



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**Valorización energética de residuos orgánicos sólidos
con revisión previa de la metodología UPME.**

Autor

Sammy Anderson Escudero Zapata

Universidad de Antioquia

Departamento de Ingeniería Mecánica

Medellín, Colombia

2020



Valorización energética de residuos orgánicos sólidos con revisión previa de
la metodología UPME.

Sammy Anderson Escudero Zapata

Informe de semestre de industria presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Mecánico

Asesores (a):

Juan Fernando Pérez Bayer, Ing. Mecánico

Enrique Posada Restrepo, Ing. Mecánico

Línea de Investigación:

Línea Energética

Empresa:

HATCH SAS

Universidad de Antioquia
Departamento de Ingeniería Mecánica
Medellín, Colombia

2020.

Contenido

Resumen	3
1. Introducción.....	3
2. Metodología.....	4
3. Resultados y análisis	14
3.1. Resultados de la revisión instructivo (Archivo PDF)	14
3.2. Resultados de la revisión del código fuente	17
3.2.1. Oportunidades de mejora código FormAgregarMun.....	17
3.2.2. Oportunidades de mejora código Modulo1.....	20
3.3. Resultados y análisis de la revisión termodinámica	22
3.4. Resultados y análisis de la comparación entre metodologías WtoE.	26
3.4.1. Metodología UPME.....	27
3.4.2. Metodología propuesta por el estudiante.	28
4. Conclusiones	31
5. Recomendaciones para trabajos futuros.....	32
Anexos.....	33
Bibliografía.....	34

Figura 1. Parámetros del análisis próximo utilizados en la metodología UPME. (INERCO, 2018)	6
Figura 2. Parámetros del análisis próximo consignados en el artículo UNAL. (UNAL; TECSOL, 2018)	7
Figura 3. Producción de biogás por unidad másica de biomasa ingresada.	9
Figura 4. Tasa de producción de biogás de las diferentes biomasa. (UNAL; TECSOL, 2018).....	9
Figura 5. Tasa de producción de biogás del estiércol porcino. (UNAL; TECSOL, 2018)	10
Figura 6. Cantidad de biomasa ingresada a los aplicativos para la comparación de sus resultados. (INERCO, 2018).....	13
Figura 7. Poder calorífico de las biomasa presentes en el aplicativo UPME. (INERCO, 2018)	15
Figura 8. Escenarios propuestos por INERCO. (INERCO, 2018).....	16
Figura 9. Programación de la alerta de ingreso del municipio.	18
Figura 10. Programación de las restricciones al usuario.....	19
Figura 11. Única restricción impuesta por el aplicativo.	19
Figura 12. Programación de la rutina de asignación de la población a cada municipio ingresado.	20
Figura 13. Asignación de datos poblacionales en el aplicativo original.....	20
Figura 14. Comparación entre las dos versiones de las rutinas "Ocultar".	21

Figura 15. Programación de la rutina de comparación con el diagrama Tanner.	22
Figura 16. Comparación entre la producción de biogás teórica y la presentada en el aplicativo UPME.	25
Figura 17. Cantidad de biomásas ingresadas a los aplicativos de ambas metodologías.	27
Figura 18. Resultados de generación de biogás obtenidos en la metodología UPME.	28
Figura 19. Resultados económicos para la metodología UPME.....	28
Figura 20. Resultados de generación de biogás obtenidos con la metodología del proyecto de práctica.....	29
Figura 21. Resultados económicos para la metodología del proyecto de práctica.	29

<u>Tabla 1. Análisis último de algunas de las biomásas que utiliza la metodología UPME.</u>	11
<u>Tabla 2. Coeficientes moleculares empíricos y de reacción estequiométrica.</u>	23
<u>Tabla 3. Resultados parámetros de producción de biogás.</u>	24
<u>Tabla 4. Comparación de la producción de biogás.</u>	24
<u>Tabla 5. Comparación entre metodologías de cálculo.</u>	30

Resumen

La metodología de valorización energética de residuos sólidos ofertada por la UPME ha sido sometida a una revisión, cuyo objetivo principal yacía en identificar oportunidades de mejora desde dos puntos de vista específicamente: Los criterios de ingeniería aplicados a la estimación de la cantidad de energía disponible para extraer de los residuos sólidos, y la relación del ejecutable con el usuario. Esta revisión es principalmente teórica y se llevó a cabo mediante el estudio de los parámetros de cálculo internos del aplicativo y de su código fuente, el cual está escrito en lenguaje Visual Basic Excel. Consecuentemente, al tratarse de un proyecto fundamentalmente teórico, fue necesaria la consulta de las fuentes de información que utilizó la empresa creadora del aplicativo, para utilizarlas como punto de comparación para los cálculos realizados en el proyecto. Así pues, se encontró que los resultados que entrega el aplicativo difieren con respecto a lo que dicta la teoría, influenciado principalmente por los valores asignados en el aplicativo a los parámetros que resultan del análisis próximo de las muestras. Adicionalmente, se encontraron oportunidades de mejora en el código fuente del aplicativo, las cuales se presentaron como el punto de partida para las modificaciones implementadas al aplicativo.

1. Introducción

El mayor problema que enfrenta la humanidad en la actualidad radica en resolver la contradicción entre alimentar un estilo de vida con demandas energéticas sin precedentes, mientras al mismo tiempo se mantienen constantes y/o se reduzcan las emisiones de gases de efecto invernadero que están contribuyendo al aumento significativo de las temperaturas promedio en todas las latitudes del planeta. Para alcanzar la armonía entre los dos puntos descritos, se plantean diversas posibilidades que van desde el desarrollo de tecnologías novedosas de producción de energía, hasta el mejoramiento general de los medios de

producción de energía convencionales, de los cuales se han dependido desde épocas antiguas.

Convenientemente, se tienen algunos métodos generadores relativamente nuevos, que se están posicionando como técnicas que permitirían aprovechar energéticamente recursos que antes eran considerados como desechos, permitiendo a su vez complementar y mejorar los métodos convencionales que tienen una presencia importante en las matrices energéticas de los diferentes países del mundo.

Una de las técnicas de generación de energía eléctrica que se ajusta a la descripción del párrafo anterior es la que se lleva a cabo explotando los desechos orgánicos que produce el desarrollo normal de la actividad humana. Este método de aprovechamiento de los desechos es el objeto principal de este proyecto de práctica. Así, se ha revisado la metodología propuesta por la UPME (*Unidad de Planeación Minero-Energética*) para la determinación de la pertinencia de esta clase de proyectos en el caso particular de cada uno de los municipios colombianos. Esta metodología WtoE usa como datos de entrada la cantidad de residuos sólidos producidos por una población o un conjunto de poblaciones.

La revisión se llevó a cabo mediante el estudio de los documentos, tanto ejecutables como de lectura, que la UPME presenta en su página web permitiendo la modalidad de descarga libre. Los documentos que tienen mayor relevancia para la realización del proyecto de practica son dos principalmente: Un archivo de lectura en formato PDF de unas 230 páginas de extensión, el cual hace las veces de instructivo del ejecutable; y un archivo y/o hoja de cálculo de Excel, el cual tiene como objetivo ser el instrumento mediante el cual las administraciones municipales, entes gubernamentales y/o de saneamiento, pueden realizar estimaciones de la cantidad de energía disponible en los residuos sólidos orgánicos.

La revisión realizada al archivo ejecutable de Excel estuvo orientada hacia el estudio detallado del código fuente de este, identificando oportunidades de mejora en la relación del programa con el usuario, en el ingreso de datos y en el funcionamiento general. Similarmente, pero de manera más importante, se buscaron oportunidades de mejora en los valores de las propiedades termodinámicas y químicas de los residuos sólidos. Estos son importantes porque a partir de ellos, y del flujo volumétrico de residuos, se calcula la cantidad de energía aprovechable por una determinada planta de valorización.

2. Metodología

Lo primero que se debe tener en cuenta acerca de la realización del proyecto de práctica es que se llevaron a cabo actividades en esencia teóricas, en el cual no se realizaron experimentos de ningún tipo. Por ello no se utilizaron equipos de laboratorio ni se realizó toma de medidas de ninguna clase. De esta manera se explica que las mejoras propuestas sean también de esta misma naturaleza. Este hecho se ha dejado claro en los objetivos que se plantearon de manera previa al inicio de los trabajos correspondientes al proyecto.

Se presentarán en este informe oportunidades de mejora encontradas en los documentos mencionados en la introducción, aunque se hará énfasis en aquellas presentes en el archivo de Excel (al que se hace alusión como ejecutable o aplicativo) porque allí es donde se hayan los cálculos que permiten conocer la pertinencia de esta tecnología en determinado contexto municipal.

Con respecto a las oportunidades de mejora identificadas en el instructivo, se presentarán aquellas que se consideren significativas a la hora de evaluar la claridad de un documento oficial, para uso público, que pretende ser la guía para la utilización de un aplicativo que tiene como objetivo ser un punto de referencia en la toma de decisiones que afectan el porvenir de una población, tanto económica como ambientalmente. En este sentido, la sección dedicada al instructivo contendrá oportunidades de mejora que se recomienda adoptar directamente.

En lo referente a las oportunidades de mejora relacionadas con el código fuente del aplicativo se realizaron varios cálculos con valores aleatorios de cantidad de residuos sólidos. Esto con el ánimo de identificar la manera cómo funcionaba el archivo de manera general, así como determinar la manera como relacionaba y utilizaba los datos ingresados por el usuario. El primer paso para identificar estas dos características de la metodología UPME consistió en la habilitación (mostrar) los libros de calculo que estaban ocultos, ya que de manera genérica vienen escondidos en el archivo original. Posteriormente, se habilitó la pestaña de programador de Excel, la cual permite modificar las macros (rutinas) con las que estaba construido el aplicativo.

Sin embargo, debido a la naturaleza de esta parte de la revisión, se discutirá más ampliamente cuando se presenten los resultados en las secciones posteriores. Es importante reconocer que para desarrollar esta parte del proyecto de practica fue necesario utilizar habilidades de programación de alto nivel, en el lenguaje Visual Basic, como se mencionó en la introducción.

Con respecto a lo relacionado con las propiedades termodinámicas, químicas y energéticas de los residuos sólidos, se realizó una comparación entre los resultados obtenidos en la versión original del aplicativo, y la versión que utiliza la forma de cálculo propuesta en este proyecto de práctica.

Para reconocer la forma en que se abordó el tema de las propiedades termodinámicas de los residuos sólidos y su relación con la estructura del aplicativo, es necesario reconocer su estructura y su fuente bibliográfica. Lo primero que se debe tomar en cuenta radica en que todos los valores de referencia fueron tomados de un artículo elaborado por la Universidad Nacional y un ente privado llamado TECSOL. El artículo se titula *Estimación del potencial de conversión a biogás de la biomasa en Colombia y su aprovechamiento* (UNAL; TECSOL, 2018) . Este hace parte de los anexos que se entregan con este informe.

Del artículo mencionado, el aplicativo toma los valores principales para el cálculo de disponibilidad energética de los residuos sólidos. Esto se hace en los libros de cálculo con nombre M2 y M3 principalmente. En la **Figura 1** se muestran los valores asumidos por la

UPME para el porcentaje de humedad y el porcentaje de material volátil, datos que son obtenidos a partir de la realización de un análisis próximo. Se debe destacar que en el aplicativo no se presentan en ningún momento datos de análisis último o elemental.

Además, se nota que la cantidad de biomasa en las columnas de la derecha son cero debido a que el archivo esta “virgen” y no se le ha ingresado ningún dato.

Cantidad de Biomasa disponible por tipo de tecnología								
N	Sector	Biomasa	% MV	% Humedad	Tecnología mas empleada		Oferta biomasa, ton/año	
					Térmica	Biológica	Térmica	Biológica
Pecuario								
1	Avícola	Estiércol	43	60%		X		0
2	Porcícola	Estiércol	47	70%		X		0
3	Bovino	Estiércol	60,5	75%		X		0
Agrícola								
4	Arroz	Paja	82	8%	X	X	0	0
5	Banano	Fruta Rechazo	82	94%		X		0
6	Café Pulpa	Pulpa		80%		X		0
7	Café Mucigalo	Mucilago		80%		X		0
8	Maíz	Caña	82	8%	X	X	0	0
9	Palma de Aceite	RFF		10%	X	X	0	0
10	Plátano	Fruta Rechazo	82	94%		X		0
11	Caña de Azúcar	Bagazo	82	8%	X		0	
12	Caña Panelera	Bagazo	82	8%	X		0	
Urbano								
13	RSU	RSOU	51	55%		X		0
14	Lodos PTAR	Lodos		97%		X		0
Suma				#DIV/0!			0	0

Figura 1. Parámetros del análisis próximo utilizados en la metodología UPME. (INERCO, 2018)

En la **Figura 1** también se nota como el aplicativo utiliza solamente el dato de cantidad de humedad para determinar si una biomasa es apta o no para aprovechamiento mediante una tecnología térmica.

De estos valores consignados en el libro M2, se reconoce que las cantidades son diferentes a las consignadas en el artículo que ellos citan como fuente principal, como se puede apreciar a partir de las dos columnas resaltadas en la **Figura 2**.

Biomasa	Residuo	Humedad (%)	Sólidos secos (%)	Cenizas (%)	Sólidos volátiles (%)
Pasto	Residuos de poda	80	1,49	0,25	1,4
Banano	Banano de rechazo	70	10,7	0,50	10,26
Palma de aceite	agua lagunas de oxidación	95,16	4,84-4,97	0,73-1,19	3,8-4,1
Bovino	Estiércol	50	12,8	1,30	11,48
Gallinaza	Estiércol	30	27,1-41,8	3,17-21,4	20,31- 23,98
Porquinaza	Estiércol	30	17,7	3,28	14,42
RSU	RSUO	70	7,7	0,5-1,39	7,32
PTAR	lodos	95,61	4,4	1,39	3,00
destilería	Vinazas	70,63	29,4	7,33	22,05
Industria cervecera	Residuos de macerado	60	28	0,69	29,23

Figura 2. Parámetros del análisis próximo consignados en el artículo UNAL. (UNAL; TECSOL, 2018)

Los datos consignados en la **Figura 2** presentan una oportunidad de mejora en cuanto a su orden y presentación, fue necesario entrar a estudiar la manera en que se realiza un análisis próximo y como se obtienen y presentan los resultados obtenidos. El procedimiento de la realización del análisis próximo es el siguiente:

En la realización de un análisis próximo, lo primero que se hace es que se lleva la muestra a una temperatura de 104°C, a presión atmosférica. Esta acción provoca que el *agua libre* (*agua cuya molécula no está ligada a otras sustancias*) presente el cambio de estado conocido como ebullición. En este paso del análisis próximo se obtienen dos datos, el porcentaje de humedad y el porcentaje de sólidos secos. El segundo es complementario al primero, es decir, el porcentaje de sólidos secos es el remanente de la muestra a la cual se le retiró el porcentaje de humedad.

De los datos presentados en la **Figura 2**, se reconoce que las únicas biomásas que cumplen con la premisa del anterior párrafo son la palma de aceite (*95,16% humedad; 4,84% sólidos secos*) y los lodos de la PTAR (*95,61% humedad; 4,4% sólidos secos*). Las biomásas restantes no cumplen con la premisa pues la suma entre su porcentaje de sólidos secos y porcentaje de humedad no es la totalidad de la muestra (100%).

El siguiente paso en la realización de un análisis próximo es llevar la muestra a una temperatura que oscila entre 100 y 200°C, eliminando las partículas de *agua combinada o aguas recristalizada*. Esta agua combinada se encuentra principalmente en sales de diferentes elementos químicos, pero no se incluye en el porcentaje de humedad de la muestra.

Luego viene la determinación de la cantidad de sólidos secos volátiles en la muestra. Esta se realiza en dos etapas. La primera de ellas es la determinación de la cantidad de sólidos volátiles orgánicos (también llamada *carbón orgánico*), cuyo contenido se obtiene al llevar la muestra a temperaturas $\leq 400^{\circ}\text{C}$; la segunda etapa consiste en la determinación de la cantidad de CO_2 y otros volátiles inorgánicos, cuyo contenido se obtiene al llevar la

muestra a temperaturas aproximadas de 800°C. Estos volátiles inorgánicos se presentan principalmente como carbonatos.

Posteriormente se obtiene la cantidad de carbono fijo. Aquí se busca oxidar todo el carbono fijo para calcularlo a partir del material inerte que queda como producto de la oxidación, cuantificando las fracciones másicas a partir del remanente del proceso de combustión. En esta fase de oxidación se utiliza la cantidad de aire estequiométrica como mínimo para garantizar que se queme la totalidad del combustible. Generalmente se trabaja con cantidades de aire superiores a la estequiométrica para efectos de refrigeración de los equipos y para evitar que se presente combustible sin quemar.

La cantidad de materia remanente se conoce con el nombre de ceniza. Esta ceniza es un material muy estable que se puede aprovechar como agregado en la industria de la construcción, tanto en cementos, concretos y pavimentos (Lynn, Municipal incinerated bottom ash (MIBA) characteristics and potential for use in road pavements, 2016); (Li, Hao, & Chen, Analysis of MSWI bottom ash reused as alternative material for cement production, 2016).

Así, después de la comprensión de todas estas etapas, se hace necesario que los datos sean agrupados o tabulados con ciertas distinciones. Primeramente, se debe aclarar en el artículo si los porcentajes entregados están calculados en base seca (tomando el contenido de sólidos secos como el 100% en los cálculos), o en base húmeda (tomando la totalidad de la muestra como el 100% en los cálculos). La tendencia identificada mediante la lectura de diferentes artículos de investigación es aportar el dato del porcentaje de humedad en base húmeda, mientras que los restantes porcentajes se presentan en base seca.

Por consiguiente, se hace necesario que el aplicativo UPME utilice como fuente primaria de información una en la que se entregue claridad respecto de la forma de calcular los diferentes porcentajes de composición de la biomasa. Adicionalmente, cuando se utilice una fuente información, se debería cumplir con que los datos utilizados coincidan con los de la fuente.

En la **Figura 3** se presenta el contenido principal del libro de cálculo del aplicativo llamado M3. Aquí el dato principal utilizado es la producción de biogás por tonelada ingresada de biomasa. Como se ha mencionado brevemente con anterioridad, el aplicativo de la UPME está muy orientado hacia la valorización energética mediante tecnologías biológicas, específicamente la digestión anaeróbica.

N	Sector	Biomasa	Tecnología mas empleada		Biogás		Térmico - PCI		
			Térmica	Biológica	m ³ biogás / Ton biomasa	m ³ /año	Kcal/Kg seco	MJ/Kg seco	TJ/año
Pecuario									
1	Avícola	Estiércol		X	60	3.000.000	2.946,5	12,3	-
2	Porcícola	Estiércol		X	40	2.000.000	5.106,0	21,4	-
3	Bovino	Estiércol		X	40	2.000.002	3.421,3	14,3	-
Urbano									
4	Arroz	Paja *	X	X	73	3.650.000,00	3.358,0	14,1	646,7
5	Banano	Fruta Rechazo		X	4,6	230.000,00	2.109,7	8,8	-
6	Café Pulpa	Pulpa		X	25	1.249.998,65	4.357,7	18,2	-
7	Café Mucilago	Mucilago		X	74	3.705.456,90	-	-	-
8	Maíz	Caña **	X	X	55	2.750.000,00	3.727,0	15,6	717,8
9	Palma de Aceite	RFF	X	X	20	1.000.000,0	4.094,3	17,1	771,4
10	Plátano	Fruta Rechazo		X	1,5	75.398	1.920,0	8,0	-
11	Caña de Azúcar	Bagazo ** **	X		0,17	0,00	4.070,0	17,0	783,9
12	Caña Panelera	Bagazo	X		0,16	0,00	4.049,0	17,0	779,8
Urbano									
13	RSU	RSOU		X	66	3.300.000	3.772,0	15,8	-
14	Lodos PTAR **	Lodo humedo crudo al 99% de humedad		X	55	2.750.000,0	0,00	0,00	-
Total:						25.710.855			3.699,6

Fuente: Estimación potencial de conversión a Biogás de la Biomasa en Combia y su aprovechamiento. UNAL. 2018.

Figura 3. Producción de biogás por unidad másica de biomasa ingresada.

La oportunidad de mejora identificada en este libro de cálculo del aplicativo radica en que, debido a que el artículo UNAL también cuenta con fuentes bibliográficas, existe una disparidad entre los tres grupos de datos (Fuentes bibliográficas UNAL, artículo UNAL, aplicativo UPME). Este hecho se puede apreciar cuando se observan las **Figuras 4 y 5**. En ellas se presentan los datos que recoge el artículo de la UNAL a partir de sus fuentes, y los datos que presentan las fuentes bibliográficas primarias respectivamente.

Sector	Unidades	Factor	Fuente
Avícola	Biogás m ³ /t estiércol	60	(CUBA SOLAR, 2017)
Porcino	Biogás m ³ /t estiércol	40	(CUBA SOLAR, 2017)
Bovino	Biogás m ³ /t estiércol	40	(CUBA SOLAR, 2017)
Arroz	Biogás m ³ /t arroz	352	(MINENERGIA; PNUD; FAO; GEF, 2011)
Banano	Biogás l/kg banano rechazo	4,57	(Guevara, Arenas , & et al, 1012)
Café Pulpa	Biogás l/kg pulpa	25	(Cenicafe, 2010)
Café Mucilago	CH4 l/kg DQO	311,5	Cenicafe
	Biogás MJ/kg Mucilago	2	(Cenicafe, 2010)
Café Borra	Mj/kg Borra seca	5,2	(Cenicafe, 2010)
Maíz	Biogás m ³ /t maíz	514	(MINENERGIA; PNUD; FAO; GEF, 2011)
Palma de Aceite	Biogás m ³ / TRFF	20	(Fedepalma, 2015)
Plátano	Biogás l/kg banano rechazo	4,57	(Guevara, Arenas , & et al, 1012)
Caña de Azúcar	Biogás MJ/kg Bagazo	3,46	(Sanchez, 2016)
	Biogás NmL/g SV	214,35	
RSU	Biogás m ³ /t RSUO	66	(EPM, 2016) FENOSA.
PTAR	Biogás l/m ³ agua tratada	50	(EPM, 2016) Promedio Salitre, San Fernando, Cañavalejo
Cervecerero	CH ₄ L/t cebada procesada	67,2	(BIOPROA, 2015)
Lácteo Lodos	Biogás L/m ³ leche procesada	29,1	(BIOPROA, 2015)
Lácteo Grasas	Biogás L/m ³ leche procesada	91,1	(BIOPROA, 2015)
Lácteo Suero	Biogás L/m ³ leche procesada	7,7	(BIOPROA, 2015)
Matadero Bovino	Biogás m ³ /t rumen	16,6	(Ramirez, 2016)
Caña Vinazas	Biogás m ³ /m ³ vinaza procesada	16,4	(Conil & Pro Organic, 2017)

Figura 4. Tasa de producción de biogás de las diferentes biomosas. (UNAL; TECSOL, 2018)

Respecto a los datos consignados en la **Figura 4** se reconoce una oportunidad de mejora a la hora de compilar y agrupar los datos de las fuentes en el artículo de la UNAL. La oportunidad de mejora está específicamente ligada a la tasa de producción de biogás a partir de la digestión del estiércol porcino. En la **Figura 5** se presenta que la tasa de producción de biogás a partir del estiércol porcino no depende del tipo de animal del que provenga, y tiene un valor promedio de *70 metros cúbicos de biogás por tonelada de estiércol porcino*. El valor utilizado a lo largo del aplicativo es de 40 metros cúbicos por tonelada de estiércol porcino.

Esta es una equivocación de escritura que lleva a que los resultados presenten una desviación del 75% si se toma en cuenta solo el parámetro de la biomasa de estiércol porcino.

Tabla 50 Factores de producción de Excretas y Biogás sector Porcino

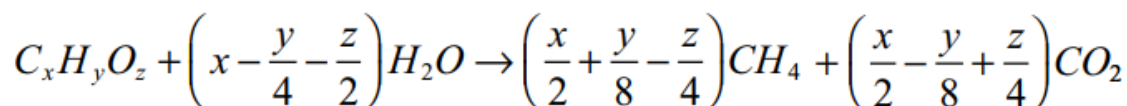
Factor conversión		Excreta (kg)/día	Excreta (ton/año)	Biogás (m3)/día/cerdo	Biogás m3/t estiércol
Lechón 1-60 días	Pequeño	1	0.365	0.07	70
Levante 61-120 días	Mediano	1.5	0.5475	0.105	70
Ceba 121-180 días	Grande	2	0.73	0.14	70
Hembras reemplazo 120-240 d	Grande	2	0.73	0.14	70
Hembras cría más 240 días	Grande	2	0.73	0.14	70
Machos reproductores más 180d	Grande	2	0.73	0.14	70

Fuente: (CUBA SOLAR, 2017)

Figura 5. Tasa de producción de biogás del estiércol porcino. (UNAL; TECSOL, 2018)

Para evitar que la utilización de datos a partir de diferentes fuentes bibliográficas “entrelazadas consecutivamente” genere inconsistencias en los valores, el estudiante recomienda usar para este aplicativo el parámetro conocido como TBMP, siglas en inglés de *Theoretical Biogas Methane Production*.

El TBMP es un método teórico para el cálculo de la producción de biogás de una materia orgánica a partir de la ecuación química que gobierna la reacción, como se muestra en la **Figura 6**. En esta se ve que los reactivos de la digestión anaeróbica están conformados por dos miembros, la molécula constituyente principal de la biomasa y la molécula de agua. Siendo esta una de las razones para que la UPME recomiende digestión anaeróbica en residuos con alto contenido de humedad intrínseco. Evidentemente, la ecuación permite conocer la producción de biogás, la producción de metano (hidrocarburo de interés en el proceso ya que es este el que tiene un poder calorífico considerable) y la producción de dióxido de carbono.



Ecuación 1. Determinación de la TBMP (Achinas & Willem Euverink, Theoretical analysis of biogas potential prediction from agricultural waste, 2016)

En el cálculo teórico, se presenta que el biogás está compuesto simplemente por metano y dióxido de carbono, omitiendo la presencia de siloxanos, sulfuro de hidrógeno, y otros componentes menores debido a que el contenido de azufre en la biomasa suele ser muy bajo con respecto al contenido de C, H, y O. Por ello, para cálculos iniciales se suele despreciar.

La molécula constituyente del residuo orgánico de interés se puede determinar a partir del análisis último (análisis que entrega la composición elemental) que se haya realizado en otros estudios, y cuyos resultados tengan una mejor presentación tanto a nivel visual, como a nivel científico, en donde se especifique de manera clara que representa cada resultado.

El artículo en el cual se expone el método del TBMP recomienda utilizar un factor de seguridad de 80% a la producción teórica de metano (biogás) para eliminar las discrepancias con los resultados experimentales (Achinas & Willem Euverink, Theoretical analysis of biogas potential prediction from agricultural waste, 2016). Esto al reconocer que ninguna o muy pocas reacciones se van a llevar a cabo en su totalidad, debido a ineficiencias y limitantes propias de la realidad.

Para utilizar la **Ecuación 1** es necesario primero reconocer cual es la composición elemental de las diferentes biomásas para así construir su molécula constituyente y conocer la producción de biogás teórica, y compararla con la que presenta el aplicativo UPME. Los datos de la composición química elemental de algunas de las biomásas presentes en la metodología UPME se presentan en la **Tabla 1**. Es necesario aclarar que en la comparación realizada se tomó un número de biomásas menor a la totalidad de las presentadas en el aplicativo UPME.

Tabla 1. Análisis último de algunas de las biomásas que utiliza la metodología UPME.

ANÁLISIS ÚLTIMO DE LAS BIOMASAS EN LA METODOLOGÍA UPME						
Biomasa	Análisis Último [Base Seca]					Fuente bibliográfica
Nombre	C	H	N	O	S	Cita
Estiércol Bovino	38	3,94	1,21	56,85	-	(Pahla, Mamvura, Ntuli, & Muzenda, 2017)
Estiércol Porcino	71,2	9,5	3,7	15,6	0,12	(Gollakota, Kishore, & Gu, 2017)
Estiércol Avícola	37,5	5,12	3,71	30,62	0,45	(Jeswania, Whitinga, Martin, & Azapagic, 2018)
Paja de Arroz	36,9	5,17	0,48	43,7	0,12	(Unchaisri & Fukuda, 2017)
Caña de Maíz	43,8	6,42	-	49,78	-	(Ioannidou, Zabaniotou, Antonakou, & Papazisi, 2008)
Bagazo Caña de Azúcar	45,05	5,57	0,25	37,91	-	(Adebisia, y otros, 2017)
Bagazo Caña Panelera	42,54	5,17	0,63	39,62	0,3	(Vargas & Guerrero, 2010)
RSOU	30,77	4,62	0,77	17,3	0,39	(Rao Pala, Wang, Kolb, & Hessel, 2016)
Lodos PTAR	36,45	5,93	7,03	0,77	25,74	(Gao, y otros, 2013)

Con los datos consignados en la **Tabla 1** se obtienen las moléculas constituyentes de las diferentes biomásas. Esto se hace determinando la fórmula empírica del compuesto químico

a partir de los datos recolectados en los análisis últimos, y sabiendo la masa atómica de los elementos químicos C, H y O. En esta aplicación se ignoraron los datos del análisis último de los elementos químicos S y N, para facilitar la aplicación de la **Ecuación 1** (evitando computar la producción de compuestos de nitrógeno y azufre).

Adicionalmente, se debe tener en cuenta que algunos de los resultados de los análisis últimos son presentados con o sin ceniza, es decir, si se suman los elementos constituyentes no se llegará al 100% en aquellas biomásas cuyos resultados estén expresados con ceniza (tomando en cuenta la fracción de ceniza que hace parte de la muestra). Por otro lado, si se suman los resultados de las biomásas cuyos resultados son presentados sin tomar en cuenta la fracción de ceniza constituyentes, si se tendrá el 100% de la muestra en los elementos constituyentes CHNOS.

Para determinar la molécula constituyente de cada biomasa a partir de los análisis últimos consultados, fue necesario pasar los datos a un porcentaje que no tuviese en cuenta la ceniza en la muestra.

Una vez determinada la fórmula empírica de la biomasa de interés se realiza el balance estequiométrico mediante la **Ecuación 1**. Así se determina la producción de metano y la producción de biogás, usándose la que se considere más pertinente de acuerdo con la aplicación que se les dé a los resultados.

Al tener la producción de biogás se busca obtener un parámetro de la reacción conocido como la tasa de producción biogás o de metano. Este parámetro es una relación entre la cantidad de gas producido (m^3 , m^3 estándar o normal) y la cantidad de residuo sólido ingresado.

Cuando se utiliza la tasa de producción de gas a condiciones normales se utilizará un valor de $22,4 \text{ Nm}^3/\text{kmol}$. Por otro lado, cuando se utilice la tasa de producción de gas a condiciones estequiométricas se utilizará un valor de $23,7 \text{ m}^3 \text{ estándar}/\text{kmol}$. Ambos datos son calculados usando la ecuación de estado de gas ideal con las condiciones normales ($P=1013\text{mbar}$; $T=273,15\text{K}$) y estándar ($P=1013\text{mbar}$; $T=288,75\text{K}$) respectivamente.

Una vez se tengan los resultados de la producción teórica de biogás se utilizarán para comparar dos metodologías WtoE diferentes y los resultados igualmente disímiles. Se evaluarán la metodología UPME y la metodología UPME con las mejoras propuestas en este proyecto de práctica. La metodología UPME se evalúa usando el archivo original descargado de su página web y un aplicativo “nuevo” cuya base es el aplicativo UPME, y que además incluye dos mejoras principalmente: El cambio en los valores de producción de biogás, y la manera como se calcula la energía disponible de acuerdo con la cantidad de biomasa ingresada.

En la Ecuación 2 se presenta la segunda mejora introducida para la comparación. La eficiencia térmica que utiliza el aplicativo original de 35% permanece igual en el aplicativo construido por el estudiante. Adicionalmente permanece constante en las dos metodologías el poder calorífico del biogás, el cual es definido por INERCO en $5\text{kW}/\text{m}^3$ de biogás.

$$\text{Potencial energético} = (\text{Producción de biogas}) * (PCI_{\text{biogás}}) * (\eta_{\text{térmica}})$$

Ecuación 2. Potencial energético propuesto por este proyecto de práctica.

A diferencia de lo planteado mediante la Ecuación 2 se tiene que el aplicativo original de la UPME calcula el potencial energético mediante la Ecuación 3. En la Ecuación 3 se puede notar como la metodología UPME introduce en la ecuación la fracción de metano en el biogás. Esto es una oportunidad de mejora identificada pues cuando se utiliza el poder calorífico inferior del biogás (como se hace en el aplicativo UPME) no se debe tener en cuenta la fracción de metano en el biogás, pues ya se computó en el cálculo del poder calorífico.

$$\text{Potencial energético} = (\text{Producción de biogas}) * (PCI_{\text{biogás}}) * (\eta_{\text{térmica}}) * (\%CH_4)$$

Ecuación 3. Potencial energético utilizado en la metodología UPME.

En la **Figura 6** se puede apreciar el municipio utilizado para ingresar la cantidad de biomasa a ambos aplicativos para la comparación de resultados. El municipio de Montelíbano es el más cercano a la premisa de los objetivos de utilizar una población de 100.000 habitantes (71.769 habitantes para Montelíbano) (DANE, 2010). Se utilizaron estos datos porque están sectorizados y en las unidades de medida con las que cuenta por defecto la metodología UPME.

Municipio	Biomasa, t/año								
	Pecuario			Agrícola					Urbano
	Avícola	Porcícola	Bovino	Arroz	Maíz	Palma de aceite	Plátano	Caña Panelera	RSU
	Estiércol	Estiércol	Estiércol	Paja	Caña	RFF Laguna Oxidación	Fruta Rechazo	Bagazo	RSOU*
Montería	881	12.176	1.948.055	40.055	15.906	0	35.172	0	79.129
Ayapel	0	0	545.656	26.604	1.939	0	0	0	2.349
Buenavista	0	0	392.007	969	416	0	0	0	1.197
Canalete	0	0	207.315	0	17.444	0	60.762	0	398
Cereté	0	0	145.017	11.016	46.754	0	12.177	0	20.065
Ciénaga de oro	11.651	4.940	328.920	6.056	36.063	0	2.460	377	3.647
La Apartada	0	2.854	133.268	1.545	260	0	185	0	1.179
Los Córdoba	0	117.520	211.689	2.874	1.414	0	140.780	0	581
Montelíbano	0	35.761	466.935	4.616	3.086	0	10.154	0	9.642
Moñitos	0	0	49.720	449	1.085	0	204.180	0	580
Planeta Rica	719	3.660	589.144	10.789	3.430	0	6.740	0	7.025
Pueblo Nuevo	0	2.875	361.263	11.404	4.186	0	1.550	0	1.608

Figura 6. Cantidad de biomasa ingresada a los aplicativos para la comparación de sus resultados. (INERCO, 2018)

3. Resultados y análisis

Debido a que el proyecto presentaba desafíos o componentes encerrados en diferentes áreas del conocimiento, los resultados se presentan divididos en tres secciones diferentes sucesivas, en las cuales se tratan los resultados obtenidos en la revisión del manual (instructivo PDF) del aplicativo, aquellos obtenidos en la revisión del código fuente del aplicativo y posteriormente, los resultados obtenidos mediante la revisión de las propiedades termodinámicas y químicas de las biomásas estudiadas.

3.1. Resultados de la revisión instructivo (Archivo PDF)

Las oportunidades de mejora que se aprecian en el instructivo del aplicativo se consideran demasiado evidentes como para ser ignorados. En este sentido, se recomienda que estas sean acatadas y corregidas, debido a que dejarlos en su estado actual llevaría a reducir la confiabilidad del aplicativo (ejecutable) UPME.

Las oportunidades de mejora del instructivo van desde errores de escritura (como lo son la falta y repetición de palabras), hasta errores en presentación de los datos presentados como ejemplo del funcionamiento del aplicativo. Además, y de manera más acorde con el objetivo de este proyecto de práctica, se tienen errores en algunos conceptos teóricos ingenieriles propios de la valorización energética de residuos. Estas oportunidades se mostrarán con mayor detalle a continuación:

Nro.	Sector	Biomasa	PCI	
			kcal / Kg	MJ / Kg
Pecuario				
1	Avícola	Ponedoras	2.248	9,4
		Engorde	3.645	15,3
2	Porcícola	Tecnificado	6.049	25,3
		No tecnificado	4.163	17,4
3	Bovino	Leche	2.801	11,7
		Doble propósito	3.680	15,4
		Carne	3.783	15,8
Agrícola				
4	Palma de aceite	Cuesco	3.988	16,7
		Fibra	4.274	17,9
		Raquis	4.021	16,8
5	Caña de azúcar	Rac	3.684	15,4
		Bagazo	4.456	18,6
6	Caña de panela	Bagazo	4.456	18,6
		Hojas secas	4.007	16,8
		Rac	3.684	15,4
7	Café	Pulpa	4.259	17,8
		Cisco	4.430	18,5
		Tallos	4.384	18,3
8	Maíz	Rastrojo	3.429	14,3
		Tusa	3.390	14,2
		Capacho	3.815	16,0
		Hojas secas	4.274	17,9
9	Arroz	Tamo	3.113	13,0
		Cascarilla	3.603	15,1
10	Banano	Raquis	1.809	7,6
		Vástago	2.032	8,5
		Rechazo	2.488	10,4
11	Plátano	Raquis	1.808	7,6
		Vástago	2.032	8,5
Urbano				
12	RSU	Plaza de Mercado	3.772	15,8
		Centro de acopio	3.772	15,8
		Poda	3.772	15,8

Figura 7. Poder calorífico de las biomásas presentes en el aplicativo UPME. (INERCO, 2018)

Al contemplar la **Figura 7** se reconoce como una oportunidad de mejora el hecho de que las tres biomásas clasificadas como RSOU presentan el mismo valor de poder calorífico. Se conoce que el poder calorífico de dos o más biomásas diferentes (diferencias en composición química, procedencia, etc.) tiene un valor distinto también. En un caso extremo se podría considerar que el poder calorífico de las biomásas *Plaza de mercado* y *Centros de acopio* tenga el mismo valor, pero el PCI de la biomasa *Podas* sin dudas será diferente al de las dos primeras.

Nro.	Sector	Biomasa	Oferta del proyecto	Carga del proyecto t/año		
			Potencial Biológico	Escenario 1 Solo RSOU	Escenario 2 RSOU + 5% Biomosas	Escenario 3 RSOU + 10% Biomosas
Pecuario						
1	Avícola	Estiércol	13.259		663	1.326
2	Porcícola	Estiércol	232.440		11.622	23.244
3	Bovino	Estiércol	7.398.412		369.921	739.841
Agrícola						
4	Arroz	Paja	0		10.429	20.8570
5	Banano	Fruto Rechazo	0		0	0
6	Café Pulpa	Pulpa	0		0	0
7	Café Mucilago	Mucilago	0		0	0
8	Maíz	Caña	0		10.379	20.757
9	Palma de Aceite	RFF Laguna Oxidación	27		1	3
10	Plátano	Fruta Rechazo	1.524.413		76.221	152.441
11	Caña de Azúcar	Bagazo	0		0	0
12	Caña Panelera	Bagazo	0		0	0
Urbano						
13	RSU	RSOU	138.910	166.692	166.692	166.692
14	Lodos PTAR	Lodos	0		0	0
Total:		t/año	9.307.461	166.692	645.927	1.125.162
		t/día		534	2.070	3.606
Capacidad de la planta				550	2.000	3.500

Figura 8. Escenarios propuestos por INERCO. (INERCO, 2018)

Por otro lado, como se aprecia en la **Figura 8** una de las tablas empeladas para el dimensionamiento de las plantas de valorización energética presenta las siguientes oportunidades de mejora: En los dos recuadros rojos superiores se nota como en la Columna 4 (Potencial biológico) se presentan valores de cero, es decir, no hay potencial aprovechable de estas biomosas. Sin embargo, en las dos últimas columnas, al momento de sumar 5 y 10% del potencial total respectivamente, se entrega un valor diferente de cero (el 5 y 10% de cero es cero). Errores de escritura de este tipo genera confusiones en los usuarios finales del aplicativo.

Respecto a la fila dedicada a los RSOU (encerrada en el recuadro rojo inferior de la **Figura 8**) la oportunidad de mejora radica en la “manipulación” de los datos. Esto explica por qué para el manejo de los tres escenarios de dimensionamiento (últimas tres columnas) los valores son mayores a los del potencial (columna 4 o columna del medio). Esta manipulación se ve reforzada cuando en la lectura del documento se menciona que los tamaños típicos de las plantas de aprovechamiento energético de residuos en EE.UU arrancan en 500 ton/año, y que una de las ideas del aplicativo es utilizar equipos disponibles comercialmente, y no emplear equipos personalizados o experimentales.

Este último hecho se comprueba cuando, al utilizar la cantidad expresada en la columna de potencial total, se obtiene un tamaño de planta de 445 ton/año, valor por fuera del rango típico y que generaría la necesidad de utilizar equipo experimental.

Estas oportunidades de mejora no son las más significativas, pero si se deben tener en cuenta a la hora de evaluar el desempeño global del aplicativo.

3.2. Resultados de la revisión del código fuente

Como bien se mencionó anteriormente, las habilidades de programación adquiridas en diferentes asignaturas propias del pregrado de ingeniería mecánica fueron de extrema utilidad a la hora de entrar analizar la manera como está construido el aplicativo, y poder así determinar la localización exacta dentro del código fuente de las posibles mejoras.

Cuando se está construyendo cualquier tipo de aplicativo o ejecutable, basado en cualquiera de los lenguajes de programación existentes, se deben tener dos principios fundamentales: Primero, el ejecutable debe ser lo suficientemente amigable a los usuarios finales a quienes está destinado, en este caso personal administrativo de cada municipio. En la mayoría de las ocasiones el personal administrativo de un municipio no tiene una formación técnica como antecedente.

Segundo, el programa o aplicativo debe contar con restricciones al usuario para proteger los resultados generados y la validez de estos. El programador debe pensar que el aplicativo puede caer en manos del usuario con las mayores limitaciones imaginables, y por ende el aplicativo debe contrarrestar esta situación.

Respecto al código fuente, se debe decir que este viene dividido en dos grandes bloques: El primer bloque de código corresponde al formulario de ingreso de datos y gobierna todas sus funciones y campos de ingreso de datos; este bloque se denomina en el Visual Basic como *FormAgregarMun*. El segundo bloque de código corresponde al funcionamiento general de su aplicativo, a lo largo de todos los libros de cálculo; este bloque de código se denomina en el Visual Basic *Módulo1*.

3.2.1. Oportunidades de mejora código FormAgregarMun

La primera oportunidad de mejora es principalmente visual y pretende resaltar el color de una casilla de entrada de datos para que el usuario se dé cuenta de que debe agregar ese dato en específico para continuar ejecutando el aplicativo.

```

Sub validarMunicipio(cbDepMun)
    If cbDepMun = "" Then
        cbDepMun.BackColor = vbRed
        MsgBox "Campo Municipio Vacio, por favor ingresar información."
    End If
End Sub

Sub validarMunicipio(cbDepMun)
    If cbDepMun = "" Then
        MsgBox "Campo Municipio Vacio, por favor ingresar información."
    End If
End Sub

```

Figura 9. Programación de la alerta de ingreso del municipio.

En la **Figura 9** se presentan la comparación entre el código con el que viene originalmente el aplicativo (mitad inferior de la **Figura 9**), y el código modificado por el estudiante (mitad superior de la **Figura 9**). Esta pequeña modificación se trae a colación para demostrar como una simple línea de código puede alterar la relación entre el usuario y el ejecutable.

En la **Figura 10** se presentan la líneas de código agregadas como restricciones a la entrada de datos por parte del usuario. Estas líneas lo que hacen es que detienen la ejecución del aplicativo hasta que el usuario ingrese valores dentro del rango esperado. Esta pausa en la ejecución la realiza desplegando ventanas emergentes con mensajes de advertencia y cambiando el color de las celdas con valor errado. El rango esperado, como se trata de cantidades de biomasa, se encuentra en los números reales positivos (del 0 en adelante).

Con esta nueva restricción agregada, no se pueden ingresar números negativos al aplicativo en ninguna circunstancia. Es necesario remarcar que esta programación de las restricciones al usuario se realizó para todas las biomásas cuyo contenido aprovechable se puede ingresar al aplicativo (14 en total).

```

Private Sub btGuardar_Click()
vDepMun = cbDepMun.Value

If vDepMun = "" Then
cbDepMun.BackColor = vbRed
MsgBox "Campo Municipio Vacio, por favor ingresar información."
ElseIf tbAvicola < 0 Then
tbAvicola.BackColor = vbRed
MsgBox "Campo biomasa Avicola inválido, por favor corregir información."
End
ElseIf tbBovino < 0 Then
tbBovino.BackColor = vbRed
MsgBox "Campo biomasa Bovina inválido, por favor corregir información."
End
ElseIf tbPorcicola < 0 Then
tbPorcicola.BackColor = vbRed
MsgBox "Campo biomasa Porcicola inválido, por favor corregir información."
End
ElseIf tbRSU < 0 Then
tbRSU.BackColor = vbRed
MsgBox "Campo biomasa RSU inválido, por favor corregir información."
End
ElseIf tbPTAR < 0 Then
tbPTAR.BackColor = vbRed
MsgBox "Campo biomasa PTAR inválido, por favor corregir información."
End
ElseIf tbArroz < 0 Then
tbArroz.BackColor = vbRed
MsgBox "Campo biomasa Arroz inválido, por favor corregir información."
End
ElseIf tbBanano < 0 Then
tbBanano.BackColor = vbRed
MsgBox "Campo biomasa Banano inválido, por favor corregir información."
End

Private Sub tbArroz_Change()
If tbArroz < 0 Then
MsgBox "La cantidad de biomasa Arroz no puede ser un numero negativo, por favor corregir el dato."
tbArroz.BackColor = vbRed
ElseIf tbArroz > 0 Then
tbArroz.BackColor = vbWhite
End If
End Sub
End Sub

```

Figura 10. Programación de las restricciones al usuario.

Con la implementación de estas restricciones, el usuario no podrá ni por error adicionar un numero negativo, mientras que el ejecutable original de la UPME si “permitía” esta situación, como se ilustra en la **Figura 10**. En la **Figura 11** se puede apreciar como la única restricción que tiene el usuario en este aplicativo corresponde a la introducción del nombre del municipio para el cual se ingresará la cantidad de biomasa. Si el usuario no ingresa el nombre del municipio, no podrá utilizar el ejecutable.

```

Private Sub btGuardar_Click()

vDepMun = cbDepMun.Value

If vDepMun = "" Then
MsgBox "Campo Municipio Vacio, por favor ingresar información."
End If

If vDepMun <> "" Then
guardarDatos
End If

End Sub

```

Figura 11. Única restricción impuesta por el aplicativo.

```

Private Sub guardarDatos()

    Sheets("M1").Visible = True
    Sheets("M1").Select
    Range("C26").Select
    Selection.End(xlUp).Select
    ActiveCell.Offset(1, 0).Select
    ActiveCell.Offset(0, 0).Value = cbDepMun.Value

    vDepMun = cbDepMun.Value

    Dim i, k As Integer
    Dim j As String
    i = 2
    Do
        j = ActiveWorkbook.Sheets("dbTemp").Cells(i, 4).Value
        k = i
        i = i + 1
    Loop Until vDepMun = j
    If vDepMun = j Then
        ActiveCell.Offset(0, 1).Value = ActiveWorkbook.Sheets("dbTemp").Cells(k, 6).Value '' Población Urbana
    End If

```

Figura 12. Programación de la rutina de asignación de la población a cada municipio ingresado.

En la **Figura 12** se aprecia el ciclo *Do* introducido por el estudiante, mediante el cual se le asigna a cada municipio su cantidad de correspondiente de habitantes, de acuerdo con las cifras manejadas por el DANE. De este dato poblacional se debe decir que al estudiante le fue necesario buscarlo, pues, a pesar de que UPME pretende utilizar este dato en su aplicativo, no lo presentan en el listado en el cual están consignados los municipios del país.

Se ha utilizado en esta programación específica con el número de habitantes por municipio estimado por el DANE en sus proyecciones para el año 2020 (DANE, 2010). En la **Figura 13**, encerrado en el recuadro rojo, se puede notar como la UPME en su aplicativo pretendía utilizar 50.000 habitantes para todos los municipios, sin importar cual fuera seleccionado por el usuario.

```

Private Sub guardarDatos()

    Sheets("M1").Visible = True
    Sheets("M1").Select
    Range("C26").Select
    Selection.End(xlUp).Select
    ActiveCell.Offset(1, 0).Select

    ActiveCell.Offset(0, 0).Value = cbDepMun.Value

    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "50000" '' Población Urbana

```

Figura 13. Asignación de datos poblacionales en el aplicativo original.

3.2.2. Oportunidades de mejora código Modulo1.

En la **Figura 14** se presenta otra oportunidad de mejora que consiste en la programación de unas macros que ocultar o mostrar la mayoría de los libros de cálculo del aplicativo. Esta macro se ejecuta por defecto una vez se abre el aplicativo, ya que siempre al iniciar

presenta dos libros de cálculo habilitados, el formulario de ingreso de datos, y el compilado de resultados.

En la **Figura 14** se presenta una comparación entre las macros programadas por el estudiante (código en la parte izquierda), y las macros con las que viene el aplicativo (código en la parte derecha). En esta comparación se puede notar que las macros del aplicativo original de la UPME hacen referencia a libros de cálculo que ni siquiera existen en el aplicativo (los nombres de los libros de cálculo son los que aparecen entre paréntesis y comillas en ambos códigos de la **Figura 14**).

<pre> Sub Ocultar() ' Macro5 Macro Sheets("M1").Visible = False Sheets("M2").Visible = False Sheets("M3").Visible = False Sheets("M4").Visible = False Sheets("WTE1").Visible = False Sheets("WTE2").Visible = False Sheets("Costos").Visible = False Sheets("G1").Visible = False Sheets("Salida datos tecnicos").Visible = False Sheets("Ingresos").Visible = False Sheets("6").Visible = False Sheets("7").Visible = False Sheets("8").Visible = False Sheets("dbTemp").Visible = False Sheets("EFINA-1").Visible = False Sheets("EFINA-2").Visible = False Sheets("EFINA-3").Visible = False Sheets("Hoja3").Visible = False Sheets("Portada").Activate End Sub </pre>	<pre> Sub Ocultar() ' Macro5 Macro Sheets("M2").Visible = False Sheets("M3").Visible = False Sheets("M4").Visible = False Sheets("WTE1").Visible = False Sheets("WTE2").Visible = False Sheets("Costos").Visible = False Sheets("C1").Visible = False Sheets("C2").Visible = False Sheets("Ingresos").Visible = False Sheets("6").Visible = False Sheets("7").Visible = False Sheets("8").Visible = False Sheets("dbTemp").Visible = False Sheets("Portada").Activate End Sub </pre>
---	---

Figura 14. Comparación entre las dos versiones de las rutinas "Ocultar".

No está de más decir que el código escrito por el estudiante muestra y oculta todos los libros de Excel que presenta el aplicativo.

En la **Figura 15** se presenta el código desarrollado por el estudiante para la ubicación de la biomasa ingresada por el usuario en la herramienta conocida como *Diagrama o Triángulo Tanner*. La ubicación de cada biomasa en el Diagrama Tanner se realiza a partir de tres parámetros que se obtienen mediante la realización de un análisis próximo en cada biomasa. Estos tres parámetros son la cantidad de humedad libre, el carbono fijo y la cantidad de ceniza total.

Esto se realiza con el ánimo de conocer si las biomásas que presenta el aplicativo UPME son más aptas para su valorización mediante tecnologías térmicas (incineración/combustión) o mediante tecnologías biológicas (digestión anaeróbica).

Es importante utilizar una herramienta como el Diagrama Tanner porque ella cuenta con sustento científico, mientras que el aplicativo determina la idoneidad de las biomásas con una u otra tecnología de valorización de manera casi arbitraria, dejándose llevar únicamente por el contenido de humedad.

Adicionalmente en la parte derecha de la **Figura 15** se presenta el código empleado para, de manera visual, manifestar la pertinencia de cada biomasa con la valorización térmica o biológica.

```

Sub TannerTermico()
Dim i As Integer
Range("I7").Select
i = 1

For i = 1 To 18
ActiveCell.Offset(0, -4).Select
j = ActiveCell.Value
ActiveCell.Offset(0, 1).Select
k = ActiveCell.Value
ActiveCell.Offset(0, 2).Select
l = ActiveCell.Value
ActiveCell.Offset(0, 1).Select
If j > 0.25 And k < 0.6 And l < 0.5 Then
ActiveCell.Interior.Color = RGB(20, 190, 65)
ActiveCell.Value = "SI"
ActiveCell.Font.Color = vbBlack
ActiveCell.Font.Bold = True
ElseIf j = "" And k = "" And l = "" Then
ActiveCell.Value = ""
ElseIf j < 0.25 Or k > 0.6 Or l > 0.5 Then
ActiveCell.Interior.Color = vbRed
ActiveCell.Value = "NO"
ActiveCell.Font.Color = vbWhite
ActiveCell.Font.Bold = True
End If
ActiveCell.Offset(1, 0).Select
Next i
End Sub

Sub Asignacion_Termica()
Dim i As Integer
Dim j As String
Range("K7").Select
i = 1

For i = 1 To 16
ActiveCell.Offset(0, -2).Select
j = ActiveCell.Value
ActiveCell.Offset(0, 2).Select
If j = "SI" Then
ActiveCell.Font.Bold = True
ElseIf j = "NO" Then
ActiveCell.Value = ""
ElseIf j = "" Then
ActiveCell.Value = ""
End If
ActiveCell.Offset(1, 0).Select
Next i
End Sub

```

Figura 15. Programación de la rutina de comparación con el diagrama Tanner.

Al final, las oportunidades de mejora referidas a la programación en Visual Basic se hacen importantes a la hora de facilitar la experiencia del usuario final con el aplicativo, siendo esta nueva facilidad la precursora de unos resultados más asertivos, que a su vez son las fundaciones de unas decisiones pertinentes y que sean acordes con la realidad económica y energética de cada municipio, en lo que concierne a la valorización energética de residuos sólidos.

3.3. Resultados y análisis de la revisión termodinámica

Como se especificó en la metodología, con los datos obtenidos de los análisis últimos de la diferentes biomásas seleccionadas, se procede a calcular los coeficientes de C, H y O en la molécula constituyente de los residuos en su fórmula empírica. Los coeficientes obtenidos al realizar este procedimiento se presentan en la **Tabla 2**.

En la **Tabla 2** se presentan los coeficientes que componen la formula molecular empírica del tipo $C_xH_yO_z$. Además se presentan los coeficientes obtenidos al realizar la reacción estequiométrica de producción de biogás a partir de una digestión anaeróbica. En la última fila de la **Tabla 2** se presentan los coeficientes moleculares y los resultados de la reacción de producción de biogás para la celulosa. Con esta molécula se busca comparar también cada una de las biomásas estudiadas para reconocer la desviación que presentaban los datos de análisis últimos consultados mediante búsqueda bibliográfico (presentados en la **Tabla 1**).

Tabla 2. Coeficientes moleculares empíricos y de reacción estequiométrica.

COEFICIENTES MOLECULARES EMPÍRICOS Y DE REACCIÓN ESTEQUIOMÉTRICA						
Biomasa	Coeficientes			Coeficientes productos y reactivos		
Nombre	C	H	O	H ₂ O	CH ₄	CO ₂
Estiércol Bovino	6,00	7,47	6,73	0,77	2,25	3,75
Estiércol Porcino	6,00	9,61	0,99	3,11	3,95	2,05
Estiércol Avícola	6,00	9,83	3,67	1,71	3,31	2,69
Paja de Arroz	6,00	10,09	5,33	0,81	2,93	3,07
Caña de Maíz	6,00	10,55	5,11	0,80	3,04	2,96
Bagazo Caña de Azúcar	6,00	8,90	3,79	1,88	3,17	2,83
Bagazo Caña Panelera	6,00	8,75	4,19	1,72	3,05	2,95
RSOU	6,00	10,81	2,53	2,03	3,72	2,28
Lodos PTAR	6,00	11,71	0,10	3,02	4,44	1,56
Celulosa	6,00	10,00	5,00	1,00	3,00	3,00

Los coeficientes para los tres elementos químicos constituyentes de las moléculas analizadas están en su gran mayoría muy parecidos a la molécula de la celulosa. Las que presentan mayores desviaciones son correspondientes a las moléculas de estiércol Porcino, RSOU y lodos PTAR. De las últimas dos moléculas mencionadas (RSOU y lodos PTAR) se puede decir que se esperaba una alta variación en esta comparación, debido a las características intrínsecas de estas biomásas, las cuales están influenciadas por su gran cantidad de materiales constituyentes y sus igualmente diversos orígenes.

Con la información presentada en la **Tabla 2** se calculan los parámetros que ayudarán a comparar las producciones teóricas de biogás con los datos utilizados en la metodología UPME. En la **Tabla 3** se presentan los resultados obtenidos para los parámetros de producción de biogás obtenidos a partir de los kilogramos de residuos ingresados. Es de particular interés para este proyecto de práctica la última columna debido a que con ese dato se construye la **Tabla 4**, la cual a su vez permite construir la **Figura 16**, en la cual se presenta la comparación entre los datos de producción de biogás de la metodología UPME y la producción de biogás de acuerdo con la teoría TBMP.

Tabla 3. Resultados parámetros de producción de biogás.

RESULTADOS				
Biomasa		Parámetros		
Nombre	kg de residuo	m ³ de biogás	m ³ biog./kg res.	m ³ biog./ton res.
Estiércol Bovino	187,18	6,00	0,03	32,05
Estiércol Porcino	97,38	6,00	0,06	61,61
Estiércol Avícola	140,62	6,00	0,04	42,67
Paja de Arroz	167,36	6,00	0,04	35,85
Caña de Maíz	164,38	6,00	0,04	36,50
Bagazo Caña de Azúcar	141,49	6,00	0,04	42,41
Bagazo Caña Panelera	147,81	6,00	0,04	40,59
RSOU	123,29	6,00	0,05	48,67
Lodos PTAR	85,23	6,00	0,07	70,39
Celulosa	162,00	6,00	0,04	37,04

Tabla 4. Comparación de la producción de biogás.

COMPARACIÓN ENTRE METODOLOGÍAS		
Biomasa	Producción de biogás m ³ /kg biom.	
	UPME	TBMP
Nombre		
Estiércol Bovino	40,00	32,05
Estiércol Porcino	40,00	61,61
Estiércol Avícola	60,00	42,67
Paja de Arroz	73,00	35,85
Caña de Maíz	55,00	36,50
Bagazo Caña de Azúcar	0,17	42,41
Bagazo Caña Panelera	0,16	73,84
RSOU	66,00	48,67
Lodos PTAR	55,00	70,39

Con los datos presentados en la **Tabla 4** se construye el diagrama comparativo presentado en la **Figura 16**. En él se presenta de manera visual y clara como la producción teórica de biogás (así mismo también la de metano) difiere de manera considerable con la producción medida en el artículo UNAL, fuente bibliográfica principal de la metodología UPME.

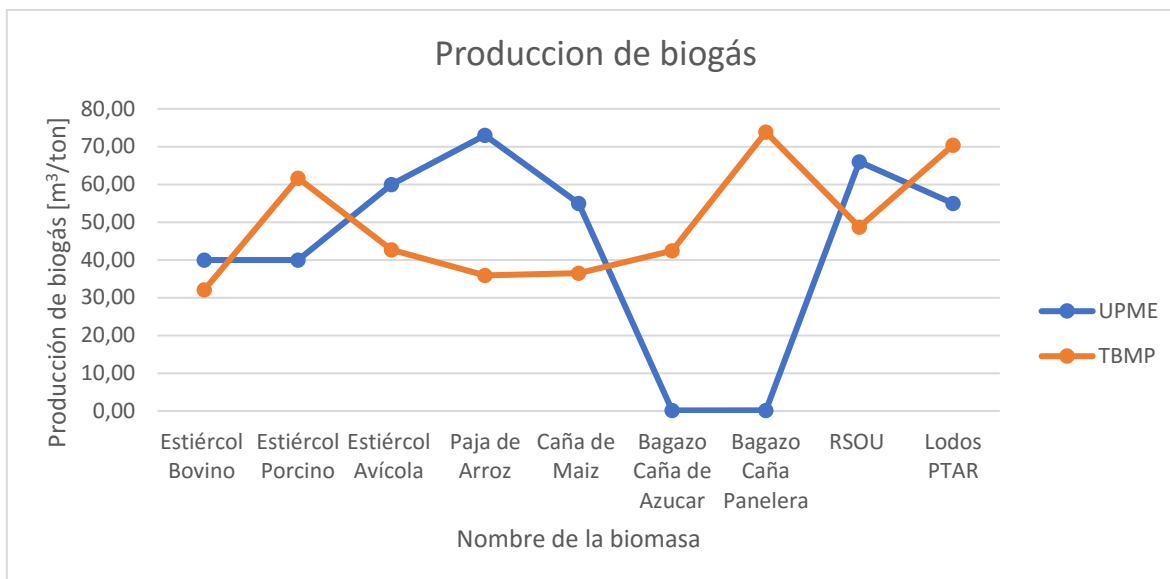


Figura 16. Comparación entre la producción de biogás teórica y la presentada en el aplicativo UPME.

Al analizar la **Figura 16** con detalle se nota que las diferencias presentadas entre los valores de producción de metano (producción de biogás) teóricos y experimentales varía dependiendo de la biomasa que se analice, es decir, para algunas de las biomásas analizadas, por ejemplo el estiércol porcino, la producción teórica de biogás es mayor que la experimental, mientras que para otras, por ejemplo la paja de arroz o la caña de maíz, a producción teórica da de biogás es menor que la experimental.

Las biomásas cuya producción teórica de biogás es mayor que la producción experimental presenta un resultado esperado y que concuerda con las observaciones científicas de como los procesos teóricos son idealizados, y no son influenciados por ineficiencias propias de la realidad. La magnitud de la diferencia entre la producción teórica y real puede variar dependiendo de la eficiencia propia de los equipos y de la calidad de los experimentos realizados (que tan controlado está el ambiente en el que se realizan los procesos).

En las biomásas cuya producción teórica de biogás es inferior a la producción experimental se presenta una variación con respecto a la situación expresada en el párrafo anterior. Es importante reafirmar que la producción teórica de un proceso científico, en este caso de degradación, no puede tener un valor menor que su contraparte experimental, debido a las idealizaciones que se emplean en la teoría. Esta situación anormal es particularmente pronunciada en las biomásas paja de arroz, caña de maíz y estiércol avícola. Se tendrían que revisar la condiciones y equipos de las mediciones de estas biomásas para comprender y poder determinar el origen de esta variación. Adicionalmente, también se tendrían que determinar las composiciones elementales y demás propiedades para determinar la variación con la composición elemental presentada en la **Tabla 1**.

En el caso de los RSOU la diferencia no es muy notable pero se puede explicar en la gran variación que puede presentar la composición química de este tipo de residuos. La muestra utilizada en el documento UNAL seguramente tiene una composición diferente a la

presentada en la **Tabla 1** para esta biomasa. Este hecho también podría explicar el fenómeno discutido en el párrafo anterior para la paja de arroz, caña de maíz y estiércol avícola, pero es preferible en estas tempranas etapas del proceso no aventurarse a asegurarlo como en el caso de los RSOU.

De los análisis últimos presentados la **Tabla 1** la única biomasa que presenta una cantidad considerable de Azufre (S) son los lodos PTAR. Sin embargo, en estas biomasa la producción teórica de biogás está por encima de la producción experimental y la consideración del S en los cálculos mantendría la producción de biogás en la misma proporción pero impactaría la producción de metano.

La producción teórica de biogás para las biomasa bagazo de caña de azúcar y bagazo de caña panelera considera la adición de una cantidad considerable de agua, ya que estos residuos por sí solos tienen bajo porcentaje de humedad. Se le atribuye a este factor el hecho de que en el artículo UNAL y en el aplicativo UPME se tenga en cuenta un factor tan bajo de producción (factores menores a 1 m³/tonelada de biomasa).

Por otro lado, la fuente consultada para el análisis de producción teórica de biogás introduce un factor de ajuste correspondiente al 80%. Es decir, al resultado obtenido del balance estequiométrico lo multiplican por 0,8 para efectos de ajuste a las mediciones. Sin embargo, en los balances presentados en la **Tabla 2** este factor fue omitido y los resultados no están influenciados por él.

Otro de los factores a los que se le atribuyen las diferencias entre los valores teóricos con los valores experimentales es el hecho de la gran variabilidad de las propiedades de las fibras o materias primas de origen natural. Esta variabilidad se presenta por origen de la materia prima (zona geográfica de donde fue extraído) y por la variabilidad climática de la misma zona. Es complicado contabilizar esta varianza y se omitió este hecho en el presente artículo.

Este último hecho explica las complicaciones que se tienen para encontrar puntos comunes de comparación entre diferentes estudios con este tipo de materias orgánicas, y representa la mayor incertidumbre del presente artículo, pues el cálculo fue realizado con análisis últimos consignados en una gran variedad de fuentes bibliográficas.

Es necesario entonces, estudiar a profundidad las condiciones en las cuales fueron realizadas los experimentos y mediciones sobre las cuales se basó el artículo UNAL para comprender mejor la diferencia que presenta con la producción teórica. Una cosa es cierta, la producción teórica no se puede ver superada por la producción experimental.

3.4. Resultados y análisis de la comparación entre metodologías WtoE.

Como se mencionó en la metodología, la comparación entre las dos metodologías (UPME y proyecto de práctica) se llevó a cabo para el municipio del departamento de Córdoba Montelíbano. Debido a esto, se presentarán dos resultados arrojados por los aplicativos.

Se presentan los resultados para las dos metodologías de manera separada, primero la metodología UPME y segundo la metodología propuesta por el estudiante.

3.4.1. Metodología UPME.

En la **Figura 17** se presenta el formulario de ingreso de datos al aplicativo original (sin modificaciones) de la UPME. Estos datos de biomasa fueron utilizados evidentemente para ambas metodologías, con el animo de realizar la comparación. En la **Figura 17** se puede notar el nombre del municipio en la parte superior derecha y los desechos ingresados tomados de los datos presentados en la **Figura 6**.

The screenshot shows a web application window titled 'Upme - Agregar Municipios'. The main heading is 'CANTIDAD DE BIOMASA ALIMENTADA POR EL USUARIO' with a subtitle 'Toneladas / Año'. A dropdown menu for 'Municipio' is set to 'CORDOBA - MONTELÍBANO'. The form is divided into three main sections: 'Biomasa residual Pecuario (Ton/año)' in orange, 'Biomasa residual Urbana (Ton/año)' in purple, and 'Biomasa residual Agrícola (Ton/año)' in green. The 'Pecuario' section includes 'Avícola (Estiércol)' (empty), 'Porcícola (Estiércol)' (35761), and 'Bovino (Estiércol)' (466935). The 'Urbana' section includes 'RSU (RSOU)!' (9642) and 'Lodos PTAR (Lodos)!' (empty). The 'Agrícola' section includes 'Arroz (Paja)!' (4616), 'Banano (Fruta Rechazo)!' (empty), 'Café (Pulpa)!' (empty), 'Café (Mucilago)!' (empty), 'Maiz (Caña)!' (3086), 'Palma de Aceite (RFF)!' (empty), 'Platano (Fruta Rechazo)!' (10154), 'Caña de Azucar (Bagazo)!' (empty), and 'Caña Panelera (Bagazo)!' (empty).

Figura 17. Cantidad de biomosas ingresadas a los aplicativos de ambas metodologías.

Una vez se ingresan los datos de biomasa generada, el aplicativo calcula todos los parámetros de producción de energía y factibilidad. En la **Figura 18** se presentan los resultados de generación de biogás y de disponibilidad energética. El más importante de los datos que se calculan son la disponibilidad energética el cual, con la cantidad de las biomosas ingresadas y la forma de cálculo UPME, se obtiene un valor de 3231 kWh/día. La unidades de este parámetro se deben corregir en el aplicativo UPME.

12	PRODUCCION DE ENERGÍA			
12,1	Cantidad Biomasa:	ton/d	1746	Peso húmedo
		m ³ /d	4989	
12,2	Tasa de generación:	m ³ /ton rs	39	Rango típico 60 a 150 m ³ biogás / ton rs
12,3	Generación biogás:	m ³ /d	68.161	% CH ₄ , 65 %
		m ³ /hr	2.840	24 horas
		m ³ /min	47	25 horas
12,4	Poder calorífico inferior biogás:	kW/m ³ CH ₄	5,0	
12,5	% CH ₄ biogás	%	65%	Contenido de metano en el Biogás
12,6	Rendimiento térmico:	%	35%	
12,7	Potencial disponible:	kWh	3231	
12,8	Factor de disponibilidad:		85%	
12,9	Electricidad generada:	KWh/día	65.903	
12,10	Rendimiento de la biomasa seca:	MW/ton	0,04	Rendimiento en generación eléctrica (Rango típico es de 0,05 a 0,30 MW/ton)
12,11	Potencia del equipo:	KW	3328	Capacidad Equipo de generación eléctrica
		MW	3,30	

Figura 18. Resultados de generación de biogás obtenidos en la metodología UPME.

Adicionalmente, en la **Figura 19** se presenta el análisis económico que presenta la UPME para una inversión para este tipo de proyecto. Los porcentajes que se presentan encerrados en el recuadro rojo a la izquierda de la **Figura 19** hacen referencia a la cantidad relativa de recursos públicos y privados que se destinarían para la construcción del proyecto. A mayor porcentaje de inversión oficial (proveniente del gobierno), mayor oportunidad del retorno sobre la inversión para los inversionistas privados y, por consiguiente, más factible el proyecto.

Porcentaje inversión inicial	WTE Degradación anaeróbica	WTE Incineración	WTE Pirolisis
10%	NEGATIVA	NEGATIVA	NEGATIVA
10%	NEGATIVA	NEGATIVA	NEGATIVA
20%	NEGATIVA	NEGATIVA	NEGATIVA
30%	-19,4%	NEGATIVA	NEGATIVA
40%	NEGATIVA	NEGATIVA	NEGATIVA
50%	-16,2%	NEGATIVA	NEGATIVA
60%	-14,5%	NEGATIVA	NEGATIVA
70%	-12,4%	NEGATIVA	NEGATIVA
80%	-9,8%	NEGATIVA	NEGATIVA
90%	5,3%	NEGATIVA	NEGATIVA

Figura 19. Resultados económicos para la metodología UPME.

3.4.2. Metodología propuesta por el estudiante.

En la **Figura 20** se presentan los resultados obtenidos para la producción de biogás con la metodología implementada y propuesta por el estudiante. Se nota como la cantidad de

energía disponible con esta metodología, ante la misma cantidad de biomasa ingresada, presenta un valor de 4191 kWh/día (30% más que en la metodología UPME).

12		PRODUCCION DE ENERGÍA		
12,1	Cantidad Biomasa:	ton/d	1746	Peso húmedo
		m ³ /d	4989	
12,2	Tasa de generación:	m ³ /ton rs	33	Rango típico 60 a 150 m ³ biogas / ton rs
12,3	Generación biogás:	m ³ /d	57.472	% CH ₄ , 65 %
		m ³ /hr	2.395	24 horas
		m ³ /min	40	25 horas
12,4	Poder calorífico inferior biogás:	kW/m ³ CH ₄	5,0	
12,5	% CH ₄ biogás	%	65%	Contenido de metano en el Biogás
12,6	Rendimiento térmico:	%	35%	
12,7	Potencial disponible:	kWh	4191	
12,8	Factor de disponibilidad:		85%	
12,9	Electricidad generada:	KWh/día	85.489	
12,10	Rendimiento de la biomasa seca:	MW/ton	0,05	Rendimiento en generación eléctrica (Rango típico es de 0,05 a 0,30 MW/ton)
12,11	Potencia del equipo:	kW	4317	Capacidad Equipo de generación eléctrica
		MW	4,30	

Figura 20. Resultados de generación de biogás obtenidos con la metodología del proyecto de práctica.

En la **Figura 21** se presenta el análisis económico para la metodología propuesta por el estudiante. Se aclara que este análisis económico es el mismo para ambas metodologías, solo cambian los datos de entrada debido a las mejoras ingresadas por el estudiante.

Porcentaje inversión inicial	WTE		
	Degradación anaeróbica	Incineración	Pirolisis
10%	-8,0%	NEGATIVA	NEGATIVA
10%	-8,0%	NEGATIVA	NEGATIVA
20%	-6,8%	NEGATIVA	NEGATIVA
30%	-5,5%	NEGATIVA	NEGATIVA
40%	-4,0%	NEGATIVA	NEGATIVA
50%	-2,1%	NEGATIVA	NEGATIVA
60%	0,3%	NEGATIVA	NEGATIVA
70%	4,0%	NEGATIVA	NEGATIVA
80%	10,5%	NEGATIVA	NEGATIVA
90%	31,3%	NEGATIVA	NEGATIVA

Figura 21. Resultados económicos para la metodología del proyecto de práctica.

Para comparar de mejor manera los resultados obtenidos en ambas metodologías se presenta la **Tabla 5** como compilado que agrupa los datos de ambas situaciones.

Tabla 5. Comparación entre metodologías de cálculo.

COMPARACIÓN ENTRE METODOLOGÍAS			
Parámetro	Unidad	UPME	Proyecto de Práctica
Generación de Biogás	m ³ /día	68.166	57.472
Potencial Energético	kW/h	3.231	4.191
Factor de Disponibilidad	-	0,85	0,85
Producción de Electricidad	kWh/día	65.903	85.489

Al analizar los datos obtenidos con ambas metodologías se puede decir que la cantidad de biogás producido es comprensiblemente menor en la metodología propuesta en este proyecto de práctica, reconociendo que la gran mayoría de biomásas ingresadas a ambos aplicativos para el municipio de Montelíbano (Estiércol bovino, paja de arroz y caña de maíz) presentaron una tasa de producción menor con el método TBMP utilizado.

Respecto a las diferencias entre la producción de biogás de ambos aplicativos, la brecha se hará más grande cuando se ingresen datos correspondientes a biomásas como el bagazo de caña de azúcar y el bagazo de caña panelera. Estas biomásas son las que presentaron la mayor diferencia en la tasa de producción en las dos metodologías.

A pesar de lo descrito anteriormente, el potencial energético fue mayor para la metodología propuesta por el estudiante que para la metodología UPME. Este hecho se atribuye a la utilización de la Ecuación 2 en lugar de la Ecuación 3 (con la que viene originalmente el aplicativo UPME). El solo hecho de utilizar la Ecuación 2 provoca un aumento en la producción de biogás de 30%. Consecuentemente, con este aumento del 30% la producción de electricidad también se verá incrementada en esta misma cantidad.

Con respecto al análisis económico, comparando las **Figuras 19 y 21** se nota como un aumento en la producción de energía hace que un proyecto de valorización energética sea mucho más factible y viable. En la **Figura 19** se nota como el proyecto con estas biomásas no es factible con ninguna clase de inversión del estado. Se requerirá más tiempo que la vida útil de la planta para recuperar la inversión. Al contrario, con la metodología propuesta en el proyecto de práctica, se alcanza una tasa de retorno aceptable ($\approx 11\%$ según los estándares definidos por INERCO y UPME) con una inversión por parte del estado del 80%, lo cual representa un mejoría notable.

Se debe resaltar que un proyecto de esta índole impactaría no solamente un municipio, a diferencia de lo que se hizo en esta comparación entre metodologías. Se concluye que cuando se calcule con el método propuesto por el proyecto de práctica, tomando en cuenta varios municipios y su generación de residuos sólidos orgánicos, se tendrá un porcentaje más alto de factibilidad que en el aplicativo original.

4. Conclusiones

- Al final de la realización del proyecto de práctica se logró aumentar el conocimiento general de los procesos más importantes de valorización energética de residuos sólidos. Además se identificaron diferentes aspectos particulares de cada uno de los procesos de valorización energética de residuos sólidos que entregan aspectos ventajosos al someterse a un contexto operativo específico.
- Cuando la biomasa presenta un alto porcentaje de humedad libre en su composición normal, la digestión anaeróbica pasa a tomar un lugar privilegiado como tecnología de aprovechamiento. Retirar esta humedad requeriría del uso de una gran cantidad de energía, sumado a que un alto porcentaje de humedad iría en detrimento de tecnología de aprovechamiento como la incineración/combustión.
- Se reconoció que la columna vertebral de un sistema de valorización energética de biomasa la conforman dos etapas que no tienen mucho que ver con la tecnología de aprovechamiento utilizada. Estas dos etapas son: Un sistema de recolección robusto con amplia cobertura y un sistema de disposición final (relleno sanitario). Toda tecnología de valorización energética necesitará de un PGIRS (Plan Integral de Residuos Sólidos) que permita disponer los residuos que no se consumen en el proceso de valorización energética.
- Una valorización energética de residuos sólidos no implica siempre la producción de energía eléctrica a partir de la materia prima orgánica. Se reconoce que algunos procesos entregan como resultado otras sustancias con contenido energético como por ejemplo el biogás, sustancia con alto contenido de metano y que presenta un alto grado de versatilidad a la hora de utilizarse en el consumo de las actividades humanas.
- Se reconocieron las limitaciones y desafíos que presenta el trabajar con materia prima de origen natural. La más evidente de ellas es la gran variabilidad que presentan estos materiales entre muestras obtenidas en diferentes lugares, así como la variabilidad debido al clima. Esto aumenta la incertidumbre en cualquier tipo de resultados obtenidos y hace imposible e inviable la replicación de resultados de otros estudios realizados con materias primas de diferente origen al propio.
- Se realizó un estudio de la metodología UPME en el que se buscó determinar diferentes oportunidades de mejora, como se expuso a través del presente informe. A pesar de ello aún quedan algunos elementos de la metodología por estudiar, especialmente los ligados a los análisis económicos presentados en el aplicativo.
- Una vez determinadas y señaladas las oportunidades de mejora en la metodología UPME se implementaron en el aplicativo que se entrega en el Anexo 1. Como bien se determinó a través del presente informe, estas mejoras hacen referencia a diferentes áreas del conocimiento. Este no es un aplicativo totalmente nuevo, pues su base fundamental es aquel desarrollado por la metodología UPME. Se puede

considerar que el aplicativo desarrollado es una versión nueva, una actualización de la anterior.

- El aplicativo con las mejoras propuestas presenta resultados más favorables para la factibilidad de este tipo de proyectos en el país.
- Se nota como al evaluar la factibilidad de un proyecto de valorización energética para una población colombiana cercana a 100.000 habitantes puede considerarse un proyecto viable si la mayoría de los dineros provienen de las arcas estatales. En caso de que se quieran utilizar solo recursos privados (de los cuales se espera recuperar la inversión) es necesario impactar un mayor número de municipios, a menos de que un municipio produzca una cantidad de residuos con alto contenido energético.

5. Recomendaciones para trabajos futuros

El análisis del aplicativo aún no ha cubierto todos los aspectos y componentes de este. Por ello, se presentan a continuación oportunidades de mejora que aún no fueron implementadas o componentes del aplicativo que aún no fueron estudiadas.

- La principal componente de esta sección de trabajos futuros radica en el estudio de los libros “económicos” del aplicativo presentado por la UPME. Cuando se utiliza el nombre libros “económicos” se hace referencia a los libros que manejan las variables y criterios de evaluación y factibilidad económica de este tipo de proyectos. Ellos hacen parte de la segunda sección del aplicativo, si se toma en cuenta que la primera sección la componen los libros relacionados con los residuos sólidos ingresados, sus propiedades químicas y termodinámicas y las tecnologías de valorización energética.
- Se recomienda que en cálculos futuros no se utilice el poder calorífico inferior del biogás, ya que este depende fuertemente de las cantidades relativas de metano y de dióxido de carbono que lo constituyen, sumándose el hecho de que estas cantidades relativas varían dependiendo del de la biomasa analizada, y mucho más cuando se presenta una mezcla de biomásas, como es el caso del aplicativo.
- En cálculos futuros se recomienda implementar el poder calorífico inferior del metano ya que este se encuentra ampliamente identificado y calculado en la actividad ingenieril. Así con base en la mezcla de biomásas presente se determinaría el porcentaje de metano en el biogás y se podría realizar el cálculo con menor incertidumbre.
- Se presentan algunas oportunidades de mejora que aún no fueron implementadas en el aplicativo y que se tendrían en cuenta en una futura versión. Estas oportunidades de mejora tienen que ver con etapas de pretratamiento de los residuos (separación magnética, separación manual y mecánica), la determinación de la densidad de una

mezcla específica de biomásas de entrada, inconsistencia entre la fuente bibliográfica del aplicativo y los valores usados en el mismo, la determinación del valor de factores tales como el factor de disponibilidad de una planta de producción de energía y la eficiencia de un esquema de planta (*Combined Heat and Power, Combined Steam and Power, Power Only, etc.*), entre otras.

Anexos

1. Aplicativo nuevo con implementación de las oportunidades de mejora identificadas.
2. Marco teórico del proyecto de práctica (primera entrega parcial)
3. Artículo de la UNAL fuente bibliográfica principal del aplicativo.
4. Instructivo del aplicativo UPME, realizado por INERCO.

Bibliografía

- Achinas, S., & Willem Euverink, G. J. (2016). *Theoretical analysis of biogas potential prediction from agricultural waste*.
- Achinas, S., & Willem Euverink, G. J. (2016). Theoretical analysis of biogas potential prediction from agricultural waste. *Resource-Efficient Technologies*(2), 143-147.
- Adebisia, J. A., Agunsoyea, J. O., Belloc, S. A., Haris, M., Ramakokovhue, M. M., Daramolaf, M. O., & Hassana, S. B. (2017). Proximate Analysis and Physicochemical Properties of Sugarcane Bagasse, Cassava Periderm and Maize Stalk. *Waste and Biomass Valorization*. doi:10.1007/s12649-017-0089-5
- DANE. (2010). *ProyeccionMunicipios2005_2020*. Colombia .
- Gao, N., Li, J., Qi, B., Li, A., Duan, Y., & Wang, Z. (2013). *Thermal analysis and products distribution of dried sewage sludge pyrolysis*.
- Gao, N., Li, J., Qi, B., Li, A., Duan, Y., & Wang, Z. (2013). Thermal analysis and products distribution of dried sewage sludge pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*(105), 43-48.
- Gollakota, A., Kishore, N., & Gu, S. (2017). *A review on hydrothermal liquefaction of biomass*.
- Gollakota, A., Kishore, N., & Gu, S. (2017). A review on hydrothermal liquefaction of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(81), 1378-1392.
- INERCO. (2018). *Entregables 1, 2 y 3*. Bogotá D.C.
- Ioannidou, O., Zabaniotou, A., Antonakou, E., & Papazisi, K. (2008). *Investigating the potential for energy, fuel, materials and chemicals production from corn residues (cobs and stalks) by non-catalytic and catalytic pyrolysis in two reactor configurations*.
- Ioannidou, O., Zabaniotou, A., Antonakou, E., & Papazisi, K. (2008). Investigating the potential for energy, fuel, materials and chemicals production from corn residues (cobs and stalks) by non-catalytic and catalytic pyrolysis in two reactor configurations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (13), 750-762.
- Jeswania, H. K., Whitinga, A., Martin, A., & Azapagic, A. (2018). Environmental impacts of poultry litter gasification for power generation. *Energy Procedia*(161), 32-37.
- Jeswania, H. K., Whitinga, A., Martin, A., & Azapagic, A. (2018). *Environmental impacts of poultry litter gasification for power generation* . Manchester.
- Li, Y., Hao, L., & Chen, X. (2016). *Analysis of MSWI bottom ash reused as alternative material for cement production*. Beijing.

- Li, Y., Hao, L., & Chen, X. (2016). Analysis of MSWI bottom ash reused as alternative material for cement production. *Procedia Environmental Sciences*(31), 549-553.
- Lynn, C. J. (2016). *Municipal incinerated bottom ash (MIBA) characteristics and potential for use in road pavements*. Birmingham.
- Lynn, C. J. (2016). Municipal incinerated bottom ash (MIBA) characteristics and potential for use in road pavements. *International Journal of Pavement Research and Technology* (10), 185-201.
- Pahla, G., Mamvura, T., Ntuli, F., & Muzenda, E. (2017). *Energy densification of animal waste lignocellulose biomass and raw biomass*. Johannesburgo.
- Rao Pala, L. P., Wang, Q., Kolb, G., & Hessel, V. (2016). Steam gasification of biomass with subsequent syngas adjustment using shift reaction for syngas production: An Aspen Plus model. *Renewable Energy*(101), 484-492.
- The world bank. (n.d.). *Technical guidance report. Municipal solid waste incineration*. Washington D.C.
- UNAL; TECSOL. (2018). *Estimación del potencial de conversión a biogás de la biomasa en Colombia y su aprovechamiento*. Bogotá D.C.
- Unchaisri, T., & Fukuda, S. (2017). Co-firing of of coal and rice straw pellet in a circulating fluidized-bed reactor. *Energy Procedia*(138), 766-771.
- Unchaisri, T., & Fukuda, S. (2017). *Co-firing of of coal and rice straw pellet in a circulating fluidized-bed reactor* .
- Vargas, F., & Guerrero, W. (2010). *Transformacion microbiana del bagazo de caña panelera en azucares fermentables utiles para la obtención de bioetanol* . Bucaramanga.