder preparar y empacar dicho rastrojo (desvarado, hilerado, empacado), para posteriormente ser trasladado al área de almacén o al lugar indicado por el cliente que lo adquiere. Existen dos tamaños de pacas, una denominada “gigante”, de aproximadamente 500 kg en forma rectangular (también puede ser en forma redonda), y una llamada “chica”, de aproximadamente 20 kg en forma rectangular. En este estudio se investigó y costeó el primer tipo de paca. No obstante que el tamaño y forma de la paca tiene implicaciones en la logística de cosecha y transporte, pierde sentido cuando se convierte a valor monetario, dado que los costos se presentan también en forma unitaria por ton y por hectárea.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura 3 muestra el esquema de la cadena de cosecha de rastrojo de maíz para etanol celulósico que se diseñó como resultado de la investigación y, acto seguido, se describe en qué consiste cada uno de los eslabones. Posteriormente se analiza a detalle el eslabón de nutrientes, por considerarlo un punto central en la sustentabilidad de la cosecha de residuos agrícolas. Subsecuentemente se presenta la estimación de costos de rastrojo de maíz y el MCSSP para el área de estudio.

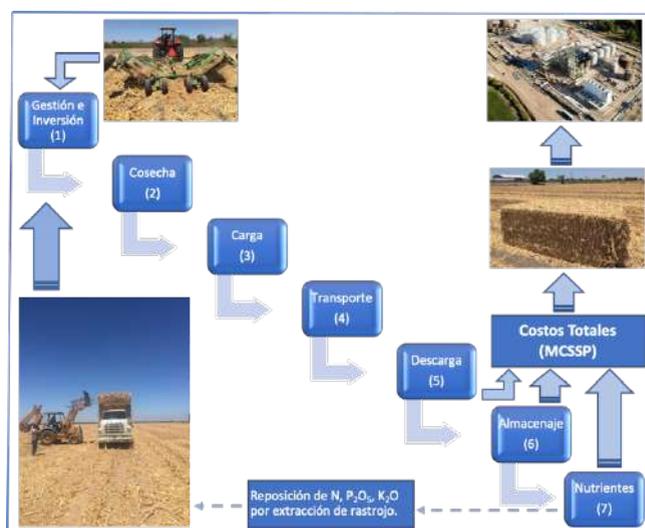


FIGURA 3. Cadena de cosecha de rastrojo de maíz para etanol celulósico en México. Se compone de siete eslabones y tres posibles salidas para formar el MCSSP.

Fuente: elaboración propia (2021).





Gestión e Inversión (1): es el trabajo logístico del comercializador (que puede ser agricultor o no) de residuos agrícolas por concepto de búsqueda, reserva y adquisición de rastrojo en campo, generalmente antes de que el agricultor coseche, así como la realización de la inversión en maquinaria y equipo de cosecha (tractores, empacadoras, desvaradoras, rastrillos, remolques, etc.). El costo de capital de maquinaria y equipo, aunque es adquirido en este eslabón, es contabilizado y depreciado en el siguiente (cosecha). Se incluye también la gestión de proveedores de insumos requeridos (combustibles, hilo, refacciones, etc.) y la coordinación de cualquier otra actividad durante el período de pre-cosecha y planeación. Si el propio agricultor es quien cosecha y comercializa su rastrojo y, suponiendo que no realiza ninguna inversión en equipo (arrenda equipo de cosecha), el único costo en este eslabón de la cadena será su costo de oportunidad, el cual es igual al precio que pudo haber vendido el residuo agrícola, justamente como queda después de cosechar el grano. En nuestro caso, suponemos que el comercializador de rastrojo es un agente económico distinto al agricultor, que realiza su actividad al mayoreo y con fines de lucro.

Cosecha (2): es el trabajo correspondiente a las diferentes actividades logísticas requeridas para la cosecha de rastrojo. Este eslabón inicia después de que el agricultor cosecha el grano y termina cuando las pacas están hechas, pero aún esparcidas sobre el campo agrícola, justo como salieron de la empacadora. En términos contables, aquí se incluye el costo de capital y financiero del equipo de cosecha.

Carga (3): es el trabajo por las actividades lógicas de cargar pacas y disponerlas sobre el camión o remolque en el que serán transportadas para entregar al cliente final o para llevarlas al almacén propio del comercializador de rastrojo. Este eslabón de la cadena sucede en el campo de cosecha de rastrojo. No incluye el costo de transporte, ni el descenso de pacas.

Transporte (4): son las actividades logísticas de transportar el rastrojo desde el lugar donde fue cosechado al punto destino, que puede ser el indicado por el cliente o el área destinada como almacén por parte del comercializador. Este eslabón de la cadena puede ser realizado por el propio comercializador o puede ser completamente subcontratado. En caso que sea subcontratado (80% de casos), el único costo de este eslabón es el pago del servicio al transportista.

Descarga (5): es la logística correspondiente a la descarga de pacas en el punto destino. Incluye bajar las pacas del camión o remolque y estibarlas piramidalmente. El método de acomodo de pacas puede afectar los costos de este eslabón de la cadena y provocar variaciones en la tasa de pérdidas de biomasa. Generalmente no se estiba sobre una base construida con tal propósito, en su lugar únicamente se limpia el área y/o se utiliza algún material (lona) que reduzca pérdidas por

descomposición de biomasa. Este eslabón sucede en el lugar indicado por el cliente final o en el área destinada como almacén por parte del comercializador. No incluye el costo del ascenso y el transporte de pacas, éstos costos ya se encuentran en eslabones previos (3 y 4) de la cadena. Usualmente este trabajo es subcontratado por el comercializador.

Almacenaje (6): son los costos exclusivos por mantener almacenado de forma segura y con las menores pérdidas posibles el rastrojo. El tiempo de almacenamiento, así como el precio de renta o el costo de oportunidad de la tierra/espacio donde se almacena, su vigilancia, seguros y demás cuidados aumentan el costo en este eslabón de la cadena. Si el rastrojo es entregado al cliente final, enviándolo directamente desde el lugar de cosecha, este costo es cero. Por lo anterior, el comercializador busca el mínimo stock posible, el cual fue estimado, según la práctica, en un porcentaje no mayor al 10% del volumen cosechado.

Nutrientes (7): son los costos por reposición de nutrientes que deben ser aplicados a la tierra donde se cosechó el rastrojo para que esta actividad sea sustentable y no provoque efectos negativos sobre el suelo y los rendimientos de los cultivos subsecuentes. Para evitar este problema, en la literatura no existe un consenso sobre la tasa de residuos a extraer, por ejemplo en [16] se aplica un 70% y 100% para rastrojo y olote de maíz respectivamente, 70%-90% para paja de trigo, 70% y 100% para paja y bagazo de caña de azúcar respectivamente; mientras la referencia [17] aplica 40% para todos los residuos agrícolas de México. A nivel internacional otros estudios [28, 29, 30, 31, 32] ubican la tasa de remoción de residuos agrícolas entre 30% y 50%. En los cálculos de este artículo, aplicamos la tasa de remoción de residuos encontrada en la investigación de campo, que se aproxima al 40% de los residuos totales que quedan después de levantar la cosecha. Cuando el comercializador de residuos agrícolas es distinto al agricultor, en el corto plazo, no tiene interés económico en reponer nutrientes a la tierra por la extracción de rastrojo, no obstante, éstos deben ser considerados en los costos de producción para que la actividad sea sustentable en el largo plazo.

Costos Totales: son los costos totales sumando los siete eslabones de la cadena de cosecha de rastrojo de maíz. Cuando el comercializador de rastrojo es una persona distinta al agricultor (la investigación encontró que generalmente así es) el eslabón nutrientes tiene el valor de cero, dado que este agente no tiene incentivo económico o legal para cubrir dicho costo en el corto plazo, aunque sí debe ser considerado para hacer esta actividad sustentable en el largo plazo. Desde el punto de vista de los costos, lo anterior provoca que la cadena productiva en la práctica termine en el eslabón almacenaje, subestimando su costo real. El costo total de rastrojo (\$/ton, \$/paca, \$/ha) lo denominamos MCSSP, el cual es el precio





mínimo de venta del rastrojo en el mercado por parte del comercializador. Si la planta de etanol celulósico es quien cosecha el rastrojo, el MCSSP sería su precio de compra de materia prima, de lo contrario, la planta tendría que agregar en su presupuesto anual el margen de ganancia del comercializador, el cual es aproximadamente el 40%.

Al extraer residuos agrícolas del área de cultivo se están extrayendo también nutrientes que en un sistema natural se incorporarían al suelo mediante los procesos biológicos de mineralización y humificación de la biomasa. En el caso del maíz, los tres principales nutrientes más utilizados son nitrógeno (N), fósforo (P_2O_5) y potasio (K_2O), independientemente de la fuente que se use. No obstante que las cantidades correctas a suministrar de nutrientes dependen de un análisis de suelo (laboratorio), en la zona estudiada (Sinaloa) el agricultor aplica para maíz de riego la cantidad promedio de 320 unidades de N, 52 unidades de P_2O_5 y 30 unidades de K_2O .

En la investigación de campo realizada no se encontró evidencia de que se esté llevando a cabo el remplazo de nutrientes como consecuencia de la cosecha de rastrojo de maíz. Sin embargo, es una práctica agrícola común agregar nutrientes al nuevo cultivo de maíz independientemente de si se extrajo rastrojo del cultivo previo. Por lo tanto, hemos decidido incluir estos costos de remplazo ya que, en un escenario de cosecha de rastrojo generalizado, como el que habría en caso de producir etanol, se tendrían que aplicar nutrientes a la tierra para que esta actividad sea sustentable en el largo plazo.

Diversos estudios han analizado los métodos de cosecha para disminuir la extracción de ciertas partes del rastrojo mientras se aumentan otras; el objetivo es retirar la menor cantidad posible de nutrientes de la tierra con el propósito de hacer esta actividad más sustentable y disminuir los costos de reposición de esos nutrientes. Por ejemplo [30, 33, 34, 35, 36], han comprobado los beneficios de aumentar la extracción de olote, cáscara y hojas, y disminuir la remoción de tallo, dada la relación carbono-nitrógeno que contiene éste último. Lo anterior ayuda a disminuir el problema conocido como inmovilización de nitrógeno y conduce a una reducción aproximada del 13% en los requerimientos de nitrógeno en el siguiente cultivo.

El proceso natural de secado de la planta de maíz inicia de arriba hacia abajo, provocando que los minerales tiendan a concentrarse en la parte baja de la planta [29], además la relación carbono-nitrógeno en la parte baja de la planta es menor por lo que el proceso de degradación de biomasa inmoviliza menos nitrógeno de la tierra, quedando éste disponible para ser usado en el desarrollo de la nueva planta. Así entonces, dejar los tallos de la planta sería más beneficioso

para el nuevo cultivo de maíz que dejar otras partes del rastrojo.

El problema de inmovilización de nitrógeno sucede cuando los residuos en descomposición tienen una relación carbono-nitrógeno mayor a 24:1 [37]. La relación carbono-nitrógeno reportada en la literatura es: tallo 60-70:1; olote 60-125:1; hojas y cáscaras 40-50:1 [29, 30, 37]. De esta forma, al retirar más olote estamos retirando más carbono, lo que implica una demanda menor de nitrógeno orgánico por parte de los microorganismos encargados del proceso de descomposición de rastrojo, quedando éste disponible en la tierra. Una paca tradicional (gigante) contiene aproximadamente 30%-35% de tallo, mientras que con los nuevos métodos de cosecha de rastrojo, esa cantidad puede disminuir 15%-20%, mientras la cantidad de olote y cáscara puede aumentar 24%; lo anterior permite disminuir el problema de inmovilización de nitrógeno y reduce los costos de remplazo de nutrientes por cosecha de rastrojo [29, 34].

Los costos estimados para cada uno de los eslabones en forma cronológica se presentan en las tablas 3-9. Posteriormente los costos totales estimados son exhibidos en las tablas 10-11 y en las figuras 4-5.

TABLA 3. Costos del eslabón 1 (MXN pesos) de la cadena de cosecha de rastrojo de maíz.

COSTOS DE GESTION			
CONCEPTO	MXN \$/ton	MXN \$/paca	MXN \$/ha
COMBUSTIBLE	5.24	2.62	23.58
Gasolina gerente	5.24	2.62	23.58
MANO DE OBRA	8.67	4.33	39.00
Salario gerente	6.67	3.33	30.00
Salario auxiliar de gerente	2.00	1.00	9.00
COMPRA RASTROJO	44.44	22.22	200.00
Compra rastrojo	44.44	22.22	200.00
OTROS	1.91	0.96	8.60
Depreciación pick-up gerente	1.78	0.89	8.00
Comunicación	0.13	0.07	0.60
Otros	0.00	0.00	0.00
TOTAL	60.26	30.13	271.18

Fuente: elaboración propia (2021).





TABLA 4. Costos del eslabón 2 (MXN pesos) de la cadena de cosecha de rastrojo de maíz.

COSTOS DE COSECHA			
CONCEPTO	MXN \$/ton	MXN \$/paca	MXN \$/ha
COMBUSTIBLE	48.48	24.24	218.14
Tractor-Desvaradora	17.72	8.86	79.73
Tractor-Rastrillo	8.61	4.31	38.76
Tractor-Empacadora	22.15	11.07	99.66
MANO DE OBRA	6.67	3.33	30.00
Tractor-Trituradora	2.67	1.33	12.00
Tractor-Rastrillo	2.22	1.11	10.00
Tractor-Empacadora	1.78	0.89	8.00
MAQUINARIA	137.24	68.62	617.60
Mantenimiento tractor-desvaradora	3.33	1.67	15.00
Mantenimiento tractor-rastrillo	2.44	1.22	11.00
Mantenimiento tractor-empacadora	5.11	2.56	23.00
Costo de capital, tractor 1	9.46	4.73	42.58
Costo de capital, tractor 2	14.96	7.48	67.34
Costo de capital, tractor 3	32.77	16.39	147.47
Costo de capital, desvaradora	12.23	6.11	55.02
Costo de capital, rastrillo	5.45	2.72	24.50
Costo de capital, empacadora	51.48	25.74	231.68
OTROS	32.00	16.00	144.00
Hilo	31.63	15.82	142.35
Probeta	0.37	0.18	1.66
Otros	0.00	0.00	0.00
TOTAL	224.39	112.19	1,009.75

Fuente: elaboración propia (2021).

TABLA 5. Costos del eslabón 3 (MXN pesos) de la cadena de cosecha de rastrojo de maíz.

COSTOS DE CARGA			
CONCEPTO	MXN \$/ton	MXN \$/paca	MXN \$/ha
COMBUSTIBLE	6.64	3.32	29.90
Montacarga	6.64	3.32	29.90
MANO DE OBRA	2.67	1.33	12.00
Montacarga	2.67	1.33	12.00
MAQUINARIA	8.62	4.31	38.79
Mantenimiento montacarga	0.67	0.33	3.00
Costo de capital, montacarga	7.95	3.98	35.79
Otros	0.00	0.00	0.00
TOTAL	17.93	\$8.97	80.69

Fuente: elaboración propia (2021).

TABLA 6. Costos del eslabón 4 (MXN pesos) de la cadena de cosecha de rastrojo de maíz.

COSTOS DE TRANSPORTE			
Concepto	MXN \$/ton	MXN \$/paca	MXN \$/ha
Costo de flete 1 (radio 40 km)	150.26	75.13	676.19
Costo de flete 2 (radio 80 km)	241.27	120.63	1,085.71
Promedio	195.77	97.88	880.95

Fuente: elaboración propia (2021).

TABLA 7. Costos del eslabón 5 (MXN pesos) de la cadena de cosecha de rastrojo de maíz.

COSTOS DE DESCARGA			
CONCEPTO	MXN \$/ton	MXN \$/paca	MXN \$/ha
MANO DE OBRA	40.00	20.00	180.00
Descarga de pacas (maquila, incluye estiba)	40.00	20.00	180.00
OTROS	0.00	0.00	0.00
Otros	0.00	0.00	0.00
TOTAL	40.00	20.00	180.00

Fuente: elaboración propia (2021).

TABLA 8. Costos del eslabón 6 (MXN pesos) de la cadena de cosecha de rastrojo de maíz.

COSTOS DE ALMACENAJE			
CONCEPTO	MXN \$/ton	MXN \$/paca	MXN \$/ha
MANO DE OBRA	19.20	9.60	86.40
Instalar lonas	1.20	0.60	5.40
Vigilancia	18.00	9.00	81.00
OTROS	34.20	17.10	153.90
Renta tierra/espacio	4.00	2.00	18.00
Lonas	16.20	8.10	72.90
Pérdida por almacenamiento	14.00	7.00	63.00
Otros	0.00	0.00	0.00
TOTAL	53.40	26.70	240.30

Fuente: elaboración propia (2021).

TABLA 9. Costos del eslabón 7 (MXN pesos) de la cadena de cosecha de rastrojo de maíz.

COSTOS DE NUTRIENTES			
CONCEPTO	MXN \$/ton	MXN \$/paca	MXN \$/ha
NUTRIENTES^a			
Nitrógeno (N)	142.39	71.20	640.78
Fósforo (P ₂ O ₅)	77.92	38.96	350.63
Potasio (K ₂ O)	185.80	92.90	836.09
TOTAL	406.11	203.05	1,827.49

^a Se estimaron 7.7 kg/ton de N, 3.3 kg/ton de P₂O₅ y 13.5 kg/ton de K₂O. Fuente: elaboración propia (2021).





La logística de cosecha de rastrojo de maíz permite que el MCSSP pueda ser determinado desde tres eslabones distintos (eslabones 5, 6 y 7) (ver figura 3).

Cada precio se va incrementando (o decreciendo, dependiendo de dónde se inicie el análisis) al ir agregando (o restando) los costos de cada eslabón. Sumando el costo de los siete eslabones de la cadena de cosecha de rastrojo de maíz y, bajo las consideraciones aquí expuestas, el MCSSP fue calculado en \$997.86 MXN pesos/ton, \$498.93 MXN pesos/paca (500 kg) y \$4,490.36 MXN pesos/ha. Estas mismas estimaciones sin incluir la reposición de nutrientes (eslabón 7, como sucede en la práctica) se reducen a: \$591.75 MXN pesos/ton, \$295.88 pesos/paca (500 kg) y \$2,662.87 MXN pesos/ha. Otro escenario que disminuye aún más los costos para el comercializador y que sucede en un alto porcentaje (90%), es la entrega directa del rastrojo desde el campo (parcela de cosecha) al cliente final, por lo que el eslabón almacenaje (6) puede ser eliminado de los costos. En este caso, los costos disminuyen a: \$538.35 MXN pesos/ton, \$269.18 MXN pesos/paca y \$2,422.57 MXN pesos/ha (para todos los casos, se recomienda al lector, ver las tablas y figuras referidas). El escenario que se adopte (incluyendo 5, 6 o 7 eslabones) depende de las prácticas de cosecha de cada región.

Por ejemplo, la experiencia de la planta de etanol celulósico de POET-DSM en Estados Unidos, que utiliza como insumo rastrojo de maíz, es no pagar almacenaje (eslabón 6) pero si pagar reposición de nutrientes (eslabón 7). También hay que recordar que al MCSSP, a efecto de convertirlo en precio de compra por parte de la biorefinería, habría que agregar un margen de ganancia del comercializador de rastrojo, que en la región es de aproximadamente 40%.

TABLA 10. Costos totales (MXN pesos) de la cadena de cosecha de rastrojo de maíz.

COSTOS TOTALES			
ESLABÓN	MXN \$/ton	MXN \$/paca	MXN \$/ha
1. GESTION	60.26	30.13	271.18
2. COSECHA	224.39	112.19	1,009.75
3. CARGA	17.93	8.97	80.69
4. TRANSPORTE	195.77	97.88	880.95
5. DESCARGA	40.00	20.00	180.00
6. ALMACENAJE	53.40	26.70	240.30
7. NUTRIENTES	406.11	203.05	1,827.49
MCSSP	997.86	498.93	4,490.36

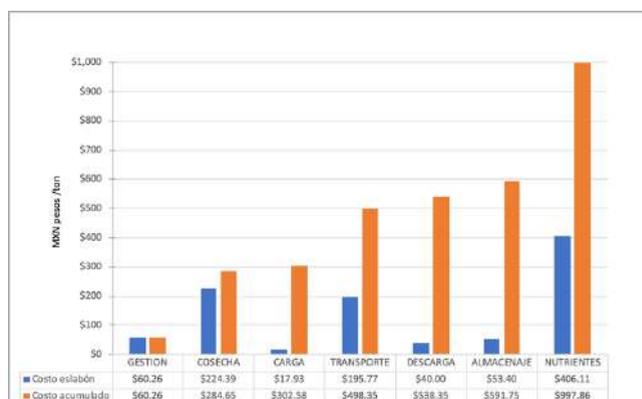
Fuente: elaboración propia (2021).

TABLA 11. Costos totales acumulados (MXN pesos) de la cadena de cosecha de rastrojo de maíz.

COSTOS TOTALES PORTONELADA		
ESLABÓN	Costo (MXN \$/ton)	Costo acumulado (MXN \$/ton)
1. GESTION	60.26	60.26
2. COSECHA	224.39	284.65
3. CARGA	17.93	302.58
4. TRANSPORTE	195.77	498.35
5. DESCARGA	40.00	538.35
6. ALMACENAJE	53.40	591.75
7. NUTRIENTES	406.11	997.86
MCSSP	\$997.86	

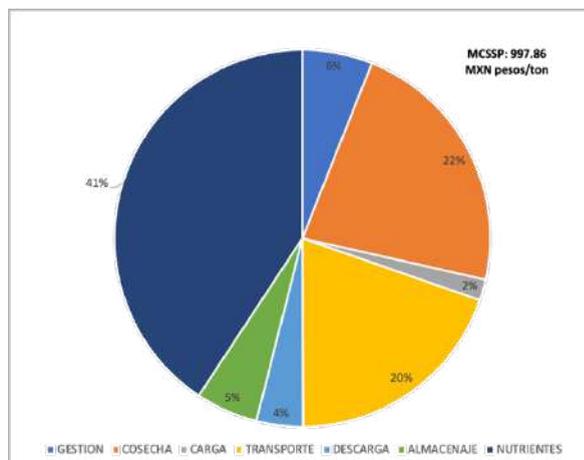
Fuente: elaboración propia (2021).

FIGURA 4. MCSSP del rastrojo de maíz por eslabón y acumulado (MXN pesos/ton).



Fuente: elaboración propia (2021).

FIGURA 5. MCSSP del rastrojo de maíz (MXN pesos/ton).



Fuente: elaboración propia (2021).





Finalmente, los escenarios de costos aquí estimados concuerdan aproximadamente con el precio de mercado del rastrojo de maíz que se observa en la región, en ese sentido pueden ser la base para la planeación y presupuestación del insumo principal de una planta de etanol celulósico. También pueden ser útiles para transparentar el mercado y profundizar en mayores estudios tendientes a buscar economías de escala y/o encontrar oportunidades que permitan aprovechar más eficientemente este tipo de biomasa.

5. CONCLUSIONES

Ante el requerimiento nacional de México de transitar hacia energías renovables que diversifiquen la matriz energética y contribuyan a mitigar el cambio climático, se diseñó la cadena de cosecha de rastrojo de maíz, se definió la logística de cada uno de sus eslabones y se estimaron los costos de producción de la misma. Mediante una investigación de campo y siguiendo una metodología de cadena productiva y de análisis costo-beneficio, se calculó el precio mínimo de venta del rastrojo de maíz del comercializador mayorista en una región altamente productora (Sinaloa) de esta biomasa. Dado los *tradeoffs* existentes de los residuos agrícolas, para su utilización como insumo para etanol celulósico es necesario el desarrollo y funcionamiento de un mercado eficiente del rastrojo de maíz en México. Se concluye estimando los costos específicos de cada uno de los eslabones de la cadena y presentando los costos totales de la cosecha de rastrojo de maíz, los cuales contribuyen a entender la logística y el sistema de precios para su potencial uso como insumo en la producción de etanol celulósico en México.

REFERENCIAS

- [1]. Jarabo Friedrich F, Perez Dominguez C, Elortegui escartin N, Fernández González J and Macías Hernández JJ, *El libro de las energías renovables*. Colección era solar (dirigida por Manuel Senra Díaz de Cevalloa), S.A. de Publicaciones Técnicas, Madrid, España (1998). ISBN: 84-86913-01-2
- [2]. Timmons D, Harris JM and Roach B, *La economía de las energías renovables*. A GDAE Teaching Module on Social and Environmental Issues in Economics, Global Development and Environment Institute, Tufts University, Medford, MA 02155 (2014).
- [3]. Overend RP, *Biomass conversion technologies, na conf*. Sustentabilidade na geração e (2007).
- [4]. Usmani MA, Khan I, Haque A, Bhat AH, Mondal D and Gazal U, *Biomass-based composites from 4 different sources: Properties, characterization, and transforming biomass with ionic liquids*. In Mohammad J, Paridah Md T and Naheed Saba (Eds.), *Lignocellulosic Fibre and Biomass-Based Composite Material* (chapter 4), Woodhead Publishing (2017). eBook ISBN: 9780081009666, Hardcover ISBN: 9780081009598.
- [5]. US/DOE, *2016 Billion-Ton Report: Advancing Domestic Resources for a Thriving Bioeconomy, Volume 1: Economic Availability of Feedstocks*. In Langholtz MH, Stokes BJ and Eaton LM (Leads), ORNL/TM-2016/160, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN. (2016). DOI: 10.2172/1271651. <http://energy.gov/eere/bioenergy/2016-billion-ton-report>.
- [6]. Bentsen NS, Felby C, and Thorsen BJ, *Agricultural residue production and potential for energy and materials services*. Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 40:59-73 (2014).
- [7]. Cherubin MR et al., *Crop residue harvest for bioenergy production and its implications on soil functioning and plant growth: A review*. Scientia Agricola, Vol. 75(3):255-272 (2018).
- [8]. Valdez-Vazquez I, Acevedo-Benítez JA and Hernández-Santiago C, *Distribution and potential of bioenergy resources from agricultural activities in Mexico*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14:2147-2153 (2010). DOI: 10.1016/j.rser.2010.03.034.
- [9]. Rios M and Kaltschmitt M, *Bioenergy potential in Mexico – status and perspectives on a high spatial distribution*. Biomass Conversion and Biorefinery, Vol. 3(3):239-154 (2013).
- [10]. Reyes-Muro L, Camacho-Villa TC y Guevara-Hernández F (Eds.), *Rastrojos: manejo, uso y mercado en el centro y sur de México*. INIFAP, libro técnico número 7:1-242, Campo Experimental Pabellón, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, México (2013). ISBN: 978-607-37-0170-9.
- [11]. Borja-Bravo M, Reyes-Muro L, Espinosa-García JA and Vélez-Izquierdo A, *Crop residues production and consumption in Mexico*. En Reyes-Muro L, Camacho-Villa TC and Guevara-Hernández F (Eds.), *Rastrojos: manejo, uso y mercado en el centro y sur de México* (Capítulo 1), INIFAP, libro técnico número 7:1-242, Campo Experimental Pabellón, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, México (2013). ISBN: 978-607-37-0170-9.
- [12]. Aleman-Nava GS, Meneses-Jácome A, Cárdenas-Chávez DL, Díaz-Chávez R, Scarlat N, Dallemand JF, Ornelas-Soto N, García-Arrazola R and Parra-Saldivar R, *Bioenergy in Mexico: Status and Perspective*. Biofuels, Bioproducts & Biorefining, Vol. 9, Issue 1:8-20 (2015). 10.1002/bbb.1523.





- [13]. Tauro R, Ghilardi A, García CA and Masera O, *Recursos Biomásicos*. En García AA y Masera O (Eds.), Estado del Arte de la Bioenergía en México. Red Temática de Bioenergía (RTB) del Conacyt (2016). ISBN: 978-607-8389-11-7
- [14]. Becerra-Pérez LA, Tyner EW and García-Paez B, *Cellulosic Ethanol in México: An Appraisal as Industrial Feedstock*. In Digambar NP (Ed.), *Advances in Renewable Energy Engineering, Volume 1* (Chapter 1), AkiNik Publications, New Delhi, India (2019). ISBN: 978-93-5335-557-9.
- [15]. Sadhukhan J, Martínez-Hernández E, Amezcua-Allieri MA, Aburto J and Honorato-Salazar JA, *Economic and environmental impact evaluation of various biomass feedstock for bioethanol production and correlation to lignocellulosic composition*. Bioresource Technology Report 7 (2019) 100230.
- [16]. Hernández C, Escamilla-Alvarado C, Sánchez A, Alarcón E, Ziarelli F, Musule R and Valdez-Vazquez I, Wheat straw, corn stover, sugarcane, and Agave biomasses: chemical properties, availability, and cellulosic-bioethanol production potential in Mexico. *Biofuels, Bioproducts & Biorefining* 13:1143-1159 (2019).
- [17]. Honorato-Salazar JA and Sadhukhan J, *Annual biomass variation of agricultural crops and forestry residues, and seasonality of crop residues for energy production in Mexico*. *Food and Bioproducts Processing* 119 (2020) 1-19.
- [18]. Beuchelt TD, Camacho Villa CT, Göhring L, Hernández Rodríguez VM, Hellin J, Sonder K and Erenstein O, *Social and income trade-offs of conservation agriculture practices on crop residue use in Mexico's central highlands*. *Agricultural Systems* 134, 61-71 (2015).
- [19]. Magnan N, *Property rights enforcement and no-till adoption in crop - livestock systems*. *Agricultural Systems* 134, 76–83 (2015).
- [20]. Andrieu N, Vayssières J, Corbeels M, Blanchard M, Vall E and Tifton P, *From synergies at farm scale to trade-offs at village scale: the use of cereal crop residues in an agro-pastoral system of the Sudanian zone of Burkina Faso*. *Agricultural Systems*, 134:84–96 (2015).
- [21]. Baudron F, Delmotte S, Corbeels M, Herrera JM and Tifton P, *Multi-scale trade-off analysis of cereal residue use for livestock feeding vs. soil mulching in the Mid-Zambezi Valley, Zimbabwe*. *Agricultural Systems*, 134:97–106 (2015).
- [22]. Valbuena D, Homann-Kee Tui S, Erenstein O, Teufel N, Duncan A, Abdoulaye T, Swain B, Mekonnen K, Germaine I and Gérard B, *Identifying determinants, pressures and trade-offs of crop residue use in mixed smallholder farms in Sub-Saharan Africa and South Asia*. *Agricultural Systems* 134:107–118 (2015).
- [23]. Tifton P, Gérard B and Erenstein O, *Tradeoffs around crop residue biomass in smallholder crop-livestock systems – What's next?* *Agricultural Systems* 134, 119-128 (2015).
- [24]. SIAP (Sistema de Información Agrolimentario y Pesquero), *Atlas Agroalimentario, 2020*. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural, Gobierno de México (2021).
- [25]. SIACON-NG, *Base de datos de Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural*, Gobierno de México (2021).
- [26]. INEGI (Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía), *Sistema de Cuentas Nacionales de México, Producto Interno Bruto por Entidad Federativa*, México (2021).
- [27]. Ballou RH, *Logística. Administración de la cadena de suministros*. Quinta edición, Pearson Educación, México, 2004. ISBN: 970-26-0540-7
- [28]. Brechbill SC and Tyner WE, *The economics of biomass collection, transportation, and supply to Indiana cellulosic and electric utility facilities*. Working Paper #08-03, Department of Agricultural Economics, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA. April, 2008.
- [29]. Johnson JM, Wilhelm WW, Karlen DL, Archer DW, Wienhold BJ, Lightle DT, Laird DA, Baker JM, Ochsner TE, Novak JM, Halvorson AD, Arriaga FJ and Barbour NW, *Nutrient removal as a function of corn stover cutting height and cob harvest*. *BioEnergy Research*, 3:342-352 (2010).
- [30]. English A, Tyner WE, Sesmero J, Owens P and Muth D, *Environmental Impacts of Stover Removal in the Corn Belt*. Selected paper prepared for presentation at the Agricultural & Applied Economics Association's 2012 AAEA Annual Meeting, Seattle, Washington. August 12-14, 2012 (conference paper).
- [31]. Blanco-Canqui H and Lal R, *Crop residue removal impacts on soil productivity and environmental quality*. *Crit. Rev. Plant Sci.* 28, 139–163 (2009).
- [32]. Blanco-Canqui H, *Crop residue removal for bioenergy reduces soil carbon pools: how can we offset carbon losses?* *Bioenergy Res.* 6, 358–371 (2013).
- [33]. Dam RF, Mehdi BB, Burgess MSE, Madramootoo CA, Mehuys GR and Callum IR, *Soil bulk density and crop yield under eleven consecutive years of corn with different tillage and residue practices in a sandy loam soil in central Canada*. *Soil & Tillage Research*, Vol. 84, Issue 1, Pp. 41–53 (2005).
- [34]. Fernandez F, *What is the Nutrient Value of Corn Stover Removal?* *The Bulletin* 23-9 (2007). University of





Illinois.

<http://bulletin.ipm.illinois.edu/article.php?id=860>

- [35]. Coulter JA and Nafziger ED, *Continuous Corn Response to Residue Management and Nitrogen Fertilization*. Agronomy Journal, Vol. 100, Issue 6:1774-1780 (2008).
- [36]. DeJong-Hughes J and Coulter J, *Considerations for Corn Residue Harvest in Minnesota*. University of Minnesota, doc M1234 (2009). <http://www.extension.umn.edu/distribution/cropsystems/M1243.html>
- [37]. USDA-NRCS (United States Department of Agricultural - Natural Resources Conservation Service), *Carbon to Nitrogen Ratios in Cropping Systems*. Prepared by the USDA-NRCS East National Technology Support Center, Greensboro, NC, in cooperation with North Dakota NRCS (2011). <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/soils/health/>



John A. Posada-Duque: Profesor Asistente del Departamento de Biotecnología, en la Universidad de Tecnología de Delft, en los Países Bajos, en el área de Sostenibilidad Integral en Bio-economía. Es Ingeniero Químico, con MSc y PhD en Ingeniería Química, de la Universidad Nacional de Colombia. Trabajó como Investigador Postdoctoral e Investigador Senior en el Instituto Copérnico para el Desarrollo Sostenible de la Universidad de Utrecht, en los Países Bajos, en las áreas de 'Evaluación Ambiental de BioProcesos' y 'Diseño de Biorefinerías Sostenibles', respectivamente. Sus áreas de de investigación cubren, entre otras: evaluación tecno-económica de procesos, análisis de ciclo de vida (ACV), evaluación de impactos sociales y análisis integral de sostenibilidad en bio-economía. Ha participado en más de 15 proyectos de investigación en los Países Bajos y a nivel Europeo; ha publicado más 60 artículos científicos y capítulos de libro, y ha impartido más de 40 presentaciones en congresos internacionales.



Luis Armando Becerra-Pérez: Profesor e Investigador de tiempo completo de la Facultad de Ciencias Económicas y Sociales de la Universidad Autónoma de Sinaloa, México. Doctor en Ciencias Económicas por la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Maestro en Economía por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y Licenciado en Economía por la Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS). Graduado del programa "liderazgo aplicado en

energías renovables y eficiencia energética" del Centro de Salud y Medio Ambiente de la Escuela de Salud Pública de Harvard University (2015); estudios de posdoctorado en Purdue University, Estados Unidos (2016-2017) y Delft University of Technology, Países Bajos (2021). Sus áreas de investigación son los biocombustibles, medio ambiente, sustentabilidad y el desarrollo empresarial. Es miembro de la Red Mexicana de Bioenergía, Red Temática de Bioenergía, Colegio Nacional de Economistas. Producto de sus trabajos de investigación ha publicado como autor/coautor 17 artículos, 6 capítulos de libro, 2 libros y titulado a 12 alumnos de posgrado.



Miguel Ángel Gastélum-Delgado: Profesor Investigador de Tiempo Completo en la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Sinaloa, México. Doctor y Maestro en Ciencias por el Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), México. Especialista en producción animal bajo estrés calórico y sustentabilidad agrícola. Producto de sus investigaciones en el área agrícola y ganadera cuenta con diversas publicaciones en revistas

nacionales e internacionales.



La Energía sustentable como base de la reactivación económica después de la pandemia

Memorias de la Conferencia

ISSN: 2448-5624



International Energy Conference, IEC2021
Congreso Internacional de Energía, CIE 2021
Querétaro, Querétaro. México, Septiembre 20-24, 2021.

Editores:

José Antonio Colin Luna

Margarita González Brambila

Héctor F. Puebla Nuñez

Carlos Omar Castillo Araiza



Academia Mexicana de Energía, A.C.



MEMORIAS DEL CONGRESO INTERNACIONAL DE ENERGÍA DE LA ACADEMIA MEXICANA DE ENERGÍA, Año 4, Número 4, septiembre 2021. Es una publicación bianual editada por la Academia Mexicana de Energía, A. C., Tehuantepec # 39, Col. Roma Sur, Delegación Cuauhtémoc, C.P. 06760, Ciudad de México. Tel. 555564778, www.amexen.org. Revista electrónica. Responsable: Margarita Mercedes González Brambila. Certificado de Reserva de Derechos al Uso Exclusivo 04-2016-012909072500-203, ISSN 2448-5624, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la Academia Mexicana de Energía, A. C.

