

System Advisor Model (SAM) como sistema de apoyo ambiental y energético para el aprovechamiento de la cascarilla de arroz.

System Advisor Model (SAM) as an environmental and energy support system for the use of rice husks.

Paula Alejandra Cordoba-Charry¹, Angie Tatiana Ortega-Ramírez²

^{1,2}Universidad de América, Bogotá - Colombia

ORCID: ¹[0000-0003-2730-9289](https://orcid.org/0000-0003-2730-9289), ²[0000-0002-6364-8432](https://orcid.org/0000-0002-6364-8432)

Recibido: 19 de febrero de 2022.

Aceptado: 29 de abril de 2022.

Publicado: 01 de mayo de 2022.

Resumen- Colombia se ha enfocado en realizar la transición energética hacia energías renovables, esto ha convertido al país en un foco de atención de nuevas inversiones y a su vez líder a nivel Latinoamérica de esta iniciativa [1]. La generación de energía por medio de la combustión de la biomasa de la cascarilla de arroz permite aprovechar el poder calórico contenido en esta y logra reincorporar este residuo industrial a la cadena de producción brindando soluciones a su compleja y costosa disposición. El System Advisor Model (SAM), cumple un papel importante en la ejecución de proyectos de energías renovables, ya que permite evaluar la capacidad de los sistemas y estima los costos de su implementación logrando estimar su viabilidad económica.

Palabras clave: cascarilla de arroz, System Advisor Model, poder calórico y energía de biomasa.

Abstract— Colombia has focused on implementing the energy transition towards renewable energies, this has made it a focus of attention for new investments and, in turn, a leader in this initiative in Latin America [1]. The generation of energy through the combustion of the biomass of the rice husk allows taking advantage of the caloric power contained in it and manages to reincorporate this industrial waste into the production chain, providing solutions to its complex and expensive disposal. The System Advisor Model plays an important role in the execution of renewable energy projects, since it allows evaluating the capacity of the systems and estimates the costs of its implementation, managing to estimate its economic viability.

Keywords: rice husk, System Advisor Model, caloric power and biomass energy.

*Autor para correspondencia.

Correo electrónico: paula.cordoba@estudiantes.uamerica.edu.co (Paula Alejandra Cordoba Charry).

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad de Santander.

Este es un artículo bajo la licencia CC BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Como citar este artículo: P. A. Cordoba-Charry y A. T. Ortega-Ramírez, "System Advisor Model (SAM) como sistema de apoyo ambiental y energético para el aprovechamiento de la cascarilla de arroz", *Aibi revista de investigación, administración e ingeniería*, vol. 10, no. 2, pp. 67-74, 2022, doi:[10.15649/2346030X.2684](https://doi.org/10.15649/2346030X.2684)

I. INTRODUCCIÓN

El arroz junto con el trigo y el maíz son productos fundamentales y de consumo cotidiano a nivel mundial [2], y según Mohanty [3], alrededor del 50% de la población del mundo lo considera crucial para la obtención diaria de carbohidratos. En Colombia para el año 2020 se registró un consumo de 46 Kg de arroz por persona según Fedearroz y el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) [4], mientras que en relación con la producción nacional para el primer semestre de 2021 se registraron 1.208.599 toneladas de arroz mecanizado [5], estos datos evidencian la importancia de la industria arrocera para la economía y seguridad alimentaria del país.

Para la preparación de este importante cereal se inicia con el proceso abrasivo del trillado obteniendo la separación de su envoltura, tamo o cascarilla, la cual representa entre 16% y el 20% del peso total del arroz paddy (arroz en cáscara), de este proceso se obtiene el arroz integral para después retirar el salvado obteniendo el grano pulido conformado por granos enteros y quebrados [6].

Al igual que la avena, cebada y el trigo, el grano de arroz está morfológicamente compuesto por el cariopse (fruto), y la cascarilla conformada por las glumelas palea y lema [2]. La cascarilla está firmemente unida al grano de arroz y toma la forma del mismo, su dimensión varía por los diferentes tipos de arroz que existen, presenta una longitud entre 4 – 14 mm, un ancho de 2 – 4 mm y un espesor promedio de 5 μ m; con un microscopio se puede detallar su superficie exterior rugosa con pequeñas crestas y la de su interior se percibe lisa, esto permite que el aire se atrape en las hendiduras exteriores e influya en la humedad de la cascara [7], así mismo según Echeverría & Lopez [8], la cascara sirve de protección al fruto contra ataques de insectos y daños mecánicos; respecto al color característico, densidad y peso específico, Varon [9], afirma que presenta coloraciones entre pardo rojizo a púrpura oscuro con consistencia quebradiza, baja densidad y 125 kg/m³ de peso específico, esto implica que 1 tonelada ocupe 8 m³ de espacio, es decir, que al aglomerarse abarca grandes espacios. Dentro de las características fisicoquímicas Valverde, Sarria, & Monteagudo [10], encontraron que la cascarilla de arroz a una humedad del 8.6% contiene aproximadamente el 42.5% de carbono (C), 36.2% de oxígeno (O), 0.21% de nitrógeno (N), 0.42% de azufre (S) y 14.6% de cenizas.

A lo largo del proceso de producción del grano de arroz se generan varios impactos ambientales, entre ellos los residuos que son perjudiciales para los ecosistemas por provenir de la industria química y plástica, puntualmente en la etapa de descascaramiento, adicional al subproducto cascarilla, son emitidas grandes cantidades de polvo y ruido [11], también en algunas ocasiones se realizan quemas de esta como método de disposición final [12], emitiendo grandes cantidades de gases altamente contaminantes y tóxicos para los seres vivos. Este aparenta ser un proceso económico y sencillo de disposición, pero acarrea consecuencias penales, afectación a la salud de la población, deterioro del medio ambiente y desaprovechamiento del potencial calórico de este material orgánico.

Se pueden evitar los impactos mencionados anteriormente potencializando y conociendo la composición de los residuos que se generan en las diferentes etapas de producción. En el caso de la cascarilla de arroz, su potencial energético lo hace catalogarse una energía limpia y alternativa, siendo utilizada por medio de su combustión para la generación de calor, vapor y electricidad, adicional los altos volúmenes de producción de arroz en Colombia permitirían proyectar buena rentabilidad en proyectos que logren su reincorporación a la cadena productiva [13]. Para lograr la ejecución de este tipo de proyectos que transformen los residuos, extraigan y aprovechen toda su materia, es necesario apoyarse en tecnologías que indiquen el posible rendimiento de estos para sustentar la viabilidad de su desarrollo, ya que por lo general requieren la inversión de grandes sumas de dinero y es imperioso sustentar los beneficios económicos y de la misma forma los ambientales para hacerlos sostenibles en el tiempo.

Por esto, hacia el año 2005 se desarrolló el Modelo Asesor de Sistemas (System Advisor Model [SAM]), un software gratuito que hace más sencilla la toma de decisiones para las personas en la industria de las energías renovables, dentro de ellas la combustión de biomasa para la generación de energía (SAM 2020.11.29), porque en él se puede ingresar información acerca de la localización del proyecto, los tipos de equipos a implementar, costos de instalación y operación del sistema para obtener proyecciones de rendimiento y estimaciones de costo de energías consolidada en tablas y gráficos [14]. Comprender el funcionamiento y aplicabilidad del software dentro de la presente investigación es fundamental para soportar la implementación de futuros proyectos relacionados con la generación de energía por fuentes renovables como la combustión de biomasa.

II. METODOLOGÍA

La información contenida en el presente documento se obtuvo por medio de datos arrojados en la exploración y estudio del simulador SAM, búsqueda bibliográfica exhaustiva en el motor de búsqueda especializado Google académico en el cual se tuvo en cuenta y se priorizó la información proveniente de universidades colombianas y suramericanas, como la universidad de los Andes, universidad Jorge Tadeo Lozano, universidad Simón Bolívar, UNAD, universidad Cooperativa de Colombia, universidad Santo Tomás, universidad Distrital Francisco José de Caldas, Pontificia Bolivariana, universidad del Valle, universidad Estatal de Quevedo (Ecuador), universidad de Piura (Perú), universidad de Guayaquil (Ecuador), entre otras, y de igual forma revistas científicas y páginas web oficiales. Se consultaron en total 54 fuentes bibliográficas y dentro del criterio de búsqueda se optó por el idioma español e inglés, ya que la mayoría de información del simulador SAM se encuentra en inglés con un porcentaje del 12,9% del total consultado; el ámbito geográfico de búsqueda fue global, con preferencia en estudios realizados en territorio Suramericano; el periodo de tiempo de búsqueda fue amplio debido a que algunas de las citas originales de los artículos seleccionados se remontan a estudios hechos antes del año 2000, y son pocos los estudios que se han registrado del uso de SAM en proyectos de producción de energía a partir de la combustión de biomasa; como palabras clave dentro de la búsqueda están cascarilla de arroz, System Advisor Model, SAM y energía de biomasa.

III. DESARROLLO

Los impactos negativos originados en los procesos industriales son el principal motivo de implementación de proyectos que logren transformarlos en beneficios económicos, ambientales y sociales. En el proceso de transformación del grano de arroz se estima que de cada cuatro toneladas se produce una tonelada de cascarilla [15], y por cada tonelada de arroz producida se emiten en promedio 163,3 kg de CO₂ a

la atmosfera, la errónea dosificación de fertilizantes que contienen nitrógeno contribuye a la emisión de N₂O cuyo valor de calentamiento es mucho mayor que el CO₂ [16].

a. Estrategias de aprovechamiento de la cascarilla de arroz

Las características que hacen de la cascarilla de arroz un residuo tan complejo de degradación son las mismas que han potenciado su interés investigativo, debido a que al transformarlas pueden reintegrarse en la cadena productiva; según Mai Thao, et al., [17], la cascarilla por su poder calorífico tiene gran importancia como mitigador del cambio climático porque ayudaría a reducir emisiones de gases efecto invernadero de fuentes convencionales de electricidad y/o diésel, disminuyendo así la huella de carbono que produce esta actividad. El poder calorífico de la biomasa es el contenido energético que esta posee, por tanto es la cantidad de calorías producidas al quemarse una unidad de masa, esto depende de la cantidad de humedad que contenga la biomasa, el oxígeno que la compone y sus compuestos volátiles, entonces si la humedad es menor al 60% es recomendable usarla en procesos termoquímicos o fisicoquímicos propios de la energía térmica y si la humedad es mayor del 60% se puede aprovechar mediante procesos químicos, como degradación por la actividad microbiana, para la obtención de combustibles líquidos y gaseosos; así pues se usó la cascarilla de arroz en co-digestión con excretas porcinas para la obtención de biogás por medio de la digestión anaerobia y se determinó que la adición de la cascarilla incrementó el potencial energético al suplir el déficit de carbono de las excretas, pues este es la principal fuente de energía de los microorganismos [18].

b. Iniciativas de sostenibilidad energética

Las investigaciones realizadas a la cascarilla de arroz tienen como finalidad encontrar nuevas aplicaciones para aprovechar sus características físicas y químicas, por consiguiente Solano [19], buscó implementar un horno quemador con sistema de automatización y control incorporado para la agroindustria arroceras en la ciudad de Barranquilla en donde el combustible fuera la cascarilla de arroz, se desea que este nuevo sistema de combustión garantice un mejor rendimiento, reducción en los costos de operación y menor contaminación en el proceso.

Los residuos agrícolas de alta producción como lo es el plátano, bagazo de caña y cascarilla de arroz se han sometido a estudios para valorar su producción de energía por medio de procesos biodigestores y de combustión. Un estudio determinó que la cascarilla de plátano es más eficiente para el proceso de digestión anaerobia con una producción de 1.179 ± 120 ml de metano por cada gramo de sustrato, en cambio la cascarilla de arroz produjo mayor cantidad de energía en el proceso de combustión con un poder calorífico de $14,56 \pm 3,52$ kJ/g, de igual forma se estableció que la humedad de los residuos debe ser menor al 15% para lograr un máximo aprovechamiento ya que la presencia de agua afecta el balance energético y aumenta los gases de combustión como el monóxido de carbono [20].

La cascarilla de arroz al ser sometida a combustión con temperaturas de 400°C logra su calcinación generando las cenizas entre el 13 y el 19% de su peso inicial [21], y Varon [9], lo corrobora afirmando que la cascarilla contiene en promedio un 64,30% de material volátil, 16,10% de carbono fijo y 19,54% de ceniza con 94,5% de dióxido de sílice el cual sirve para mejorar la composición de concretos por su capacidad aglomerante porque reacciona con hidróxidos de calcio mejorando la resistencia del concreto, si se sobrepasan los 700°C la sílice se cristaliza y pierde su grado de reactividad [22]; de los estudios realizados para su adición en la industria de la construcción se encuentra que la ceniza debe tener una granulometría similar a la del cemento para mejorar su aglutinación, también la cantidad de sílice presente en las cenizas varía dependiendo la procedencia y manejo dado a la cascarilla en los molinos [23], de igual forma se registra la elaboración de morteros en donde la adición de la ceniza mejoró la consistencia y la resistencia a la compresión comparado con un mortero típico con calidad de alta resistencia [24].

A partir de la cascarilla de arroz es posible la producción de azúcares fermentables, que luego se usan en la producción del Etanol, por medio del tratamiento de impregnación con ácido sulfúrico al 0.5% durante 12 h y explosión con vapor a temperaturas entre 190 – 230°C durante 10 – 25 min [25]; así mismo se ha investigado el uso de los residuos de la industria bananera junto con la cascarilla de arroz para la producción del combustible fósil bio-oil y biochar mediante la pirolisis. Este proceso se hace en ausencia de oxígeno con temperatura controlada entre 300 - 600°C, a medida que la temperatura aumenta la materia orgánica se va descomponiendo en agua, gases, alcoholes, ácidos, hidrocarburos líquidos, alquitranes y coque, de igual forma la materia debe tener una desecación previa que retire el exceso de humedad. Los productos resultantes tienen gran potencial de reinsertión en procesos industriales, los gases de pirolisis para la generación de electricidad o en turbinas de gases; el bio-oil como sustituto de los combustibles fósiles, materia prima de productos químicos, resinas, entre otros y el biochar en filtros de agua y aires acondicionados, carbón activo, entre otros [26].

c. Iniciativas de sostenibilidad ambiental

Las altas cantidades de celulosa, hemicelulosa, lignina y otras proteínas le dan gran capacidad de absorbencia a la cascarilla de arroz, de esta forma investigaciones buscan utilizarla para el tratamiento de aguas contaminadas con cromo hexavalente (Cr (VI)) proveniente de curtiembres, en donde el tamaño ideal de la cascarilla debe ser >500 µm después del secado a 90°C y la molienda, y según los resultados la remoción es altamente dependiente del pH, dosificación de la cascarilla, concentración del metal y tiempo de contacto, las mejores condiciones para la máxima remoción fue pH 1%, dosificación de cascarilla 3g/L, concentración contaminante 3g/L y tiempo de contacto 720 min para una remoción del 100% Herrera, et al., [15]. Para la remoción de mercurio se ha usado la cascarilla con un tamaño de partícula de 500 µm (similar al implementado en el cromo), con proceso de secado a 60°C en donde la adsorción estuvo en un 90% con concentración del contaminante de 500 µg/L y de cáscara 0.50 g/L [27]; En los cultivos de arroz contaminados por cadmio (Cd), proveniente de riegos con aguas contaminadas se ha implementado la adición de enmiendas (material carbonado), para comprender la relación de cambio entre los agregados y el alivio de la fitotoxicidad de Cd en el arroz, las cinco enmiendas implementadas mostraron un aumento del pH del suelo, adsorción del Cd con formación de agregados más grandes con más carga contaminante, disminución en la movilidad del Cd en el suelo y disminución del mismo en las plantas de arroz, el aditivo que mayor eficiencia tuvo fue el biocarbón de cáscara de arroz con adición de hierro al mostrar una concentración menor de Cd en el grano de arroz [28]. La investigación realizada por Sibaja [29], agrupa varios estudios realizados para la remoción del Cr por medio de la cascarilla de arroz modificada químicamente, concluye que el mejor uso dado a la cascarilla es el de biomineral de remoción de contaminantes puesto que la combustión de esta biomasa genera polvillo altamente contaminante.

La contaminación del recurso hídrico por colorantes provenientes en su mayoría de la industria textil denota urgencia de tratamiento pues estas sustancias reaccionan químicamente con el solvente transfiriendo su color característico [30], y cuando estos provienen de subproductos

de hidrocarburos aromáticos es más difícil de tratar. Para la remoción del color una investigación demostró que la cascarilla logró remover el 91% del colorante industrial RB46, con un tamaño de partícula entre 0.5 – 0.75 mm con dosificación de 3.0 mg/L, en una concentración del colorante de 20 mg/L, a un pH= 8.0 [31]. La cascarilla resulta atractiva para los métodos de descontaminación pues ha mostrado alta eficiencia, está disponible en grandes cantidades y es económica comparada con los métodos de remoción tradicionales [32].

De igual forma la cascarilla se ha incluido en el tratamiento de agua lluvia con un sistema de filtros de flujo descendente con luffa cylindrical o estropajo. Este tipo de tratamiento estuvo acompañado de análisis fisicoquímicos y biológicos de pH, turbiedad, sólidos disueltos totales, sólidos suspendidos totales, demanda química de oxígeno y coliformes, en donde los resultados encontrados comparados con la resolución 2115 de 2007 que dicta valores máximos permitidos para agua de consumo en Colombia, denotan que esta no es apta para el consumo debido a la descomposición de la cascarilla, sin embargo fue efectiva la remoción de la alcalinidad y dureza [33].

La Cascarilla también es ampliamente utilizada en la preparación de tierras para cultivo y de igual forma en la hidroponía, en donde su principal inconveniente es la homogénea repartición de la humedad, por tanto se realizó la producción hidropónica de tomate con sustratos conformados por combinaciones entre cascarilla cruda o sin procesar, cascarilla quemada en horno, cascarilla quemada a cielo abierto, escoria de carbón, fibra de coco y zeolita, los resultados de mayor calidad en fruto fueron las plantas sembradas en sustrato de zeolita con cascarilla quemada, esto podría darse ya que la combustión permite el fraccionamiento de los compuestos de la cascarilla haciéndolos más asequibles de reacción [34].

Para contribuir con la transición de embaces plásticos no degradables de un solo uso a envases descartables biodegradables, la cascarilla de arroz se plantea como materia prima idónea pues es un cereal que se siembra a lo largo de todo el año y por su dureza. Los ingredientes utilizados en la construcción de un prototipo de recipiente son 100g cascarilla de arroz en polvo, 50 gr de arroz en polvo para formar una goma con de la cocción de este en 150 ml de agua, ácido clorhídrico para el lavado y desinfección de la cascarilla, después de formar la masa y en moldarla se lleva al horno por 20 min a 200°C. El material que se obtuvo fue de similar apariencia a los recipientes convencionales, con resistencia suficiente para soportar el contenido y evitar derrames, espesor entre 0,25cm a 0.5cm, color característico de la cascarilla que brinda aspecto natural y orgánico. Se concluye que entre menor sea la granulometría de la cascarilla mejor es la adhesión y calidad del producto [35].

Un uso adicional de la cascarilla de arroz junto con las cáscaras del maracuyá es el de suplemento dietario en la alimentación bovina por medio de su inoculación con cepas de hongos del género *Pleurotus*, ya que estos aumentan el valor nutricional de materiales como las pajas, pastos y residuos lignocelulosos. El alto contenido de celulosa y hemicelulosa de estos residuos no permite que sus nutrientes sean totalmente aprovechados por los animales, la función del hongo es mejorar su degradabilidad [36].

La cascarilla también se ha implementado en estudios para determinar la reducción de NOx en una cámara de combustión de carbón por medio del proceso de Reburn, el cual busca la inyección de un combustible por encima de la zona de combustión en calderas y hornos industriales, con el fin de reducir la producción de NOx y convertirlos en nitrógeno molecular, esto sucede porque el combustible que se inyecta vuelve a calentar el aire de la caldera reduciendo el aire que favorece la producción de los NOx; los resultados indican que la reducción de los gases contaminantes está determinada por la altura en la que esto son inyectados [37].

La posibilidad de reincorporar las propiedades de un residuo en algún proceso que se ejecute a diario bien sea de la industria o en la cotidianidad de las actividades humanas, permite vislumbrar mejores condiciones de vida en la población futura pues de a poco se iría disminuyendo la carga contaminante que hemos puesto al ambiente. Contribuyendo a esto, se implementó un estudio en donde se quería adherir la cascarilla de arroz como refuerzo al polipropileno reciclado para realizar filamentos en impresiones 3D. El material fue sometido a pruebas de tensión, flexión e impacto en donde su resultado fue negativo pues todas las propiedades mecánicas empeoraron [38].

Por si fuera poco, también se ha estudiado la inserción de la paja del arroz en la industria. Un estudio evidencia que sus cualidades son aptas para la elaboración de papel ya que existen fibras madereras que provienen de los troncos, y las no madereras provenientes de la agricultura, desechos animales y algunos árboles, estas representan el 8% de la materia prima utilizada para la producción de pulpa en el mundo [39]. La disposición tradicional realizada a la paja es la quema en el campo lo cual genera emisiones de contaminantes COx, NOx, SO2 y COV (compuestos Orgánicos Volátiles), y su poda con posterior entierro en donde se genera entre 2.5 y 4.5 veces más metano que al ser quemada [40]. El estudio determinó las características de las propiedades físicas y mecánicas de la paja de arroz y los resultados aconsejan condiciones óptimas de producción de papel de paja de arroz [41].

Todos los procesos que se desarrollan en pro del aprovechamiento de los residuos están dentro del marco de la economía circular, el cual es un modelo de producción que implica reutilizar los productos existentes todas las veces que este y sus compuestos lo permitan logrando extender la vida útil de los productos y cambiando el concepto de la obsolescencia programada y el modelo lineal de consumo – desecho [42]. El Gobierno Nacional de Colombia a través del plan nacional de desarrollo pacto por Colombia, pacto por la equidad 2018 – 2022 establece la ruta para la promoción de la sostenibilidad, cuya premisa es “producir conservando y conservar produciendo” en donde se busca innovar y generar valor en los sistemas de producción y consumo optimizando los recursos, el agua y la energía [43].

El término “Economía circular” fue formulado por David Pearce y Kerry Turner en el libro economía de los recursos naturales y el medio ambiente en el año 1990 donde se explicaba su posible funcionamiento, esto como resultado del movimiento ambientalista iniciado en los años sesenta, por tanto la economía circular propone hacer uso intensivo de los recursos ya extraídos para evitar y parar la sobreexplotación y los daños al medio ambiente, logrando crear más eslabones dentro de las cadenas de valor y promoviendo avances en las tecnologías para la transformación de los subproductos [44].

d. Software de apoyo

Para respaldar el planteamiento y la ejecución de proyectos, investigaciones y actividades basadas en la economía circular existen software que brindan orientación en la implementación de sistemas de energías limpias, dentro de ellos están: ACSOL el cual presenta una colección de programas que calculan prestaciones de sistemas solares térmicos de baja temperatura, este cálculo se basa en el software de simulación TRNSYS [45]; CHEQ4 es un programa informático que permite la aplicación, cumplimiento y evaluación de las exigencias de ahorro de energía

emitidas por el gobierno de España, el cual dependiendo los datos ingresados valida el cumplimiento de la contribución solar mínima exigida, generando un informe para acreditar su cumplimiento [46]; RETScreen es un software de gestión de energías limpias desarrollado por el gobierno de Canadá, cuenta con bases de datos de condiciones climáticas de estaciones terrestres y de datos satelitales de la NASA, permite la medición y verificación del rendimiento de instalaciones y la identificación y evaluación de la viabilidad técnica de proyectos de energía renovable [47] y el software Einstein que brinda auditoría en las industrias de la energía térmica desde la adquisición, procesamiento, diseño y evaluación cuantitativa energética y económica [48]. Este último software descrito es el que se asemeja más al SAM ya que funciona para sistemas de energía térmica, su versión estándar se puede obtener de forma gratuita, aunque hay funciones actualizadas que no lo son, únicamente se puede acceder a su versión demo durante 30 días y como está diseñado para ingreso de datos de grandes industrias no es funcional para todo tipo de proyectos.

El System Advisor Model es un sistema de apoyo para la implementación de proyectos de generación de energía renovable, el cual permite realizar un modelo económico y de rendimiento para sistemas de combustión de biomasa, energía geotérmica, energía marina, energía eólica grande y pequeña, energía térmica convencional de combustibles fósiles, sistemas fotovoltaicos, entre otros; se permitió su uso público desde el año 2007 y fue desarrollado por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) con fondos del Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE) [14], de igual forma las bases de datos de NREL como los atlas de biocombustibles y bioingeniería, y otros, se encuentran disponibles para complementar la información suministrada al sistema [49]. Este software realiza cálculos para determinar el costo de la generación de energía en base a los valores brindados por los usuarios como la configuración física y funcionamiento del sistema, su ubicación y el costo de instalación. Estos datos de ingreso son muy importantes ya que de ellos dependen los resultados arrojados. Las principales entradas en SAM para un sistema de combustión de biomasa según Jorgenson, et al. [49], son el contenido de la humedad, el manejo de la materia prima biomasa, el tipo de sistema de combustión, el porcentaje de exceso de aire alimentado, el número de calderas, el grado de vapor y el factor de sobre diseño de la caldera; los resultados del modelo financiero y del rendimiento del sistema, SAM los presenta de forma estadística en tablas y gráficos, adicional a esto también afirman que SAM realiza comparaciones entre los datos de emisiones de chimeneas de las plantas de energía de combustibles fósiles actuales con las plantas de bioenergía promedio.

Otros modelos de bioenergía requieren una especificidad mayor de datos de ingreso como el factor de capacidad y la tasa de calor, SAM requiere de datos básicos de ingreso entregando datos amplios y de sencilla interpretación, además de su total gratuidad y constantes actualizaciones anuales.

Se pretende implementar SAM en el análisis de la producción de energía por medio de la combustión de la cascarilla de arroz, ya que no hay evidencia de estudios donde se haya aplicado este software en proyectos de ese tipo en Colombia.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las investigaciones que han procurado la caracterización fisicoquímica de la cascarilla de arroz y sus cenizas han obtenido valores muy similares con la variación de unas pocas cifras en algunos de sus datos.

En las áreas rurales colombianas el mayor uso dado a la cascarilla es la combustión con excretas porcinas o bovinas por medio de biodigestores tubulares para la producción de gas metano y su uso en la cocción de los hogares, ya que su montaje e implementación es sencilla, de bajo costo y hay abundancia de residuos aprovechables [50].

Aunque la combustión en los biodigestores sea más asequible, la quema de la cascarilla garantiza mayor agilidad en el tratamiento del residuo y a su vez generaría como residuo la ceniza, está por su alto contenido en sílice tiene potencial ser utilizada como aditivo en los estudios analizados.

Hay un número significativo de investigaciones aplicadas a la descontaminación del agua gracias a las propiedades adsorbentes de la cascarilla en las que el común denominador es el tamaño en el que se dio más eficiencia de adsorción (500 μm).

Se difiere de la conclusión dada por Sibaja [29], quien dice que la mejor implementación de cascarilla es la biorremediación porque la combustión genera grandes cantidades de polvillo, en efecto si son generados pero los sistemas de cantera cuentan con procedimientos específicos para controlar este residuo.

Según la consultada realizada, en nuestro país SAM se ha utilizado en su gran mayoría para proyectos de generación de energía fotovoltaica y también hay algunos registros de su uso en proyectos de generación de energía geotérmica, en los cuales su implementación ha sido crucial para justificar la incursión en la obtención de energía por medio de fuentes renovables, con lo cual, la simulación técnico – económica realizada en SAM del sistema de generación de energía geotérmica en el Volcán Cerro Machín permite analizar que su nivel de producción anual es menor al de las centrales hidroeléctricas, pero a su vez las alteraciones medio ambientales disminuyen significativamente al no generar desplazamiento de poblaciones colindantes con la hidroeléctrica ni modificación de los cauces, fauna y flora de la zona [51]. En los sistemas solares fotovoltaicos SAM se ha ejecutado como un analizador del desempeño en proyectos puestos en marcha, pues ha permitido corregir errores en la distribución espacial de los paneles solares, comprensión de la incidencia de los datos climatológicos e importancia de la configuración de los equipos que conforman las plantas solares [52].

La investigación bibliográfica realizada demuestra que en Colombia la mayoría de las simulaciones realizadas en el System Advisor Model (SAM) están relacionadas con proyectos para la generación de energía solar fotovoltaica; SAM en los proyectos estudiados cumplió la función de corrector de ineficiencias en proyectos ya implementados y de pronóstico para futuros sistemas de aprovechamiento de energías limpias.

V. CONCLUSIÓN

Aunque son varias las especies de arroz cultivadas y modificadas para aumentar su adaptabilidad en los diferentes entornos y condiciones ambientales [53], cada una de ellas cuenta con la protección de la cascarilla, por lo tanto, el aprovechamiento y buena disposición de este residuo es de motivación e importancia mundial al ser uno de los alimentos esenciales en la dieta alimentaria de los humanos pues proporciona más calorías por hectárea comparado con los demás cereales cultivados, como consecuencia de esto, grandes cantidades de material de desecho se continúan produciendo a diario.

El System Advisor Model es de fácil manejo porque cuenta con diversos manuales para su ejecución, pero se debe tener especial atención al inequívoco registro de los datos de ingreso para que los resultados arrojados denoten las predicciones correctas

El poder calorífico y humedad son los principales determinantes de la eficiencia del proceso de combustión.

La reutilización de los recursos irá cobrando mayor importancia a medida que aumente de la población, esto como respuesta a la necesidad de abastecimiento de aquellos recursos explotados sin medida, como lo es la arena [54], cuya su presencia es crucial para las actividades de construcción; de este modo el aprovechamiento de la sílice contenida en la cascarilla de arroz mitigaría y/o complementaría en algunas zonas la costosa obtención de este material.

La ceniza generada en el proceso de combustión de la cascarilla se podría comercializar por su alto contenido en sílice, con esto se estaría dando solución a los problemas que generan estos dos tipos de residuos por lo tanto sería un proceso con cero emisiones.

Aun no se han realizado investigaciones o recopilación de los diferentes estudios en donde se indique cuál es la forma más eficiente de aprovechamiento de la cascarilla, aunque según lo consultado la cascarilla hace muy buenos aportes en los diferentes procesos donde se ha incluido.

VI. REFERENCIAS

- [1] Forbes “Colombia”, ccb.org.co. 2018. [En línea]. Disponible: <https://www.ccb.org.co/Clusters/Cluster-de-Energia-Electrica/Noticias/2021/Febrero/Historico-Colombia-lidera-transicion-energetica-en-Latinoamerica>.
- [2] M. Pinciroli, N.R. Poncio y M. Salsamendi, “El Arroz: alimento de millones”, Buenos Aires, Argentina: Universidad Nacional de la Plata, 2015.
- [3] S. Mohanty, “Trends in global rice consumption”, Rice Today, 44. Fedearroz. 2013. [En línea]. Disponible: http://books.irri.org/RT12_1_content.pdf.
- [4] Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE]. 23 de 10 de 2021. [En línea]. Disponible: <https://fedearroz.com.co/es/fondo-nacional-del-arroz/investigaciones-economicas/estadisticas-arroceras/consumo/>.
- [5] DANE.. Departamento Administrativo Nacional de Estadística. 10 de 08 de 2021. [En línea]. Disponible: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/encuesta-de-arroz-mecanizado>.
- [6] M. Gaviria, “Repositorio Universidad Pontificia Bolivariana”, 2018. [En línea]. Disponible: https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/5531/digital_37276.pdf?sequence=1
- [7] J. Díaz, “Red de Repositorios de Acceso Abierto del Ecuador”, 1991. [En línea]. Disponible: <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/41779>.
- [8] M. Echeverría y O. Lopez, “Biblioteca digital Escuela Politécnica Nacional, Quito”, 2010. [En línea]. Disponible: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/2058>.
- [9] J. Varon, “Diseño, construcción y puesta a punto de un prototipo de quemador para la combustión continua y eficiente de la cascarilla de arroz”, Cali: Universidad Autónoma de Occidente, 2005. [En línea]. Disponible: <https://dspace-uao.metacatalogo.com/handle/10614/269>
- [10] A. Valverde, B. Sarria y J. Monteagudo, “Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz”, Scientia Et Technica, 1(37), 2007.
- [11] I. García-Arboleda y V. Juanillo-Sinisterra, “Reconocimiento y revelación de los impactos ambientales generados por el desarrollo de la actividad económica de la empresa arrocera la Esmeralda S.A.S”, Universidad del Valle, 2020.
- [12] Y. Rodríguez, M. Reyes y N. Espinosa, “Sencilbilizar a los arroceros del municipio de Arauca (Arauca) acerca del impacto ambiental en la producción de arroz”, Universidad Cooperativa de Colombia, 2015. [En línea]. Disponible: <https://repository.ucc.edu.co/handle/20.500.12494/268>.
- [13] A. Ortega y M. Quispe, “Alternativas del uso de la cascarilla de arroz como fuente energética”, Revista Fuente, El reventón energético, 19(2), 69-81, 2021. [En línea]. Disponible: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistafuentes/article/view/12981>.
- [14] P. Gilman, N. DiOrio, S. Janzou, T. Neises, J. Freeman, M. Wagner y N. Blair, “National Renewable Energy Laboratory”, 2018. [En línea]. Disponible: <https://www.nrel.gov/docs/fy18osti/70414.pdf>.
- [15] G. Herrera, A. Anaguano y D. Suarez, “Cascarilla de arroz: material alternativo y de bajo costo”, Gestión y ambiente, 2011. [En línea]. Disponible: <https://www.redalyc.org/pdf/1694/169422215006.pdf>.
- [16] H. Andrade, O. Campo y M. Segura, “Huella de carbono del sistema de producción de arroz (Oryza sativa) en el municipio de Campoalegre, Huila, Colombia”, Ciencia y tecnología agropecuaria, 2014.
- [17] Mai-Thao, K. Kurisu y K. Hanaki “Greenhouse gas emission mitigation potential of rice husks for An Giang province, Vietnam”, Biomass and Bioenergy, 2011. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/225285503_Greenhouse_gas_emission_mitigation_potential_of_rice_husks_for_An_Giang_province_Vietnam
- [18] L. Gutierrez y L. Ochoa, “repository.usta.edu.co.” 2019. [En línea]. Disponible: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/18402/2019catalinagutierrez?isAllowed=y&sequence=6>.
- [19] J. Solano, “Implementación de un horno quemador con sistema de automatización y control incorporado para las agroindustrias arroceras de la ciudad de Barranquilla utilizando como combustible cascarilla de arroz”, Universidad Simón Bolívar, 2021. [En línea]. Disponible: <http://bonga.unisimon.edu.co/handle/20.500.12442/8081>.

- [20] G. Salgado, "Alorización energética de residuos agrícolas: cáscara de plátano, cascarilla de arroz y bagazo de caña mediante procesos de biodigestión y combustión", Escuela Politecnica Nacional del Ecuador, 2020. [En línea]. Disponible: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20707>
- [21] C. Arcos, D. Macías y J. Rodríguez, "La cascarilla de arroz como fuente de SiO₂", Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, núm. 41, 7 – 20, 2007.
- [22] B. Juárez, "La utilización de cáscara de arroz bajo el proceso de calcinación controlada como puzolana artificial en el diseño de morteros para acabados", Universidad de San Carlos de Guatemala, 2008. [En línea]. Disponible: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3424_C.pdf
- [23] A. Rodríguez y M. Tibabuzo, "Evaluación de la ceniza de cascarilla de arroz como suplemento al cemento en mezclas de concreto hidráulico", Universidad Santo Tomas. 2019. [En línea]. Disponible: <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/15589>
- [24] E. Pérez, y J. Ochoa, "Análisis comparativo de la resistencia a la compresión de un mortero adicionado con ceniza de cáscara de arroz con respecto a un mortero patrón de calidad f'c= 175 kg/cm²", Perú: Universidad Nacional de Ucayali, 2021.
- [25] Y. Piñeros, G. Velasco, J. Proaños, W. Cortes y I. Ballesteros, "Producción de azúcares fermentables por hidrólisis enzimática de cascarilla de arroz pretratada mediante explosión con vapor". Revista ION, 23-28, 2011. [En línea]. Disponible: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-100X2011000200004
- [26] E. Lam, "Producción potencial de bio oil y biochar por pirólisis de residuos de Banano y Arroz", UTMACH, Facultad De ciencias Químicas Y De La Salud, Machala, 2021.
- [27] L. Rocha, C. López, A. Duarte y E. Pereira, "A cost-effective and eco-friendly treatment technology to remove realistic levels of mercury by means of the unmodified rice husk", E3S Web of Conferences, 2013.
- [28] S. Li, M. Wang, Z. Zhao, X. Li y S. Chen, "Use of soil amendments to reduce cadmium accumulation in rice by changing Cd distribution in soil aggregates", Environmental Science and Pollution Research, 2019.
- [29] C. Sibaja, "Identificación de las aplicaciones de la cascarilla de Arroz en tratamiento de Cromo (VI) en aguas residuales en el departamento de Casanare", Universidad Nacional Abierta Y A Distancia – UNAD, 2020. [En línea]. Disponible: <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/38805>
- [30] D. Marcano, "Introducción a la química de los colorantes", Colección Divulgación Científica y Tecnológica, Caracas, Venezuela: Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales, 2018.
- [31] M. Herazo, A. Aleman y A. Hormaza, "Remoción de rojo básico de un efluente textil simulado: un caso de aplicación de la cascarilla de arroz", Producción + limpia, Vol. 6, 2011.
- [32] O. Llanos, A. Ríos, C. Jaramillo y L. Rodríguez, "La cascarilla de arroz como una alternativa en procesos de descontaminación. Producción + limpia", Vol. 11. 2016. [En línea]. Disponible: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552016000200013
- [33] A. Suárez, P. Mesa, V. Bravo y A. Prieto, "Evaluación de un sistema de filtros de cascarilla de arroz y luffa cylindrica para el tratamiento de aguas lluvias", Revista Mutis, vol. 5, 21 – 27, 2015. [En línea]. Disponible: <https://revistas.utadeo.edu.co/index.php/mutis/article/view/1015>
- [34] M. Peña, F. Casiera y O. Monsalve, "Producción hidropónica de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en cascarilla de arroz mezclada con materiales minerales y orgánicos", Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas, vol 7, 2013. [En línea]. Disponible: https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ciencias_hortícolas/article/view/2236/2194
- [35] A. Avalos y I. Torres, "Modelo de negocio para la producción y comercialización de envases biodegradables a base de cascarilla de arroz", Universidad de Piura, Perú, 2018. [En línea]. Disponible: <https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/3459>
- [36] V. Florencia, "Composición química y degradabilidad ruminal in situ de la cáscara de maracuyá y cascarilla de arroz inoculadas con cepas de hongos *Pleurotus ostreatus* y *sapidus*. Finca experimental "La María", Mocache, 2013." Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador. 2013. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.uteq.edu.ec/bitstream/43000/4369/1/T-UTEQ-0041.pdf>
- [37] C. Pedraza, "Estudio del efecto de la cascarilla de arroz en la generación de NO_x en una cámara de combustión por medio del proceso Reburn". Universidad de los Andes, 2016. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/14689>
- [38] M. Andrade, "Influencia de un tratamiento alcalino superficial en la resistencia y adhesión entre la cascarilla de arroz y polipropileno reciclado en un filamento de impresión 3D.", Universidad de Los Andes, 2021. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/53975>
- [39] A. Guerra, "Propuesta de aprovechamiento de la paja de arroz en la elaboración de papel en el departamento de Lambayeque". Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, Perú, 2021. [En línea]. Disponible: <https://tesis.usat.edu.pe/handle/20.500.12423/3554>
- [40] D. Abril, E. Navarro y A. Abril, 2009. "La paja de arroz. Consecuencias en su manejo y alternativas de aprovechamiento", Agronomía, 69 - 79. [En línea]. Disponible: <https://www.researchgate.net/profile/Jairo-Zapata>
- [41] U. Polyium, T. Boonyaratakalin y S. Wichiranon, "Characterization of Physical and Mechanical Properties of Bleaching Paper from Rice Straw", Applied Mechanics and Materials, 3 – 8, 2019.
- [42] Parlamento Europeo. "Economía circular: definición, importancia y beneficios", 16 de 02 de 2021. [En línea]. Disponible: <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/economy/20151201STO05603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios>
- [43] Cancillería de Colombia, "cancilleria.gov.co", (s.f.). [En línea]. Disponible: <https://www.cancilleria.gov.co/economia-circular>
- [44] V. Prieto, C. Jaca y M. Ormazabal, "Economía circular: Relación con la evolución del concepto de sostenibilidad y estrategias para su implementación", Investigaciones en Ingeniería, 85 – 95, 2017. [En línea]. Disponible: https://dadun.unav.edu/bitstream/10171/53653/1/Economia_Circular.pdf
- [45] C. Cisneros y E. Muñoz, "Comportamiento energético del calentamiento solar de agua sanitaria en edificaciones", Revista Cubana de Ingeniería, vol. XII, 2021. [En línea]. Disponible: <https://rci.cujae.edu.cu/index.php/rci/article/view/766>
- [46] CHEQ4, "cheq4.edae.es", (s.f.) [En línea]. Disponible: <https://cheq4.idae.es/>
- [47] Reep.org. reep.org., 2013. [En línea]. Disponible: <https://www.reep.org/news/retscreen-suite-software-issues-update>
- [48] Einstein thermal energy. einstein-energy.net., 2019. [En línea]. Disponible: <https://www.einstein-energy.net/index.php/about-einstein>
- [49] J. Jorgenson, P. Gilman y A. Dobos, nrel.gov., 2011. [En línea]. Disponible: <https://www.nrel.gov/docs/fy11osti/52688.pdf>
- [50] C. Rojas, repository.usta.edu.co., 2020. [En línea]. Disponible: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/22656/Documento%20de%20Trabajo%20N%C2%B0%20S01.%20Determinacio%CC%81n%20del%20potencial%20de%20bioga%CC%81s%20de%20diferentes%20sustratos%20para%20la%20codigestion%20anaerobia%20con%20excretas%20animal>

- [51] H. Rodríguez, “repositorio.ecci.”, 2020. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.ecci.edu.co/handle/001/969>
- [52] V. Castro, “repositorio.uniandes”, 2020. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/48936/u833597.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [53] M. Acevedo, W. Castrillo y U. Belmonte, “Origen, evolución y diversidad del arroz”, *Agronomía Tropical*, 56, 151-170, 2006. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/262462682_Origen_evolucion_y_diversidad_del_arroz
- [54] I. Wrede, *dw.com.*, 25 de 06 de 2019. [En línea]. Disponible: <https://www.dw.com/es/hay-escasez-de-arena-en-el-mundo/a-49353855>.