

# **EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE POLLINAZA Y RESIDUOS DE POSCOSECHA DE ROSAS MEDIANTE CO-DIGESTIÓN ANAERÓBIA.**

## **EVALUATION OF THE ENERGY POTENTIAL OF MANURE CHICKEN AND POSTHARVEST RESIDUES OF ROSES BY CO-DIGESTION ANAEROBIA WITH**

Sandra Milena Muñoz López <sup>a</sup>, Ingrid Tatiana Suarez González <sup>a</sup>, Iván Cabeza Rojas <sup>a</sup>, Mario Andrés Hernández Pardo <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Facultad de ingeniería ambiental, Universidad Santo tomas (USTA), Carrera 9 No. 51 - 11, Bogotá, Colombia.

<sup>b</sup> Ingeniería Ambiental, Universidad EAN, Calle 79 No. 11-45, Bogotá, Colombia

---

### **Resumen**

Los usos potenciales de la biomasa residual como fuente alternativa de energía y sus posibles esquemas tecnológicos de aprovechamiento, exigen que se profundice en el conocimiento de los aspectos específicos relacionados con su oferta, composición y potencial energético. El sector avícola y floricultor generan altas cantidades de residuos que pueden ser transformados en energía. En esta investigación se determinó el potencial de generación de biogás de la pollinaza mezclada con residuos de poscosecha de rosas el cual fue obtenido a partir de co-digestión anaerobia. Este proceso se llevó a cabo en tres etapas; la primera donde se realizó una caracterización fisicoquímica de cada sustrato teniendo en cuenta los protocolos de métodos de análisis de suelo y tejido vegetal. En la segunda etapa se realizó el proceso de digestión para camas de tres meses, seis meses y 2,5 años, se trabajó con cargas orgánicas de 18,23 gSV, 3,76 gSV y 2,66 gSV respectivamente, donde la pollinaza de 3 meses fue la mayor productora de biogás con 700 mLCH<sub>4</sub>/gSV, seguido de la de 6 meses con 153 mL CH<sub>4</sub>/gSV y siendo la pollinaza de 2,5 años la que menos produce biogás con 151 mL CH<sub>4</sub>/gSV. En la etapa final se trabajó con la pollinaza de 3 meses y residuos de poscosecha de rosas donde se le realizó el proceso de co-digestión anaerobia. Se definieron cargas orgánicas de 0,5gSV, 1,25 gSV y 2 gSV. Los resultados obtenidos señalaron que con el proceso de co-digestión y una carga de 0.5 gSV se usan menores cantidades de sustratos de igual manera se optimiza el proceso y se aumenta la producción de biogás obteniendo como resultado 2560 mLCH<sub>4</sub>/gSV.

Se verificó la viabilidad económica del proyecto, se comparó la energía térmica utilizada en la granja con la producida mediante la co-digestión. La vida útil del biodigestor es de 6 años ya que en este tiempo se debe invertir nuevamente aproximadamente un 65% correspondiente a la inversión inicial, el biodigestor supe el 56.73% de la energía térmica que utiliza actualmente la granja. El valor presente neto (VPN) es de \$ 42'914.308 y la

TIR es de 150%, esto refleja que el proyecto es viable, el IPC se tomó de los últimos siete años con un valor de 4,28%. El proyecto genera 46534789.62 kcal/año de gas propano que corresponde a un ahorro en el valor de la factura de \$8'439.751.851 al año para la empresa Agroinca Ltda.

### **Abstract.**

The potential uses of the residual biomass as an alternative source of energy and its possible technological schemes of exploitation, require that the knowledge of the specific aspects related to its supply, composition and energetic potential be deepened. The poultry and floriculture sector generate high amounts of waste that can be transformed into energy. In this research, the biogas generation potential of the pollinaza mixed with postharvest residues of roses was determined, which was obtained from anaerobic co-digestion. This process was carried out in three stages; the first where a physicochemical characterization of each substrate was carried out taking into account the protocols of soil and plant tissue analysis methods. In the second stage, the digestion process was carried out for beds of three months, six months and 2.5 years, working with organic loads of 18.23 gSV, 3.76 gSV and 2.66 gSV respectively, where the poultry litter 3 months was the largest producer of biogas with 700 mLCH<sub>4</sub>/gSV, followed by 6 months with 153 mL CH<sub>4</sub>/gSV and being the 2.5-year-old poultry man who produced the least biogas with 151 mL CH<sub>4</sub>/gSV. In the final stage, we worked with the 3-month-old poultry manure and post-harvest residues of roses where the anaerobic co-digestion process was carried out. Organic loads of 0.5 gSV, 1.25 gSV and 2 gSV were defined. The results obtained indicated that with the co-digestion process and a load of 0.5 gSV, smaller amounts of substrates are used in the same way, the process is optimized and the production of biogas is increased, obtaining as a result 2560 mLCH<sub>4</sub>/ gSV.

The economic viability of the project was verified, the thermal energy used in the farm was compared with that produced by co-digestion. The useful life of the biodigester is 6 years since in this time it is necessary to invest again approximately 65% corresponding to the initial investment, the biodigester supplies 56.73% of the thermal energy currently used by the farm. The net present value (NPV) is of \$ 42'914.308 and the IRR is 150%, this reflects that the project is viable, the CPI was taken from the last seven years with a value of 4.28%. The project generates 46534789.62 kcal / year of propane gas that corresponds to a saving in the value of the bill of \$ 8'439.751.851 a year for the company Agroinca Ltda.

### **Introducción**

La biomasa es la materia viva que está presente en la biósfera del planeta, también lo es los residuos que se derivan de procesos naturales o artificiales de transformación de la materia orgánica. Estos residuos se conocen como biomasa residual, cuando se generan en procesos artificiales o industriales se asocian con los residuos de las cosechas o de la ganadería, es decir de cualquier actividad económica que use como factor de producción la biomasa. Algunos ejemplos de biomasa residual son los residuos

de las cosechas, los efluentes ganaderos, los lodos de los sistemas de tratamiento de aguas residuales entre otras [1].

El estiércol animal constituye una importante fuente de biomasa residual. Los sistemas de producción pecuaria que se desarrollan en el país generan grandes volúmenes de estiércol [1]. En Colombia, según el atlas de biomasa residual el sector pecuario cuenta con el 76% (38.848.204 ha) del área total destinadas a las actividades agropecuarias, donde el 40% corresponde al sector avícola [1]. La industria avícola está creciendo rápidamente junto con el consumo humano, lo que da como resultado grandes cantidades de desechos animales para ser tratados. Según la federación Nacional de avicultores de Colombia FENAVI, la producción de pollos fue 1.478.924 de toneladas en 2016, con un aumento del 15% frente a los últimos tres años anteriores [2]. El sector representa la industria más dinámica de la actividad agropecuaria, el proceso se da de 42 a 50 días luego el pollo es sacrificado y disponible para la venta [2]. El 2007 generó 74.827.204 cabezas, las cuales produjeron 1.911.835 toneladas de estiércol, equivalentes a 25.879,57 TJ/anuales [1]. La mayor concentración del sector avícola se encuentra en el departamento de Cundinamarca y Santander, donde Bogotá cuenta con 1.900.000 cabezas de aves al año generando en promedio 190.000 toneladas de estiércol al año [1]. Uno de los diversos usos que se le da a este estiércol es el compostaje donde se hace una biotransformación con el fin de evitar contaminación orgánica, generando un producto (abono), en el que con ayuda la energía pasiva del sol, aerobia y termófila, las esporas y los hongos se multiplican y convierten la paja, pasto seco y la pollinaza en una biomasa y materia orgánica estabilizada [3]. La pollinaza, es la combinación de la excreta de las aves de engorde con el material que se utiliza como cama para los pollos (aserrín de madera, cascarilla de arroz o de soya u olote de maíz molido). Esta recibe las heces y orina de las aves con toda su carga bacteriana, plumas, aditivos químicos entre otros [4] [4].

Por otra parte, según el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) en el sector floricultor existen 6,645.5 hectáreas dedicadas a la producción de flores ornamentales tipo exportación; Los municipios de Madrid, El Rosal, Facatativá y Tocancipá, del departamento de Cundinamarca, agrupan el 34% del total del área sembrada [5] y en particular el municipio de Nemocón cuenta con 172 hectáreas equivalente al 3,2% del área total de los municipios destinados a este fin [6], las rosas han estado entre las flores más apreciadas por la humanidad durante siglos. Además de su significado sociocultural y uso decorativo, son también una fuente rica de sustancias biológicamente activas [7]. El programa social y ambiental de la floricultura (Florverde) realizó estudios sobre 27 empresas donde se estableció que en estas se generaron 40 mil toneladas de residuos sólidos, de los cuales 90,1% corresponden a desechos vegetales, el 5,2% a madera, el 2,2% al cartón, el 1,2% al plástico invernadero y el restante a chatarra y capuchones y plásticos. A su vez encontró que se reciclaron 27 mil toneladas de residuos sólidos, de los cuales 91,78% corresponden a desechos vegetales, 5,11% a madera, el 1,59% al plástico invernadero, el 1,09% al cartón y el restante a chatarra y capuchones plásticos. [8].

Estos residuos vegetales son una materia prima que debe ser aprovechada ya sea en el mismo cultivo, en otros cultivos agrícola o dentro o como sustrato para generar energía. Es preciso que se defina la alternativa para el manejo de los residuos vegetales, dependiendo el tipo y volumen de desechos y teniendo en cuenta la viabilidad económica y ambiental de dicho manejo. Las alternativas usuales en la floricultura para el manejo de los desechos vegetales son el compostaje o la incorporación a praderas [9].

Estos dos ejemplos de biomasa residuales, la pollinaza y residuos poscosecha de flores, se pueden considerar como cultivos energéticos por su alta productividad de residuos. Esta biomasa se convierte en energía a través de procesos de gasificación o de producción de biogás. La digestión anaerobia es la técnica más usada para producir biogás con la degradación de la materia orgánica mediante la acción de microorganismos, a esto se le conoce como valorización de residuos. Por último la co-digestión anaerobia permite tratar o valorizar dos o más tipos de residuos [10]. Allí la materia orgánica biodegradable se descompone por acción de bacterias anaerobias desde su forma más compleja hasta su forma más simple produciendo biogás con un contenido de metano entre 55 y 70%. En varios países se realizan procedimientos y metodologías para la valorización de residuos, los países europeos son pioneros en la obtención de energía eléctrica a partir de la generación de biogás como Alemania, Reino Unido y Dinamarca. En 2013, se produjeron 2,6 Mtep de calor a partir de biogás. Alemania fue el mayor productor de calor a partir de esta tecnología (1,3 Mtep) en 2013 [11]. En el informe estadístico del año 2016 se asegura que este sector ha tenido un crecimiento continuo en Europa durante los últimos seis años triplicando el número de plantas de biogás, donde se cuantificó el total de electricidad generada a partir de biogás en 60,6 TWh, volumen que corresponde con el consumo anual de 13,9 millones de hogares europeos [12].

El presente proyecto se desarrolla dada la necesidad de la integración de energías renovables no convencionales enfocado en la evaluación del potencial térmico aplicando la prueba del potencial bioquímico de metano (BMP) que es un índice de biodegradabilidad anaerobia de residuos orgánicos y determina el valor experimental de la producción máxima de metano que genera una cantidad conocida de residuos orgánicos [13]. El BMP se usa para evaluar la digestión anaerobia lo que permite encontrar el sustrato individual que tiene mayor potencial y así determinar el metano producido por los diferentes residuos. En base a los resultados del BMP se escoge la mayor productora de metano y se procede a realizar la evaluación del potencial de las mezclas. Este proyecto se enfoca principalmente en evaluar la producción de metano a través del proceso de co-digestión anaerobia utilizando diferentes sustratos disponibles y en grandes cantidades dentro del departamento de Cundinamarca Colombia, la pollinaza fue escogida de la empresa Agroinca Ltda. y los residuos de la poscosecha de los cultivos de rosas de la empresa Flores la Aurora, ambas empresas ubicadas en el municipio de Nemocón. Lo anterior se llevó a cabo aplicando la prueba BMP para los diferentes tipos de residuos y sus mezclas correspondientes. El estudio permite aclarar el potencial de valorización de los residuos que han sido puestos a prueba mediante co-digestión anaerobia.

## **Materiales y métodos**

### **Inóculo**

El inóculo utilizado fue lodo de un biodigestor de aguas residuales planta de Alpina S.A, en Sopo, Cundinamarca (Colombia). Este lodo fue seleccionado ya que proviene de un sistema de funcionamiento estabilizado que da garantía de obtener producción de biogás.

### **Sustratos**

Los sustratos utilizados para este proyecto fueron: Pollinaza suministrada por la empresa avícola Agroinca Ltda. ubicada en el municipio de Nemocón, Cundinamarca de la granja Extremadura la cual cuenta actualmente con 35000 cabezas de pollos, donde se tomaron muestras de camas de 3 meses, 6 meses y dos años y medio, estos tiempos corresponden a la antigüedad de la cama. Como co-sustrato se usaron residuos de poscosecha de rosas que fueron obtenidos de la empresa Flores la Aurora ubicada en el municipio de Nemocón, Cundinamarca; se seleccionó este tipo de residuos por su alta relación C/N además de su cercanía a la empresa avícola.

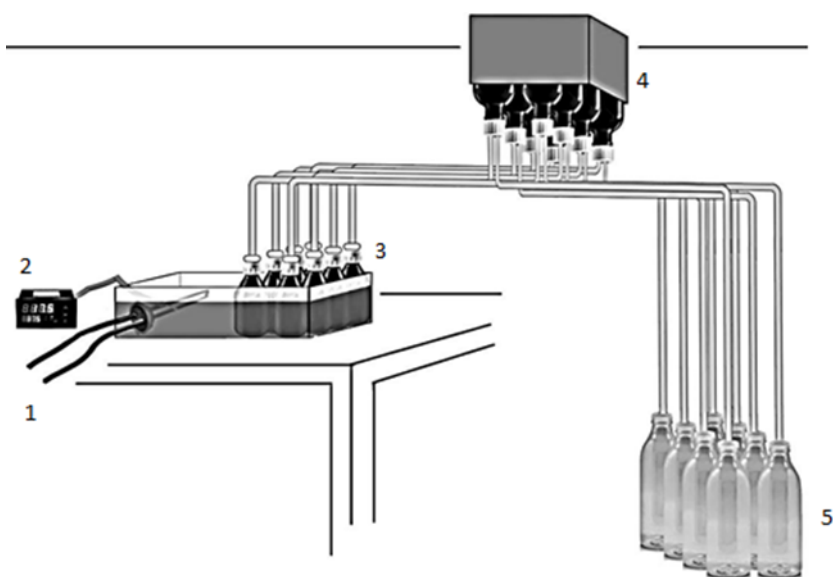
### **Metodología**

#### **Potencial Bioquímico de Metano (BMP)**

Para el desarrollo de esta metodología se tuvieron en cuenta principios y procedimientos descritos de la digestión anaerobia para monitorear la biodegradabilidad anaerobia relativa de los sustratos [14] [15]. Los ensayos se llevaron a cabo en botellas ámbar de 250 mL y 1000 mL. Se tuvo un volumen total de trabajo de 200 mL (reactores) y 850 mL (botellas de medición) respectivamente. A cada reactor se le añadió la mezcla de sustrato/inóculo y se completó su volumen con agua destilada. Las botellas de medición fueron ubicadas de manera invertida y se conectaron mediante una manguera a los reactores, fueron llenadas con una solución básica de NaOH con el fin de establecer si la solución está reteniendo el dióxido de carbono que ingresa en el biogás. Cuando el biogás ingresa a la botella de medición el contenido de CO<sub>2</sub> presente es retenido por la solución de NaOH y el gas metano se ubica en la parte superior de la botella invertida, ver esquema 1. El volumen de metano acumulado es igual al volumen desplazado de la solución contenida en la botella de medición [16] [17].

Se montaron 3 réplicas para cada reactor de las tres camas y otras que contenían únicamente inóculo y agua destilada, con el fin de comparar las mediciones realizadas sobre estos reactores y los reactores con mezcla sustrato/inóculo, lo que permite establecer la producción neta del metabolito evaluado. La temperatura del baño se mantuvo en una condición mesófila de 35°C en por un periodo de 21 días y con un pH neutro; este se controló mediante una solución buffer la cual hace disminuir la variabilidad en el pH.

Figura 1. Montaje Experimental



1. Termo resistencia de 110V, 2. Control de temperatura digital, 3. Biodigestor (Sustrato + inoculo) (200 mL) 4. Solución básica (850 mL), 5. Almacenamiento de líquido (1000 mL).

Fuente: Autores

Para la co-digestión igualmente se manejaron 3 réplicas en cada reactor 0,5gSV, 1,25gSV y 2.0gSV, cada una corresponde a la carga de gSV, también se manejaron réplicas que contenían únicamente inóculo y agua destilada, para así comparar las mediciones y establecer la producción neta del metabolito evaluado. El ensayo se manejó bajo el mismo diseño, mismos parámetros de retención (21 días), temperatura (35°C), pH y metodología para determinación del biogás producido. Se trabajó con una relación sustrato/inoculo S/X:3 y una relación C/N de 16,2 dado que los ensayos de co-digestión registraron esta relación como óptima.

### Métodos analíticos

Los parámetros analizados para los sustratos fueron los siguientes: sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y demanda química de oxígeno (DQO) que se determinaron mediante métodos estándar según la normativa APHA [18], estos parámetros son los más frecuentemente monitoreados en proceso de Digestión Anaerobia, el nitrógeno Kjeldahl (NTK) se determinó según el manual de procedimientos analíticas para suelos y plantas [19].

### Análisis económico

La empresa Agroinca Ltda. registro para el año 2017 un consumo de 9.193 kWh/año con un valor en la factura de \$ 3'544.972 anual y para el consumo de energía térmica 776,85

kg/año por un valor de \$ 19'504,892. Para ese año el precio del kg de gas fue de \$ 1986,25 y de \$385,61 para el kWh.

A continuación se muestra el poder calorífico inferior y superior del gas propano, metano y biogás.

*Tabla 1. PCI Y PCS gas propano, metano y biogás.*

| <b>Poder calorífico</b> | <b>Inferior</b> | <b>Superior</b> | <b>Unidades</b>     |
|-------------------------|-----------------|-----------------|---------------------|
| Gas propano             | 11000           | 12013           | kcal/kg             |
| Metano                  | 8570            | 9530            | kcal/m <sup>3</sup> |
| Biogás                  | 7456            | 4600            | Kcal/m <sup>3</sup> |

*Fuente:* [20]

Con el poder calorífico del gas propano se calculó la generación de metano producido bajo el proceso de co-digestión con el fin de verificar si se suple con las necesidades actuales de consumo de la granja.

El estudio económico del proyecto, se soportó con un análisis del retorno de la inversión, basado en elementos como: Cálculo de la tasa interna de retorno (TIR) y la incidencia de los efectos inflacionarios para la comparación de cifras (VPN). Los efectos inflacionarios se determinaron con el promedio aritmético del IPC de los últimos 7 años teniendo un valor de 4,18%.

Para el cálculo de los criterios de decisión (VPN y TIR) se utilizaron las siguientes fórmulas.

$$\text{VPN: } -S_0 + \sum_{t=6}^n \frac{St}{(1+i)^t}$$

**S<sub>0</sub>:** Inversión inicial

**S<sub>t</sub>:** Flujo de efectivo neto del periodo t

**n:** Número de periodos de vida del proyecto

**i:** Tasa de recuperación mínima atractiva (IPC)

$$\text{TIR: } \sum_{t=0}^n \frac{St}{(1+So)^n}$$

**St:** Flujo de efectivo neto del periodo n

**n:** Número de periodos

**So:** Inversión inicial

## Resultados y discusión

### Caracterización de residuos

Para determinar la cantidad de sustrato a utilizar a nivel individual y seleccionar la mejor mezcla para la co-digestión, se evaluaron las principales características fisicoquímicas de los distintos sustratos, ver tabla 2.

*Tabla 2. Parámetros Fisicoquímicos Sustratos*

| Parámetros                        | Camas        |               |                 | Residuos<br>poscosecha rosas |
|-----------------------------------|--------------|---------------|-----------------|------------------------------|
|                                   | 3 meses      | 6 meses       | 2,5 años        |                              |
| <sup>a</sup> Humedad (%)          | 16.49 ± 3.18 | 16.30 ± 5.65  | 9.20 ± 0.42     | 78,98 ± 1,19                 |
| <sup>a</sup> Cenizas (%)          | 18.98 ± 5,26 | 16.28 ± 1.185 | 19.29 ± 0.482   | 4,87 ± 1,85                  |
| Sólidos totales (%)               | 84,50 ± 0.44 | 84,68 ± 0.62  | 91,21 ± 0.10    | 25,6 ± 0,04                  |
| Sólidos volátiles (%)             | 63.69 ± 6.78 | 66.00 ± 6.86  | 69.97 ± 0.77    | 19,99 ± 0,21                 |
| <sup>a</sup> DQO (mg/L)           | 267 ± 14     | 1334 ± 72.51  | 2002.33 ± 39.55 | 3376,5                       |
| Materia orgánica (%)              | 89,01 ± 5,26 | 83,71 ± 1,18  | 80,72 ± 0,49    | 95,12 ± 1,85                 |
| Carbono orgánico (%)              | 48.56        | 48.56         | 46.81           | 55,17                        |
| <sup>a</sup> Nitrógeno total K(%) | 3.01         | 4.16          | 3.87            | 3,18                         |
| Relación C/N (%)                  | 16.13        | 11.67         | 12.09           | 17,35                        |

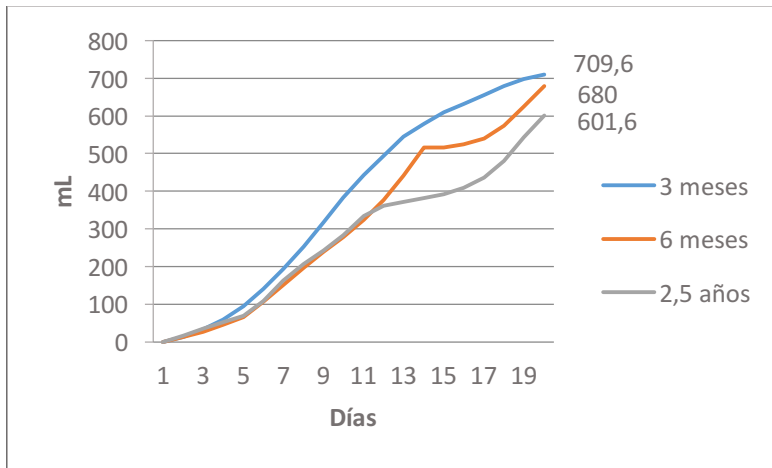
*a Muestras sobre base húmeda  
Promedio ± desviación estándar sobre 3 réplicas de cada muestra  
Fuente: Autores*

Como se puede observar la humedad presente en los sustratos de pollinaza disminuye respecto a su edad siendo la cama de 2,5 años la que menor valor presenta, el valor promedio para cenizas de pollinaza oscila entre 10% a 20%, valor que se encuentra en el rango para este tipo de residuo, estudios similares encuentran valores de 17,45% y 18,44% [21]. Con respecto a los sólidos volátiles y totales fueron aumentando respecto a la edad de las camas de pollinaza estos permiten determinar la cantidad de materia orgánica (MO) en el sustrato ya que esta última es mayor al 70%; esto se debe a la adición de material lignocelulósico de las camas que no se degrada en el compostaje y compensa así la estabilización a través del proceso aerobio lo que indica buen potencial para la degradación biológica [22]. En cuanto al nitrógeno, se puede observar que la mayoría de los sustratos tienen un bajo contenido de este, lo que en principio favorecerá al sistema, en la variable de relación C/N se puede observar que esta presenta un rango de 12.09 a 17.35 respectivamente, estos valores son bajos respecto a la relación ideal para la digestión anaerobia que va desde 20 a 30, esta baja relación puede generar un aumento de nitrógeno que provocaría la acumulación de amoníaco acelerando el aumento en los niveles de pH lo cual puede promover un ambiente tóxico para que existan bacterias metanogénicas, es recomendado mezclar sustratos de C/N baja con sustratos de C/N alta [23] [24] [25]. Para la digestión anaerobia las bacterias usan de 25 a 35 veces más carbono que el nitrógeno y la proporción de carbono a nitrógeno deben ser de 25-30:1 [26].

### **Potencial Biológico de Metano; Digestión Pollinaza**

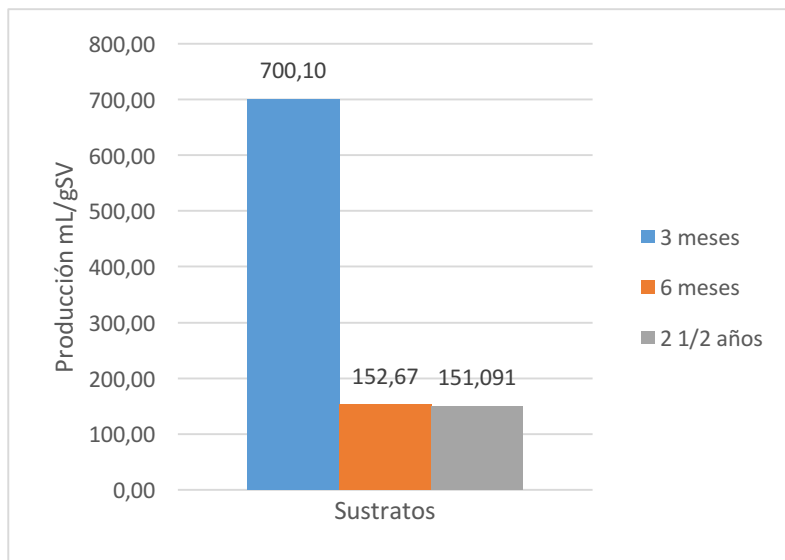
Las pruebas para el potencial de metano de pollinaza mostraron una producción acumulada similar en las tres camas, ver gráfico 1. Para la producción neta en el tiempo de retención del ensayo, la cama de 3 meses presentó un valor significativo respecto a las otras dos camas, ver gráfico 2.

Gráfico 1. Producción acumulada de metano camas de pollinaza



Fuente: Autores

Gráfico 2. Producción neta sustratos de pollinaza



Fuente: Autores

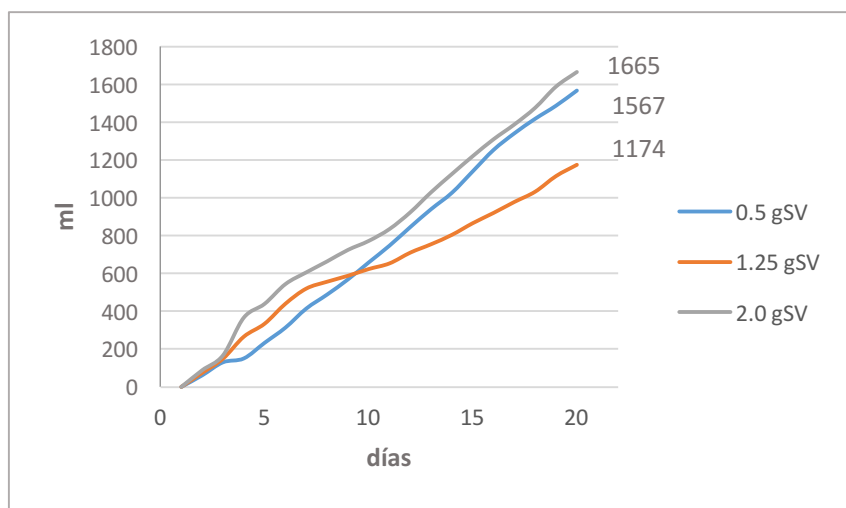
La producción de biogás en los primeros cuatro días fue baja debido a la adaptación en los reactores y después se incrementó con una tendencia similar [27]. Los reactores de 6 meses y 2,5 años tuvieron una menor producción de biogás debido a que estas camas con la edad contienen menor cantidad de materia orgánica, este es un comportamiento de esperar y es semejante al reportado por otras investigaciones [27]. La cama de 3

meses presentó la producción mayor con un volumen de 700 mLCH<sub>4</sub>/gSV comparada con 6 meses y la de 2,5 años las cuales tuvieron 153 mL CH<sub>4</sub>/gSV y 151 mLCH<sub>4</sub>/gSV respectivamente. Los cambios se pudieron ver afectados por la actividad microbiana ya que esta sufrió una caída entre los días 14 y 16 para las tres camas, según la disponibilidad de la materia orgánica se recuperaban los microorganismos, estos pudieron consumir más rápido el alimento y teniendo poca materia orgánica su rendimiento no sería el mismo. También se relaciona con los gSV que fueron usados para el montaje; teniendo 0,35 gSV para la cama de 3 meses, 1,85 gSV para la de 6 meses y 2,94 gSV para la de 2,5 años, el acumulado del sustrato-acumulado del blanco/gSV indican la producción neta que se reflejan en la gráfica 2. Para la digestión anaerobia y específicamente respecto a la relación C/N se debe tener en cuenta la importancia de una C/N óptima, ya que una baja relación genera problemas de toxicidad en los reactores [28] lo cual explica como la cama de 3 meses obtuvo los mejores y mayores resultados de producción. Los resultados de la cama más joven (3 meses) se pueden comparar con un estudio donde se usó pollinaza fresca obteniendo una producción de 506 mLCH<sub>4</sub>/gSV a una temperatura de 35°C [29]. Para las camas de 6 meses y 2,5 años se obtuvieron valores menores de producción teniendo una relación C/N también menor que oscilo entre 11-12, estudios con camas más viejas revelan resultados de 267 mLCH<sub>4</sub>/gSV datos cercanos a los obtenidos en la presente investigación [30].

### Potencial Biológico de Metano; Co-digestión cama 3 meses y residuos de poscosecha de rosas

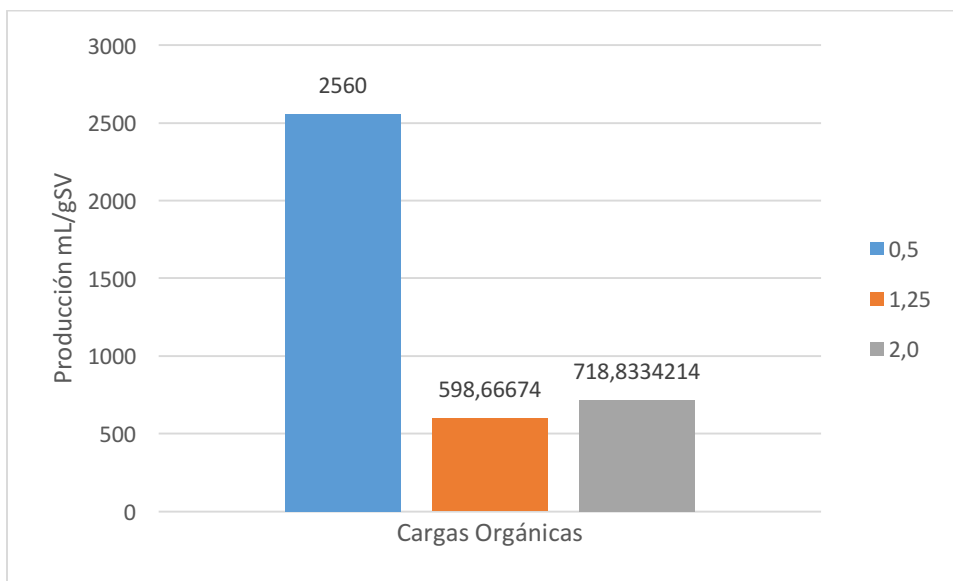
El gráfico 3 y 4 presenta la producción acumulada y neta respectivamente de la co-digestión para cama 3 meses y residuos de poscosecha de rosas.

Gráfico 3. Producción Acumulada mezcla de pollinaza 3 meses y residuos de poscosecha de rosas.



Fuente: Autores

Gráfico 4. Producción Neta mezcla de pollinaza 3 meses y residuos de poscosecha de rosas.



*Fuente: Autores*

Para los montajes de co-digestión, la mezcla que presentó mayor producción acumulada fue la de 2gSV, seguido de la de 1,25 gSV y por último la carga de 0,5 gSV; sin embargo, para la producción neta, el mayor valor se presentó en la carga de 0,5 gSV con 2560 mLCH<sub>4</sub>/gSV. Los valores de gSV fueron escogidos partiendo de estudios que indican que una proporción adecuada para obtener resultados óptimos en cuanto a los gramos de sólidos volátiles está entre 0,23 y 2,09 gSV, esto muestra que la carga de 0,5 gSV se encuentra dentro del rango establecido [31].

Los valores máximos obtenidos durante el proceso de co-digestión demuestran ser significativos comparados con valores de 695 mLCH<sub>4</sub>/gSV [29] donde se ha mezclado la pollinaza con residuos agrícolas, en otros reportes se evidencia valores similares de producción con 2485,91 mLCH<sub>4</sub>/gSV manejando una C/N de 25 y 0,5 gSV [33], para esta investigación se produjeron 2560 mLCH<sub>4</sub>/gSV bajo la misma proporción de sólidos volátiles 0,5 gSV pero trabajando con una C/N de 16, esto demuestra que el proceso de co-digestión entre la pollinaza de 3 meses y los residuos de poscosecha de rosas resulta más eficiente que la digestión única de pollinaza debido a que mejora la relación de sustratos. Las excretas de animales son ricas en nitrógeno con una relación inferior a 25:1 significa que durante la fermentación tendrá mayor velocidad de degradación y producción de gas, en cuanto a los residuos lignocelulosos los cuales son ricos en carbono con una relación superior a 30:1 producen más gas que las ricas en nitrógeno sin embargo la generación es más lenta. El contenido de lignina que tienen los residuos de rosas en tallo (25-26) pétalos (17-22) hace que la disponibilidad de la celulosa acelere la hidrólisis.

## **Análisis económico**

## Dimensionamiento biodigestor

Para la evaluación económica de la implementación de una planta de biogás se seleccionó un Biodigestor plástico de flujo continuo tipo CIPAV. Estos digestores son de bajo costo, fácil construcción y mantenimiento. Se cuenta con una caja de entrada y otra de salida, está constituido por una bolsa de polietileno tubular calibre 8 donde su longitud puede llegar a los 100 mts, lo que da capacidad suficiente para la alimentación de una gran carga orgánica [34].

Parámetros para el dimensionamiento del biodigestor tipo CIPAV

- Capacidad del biodigestor (m<sup>3</sup>): 6,10 m<sup>3</sup>
- Ancho de la fosa (m): 2,5 -2,0
- Profundidad de la fosa (m): 1,5-2,0
- Longitud de la fosa (m): 15-20
- Tiempo de retención: 21 días

Para la determinación del volumen del biodigestor se empleó la siguiente ecuación teniendo en cuenta los sustratos disponibles con los que cuenta la granja Agroinca Ltda y la sabana de Bogotá para los residuos de rosas.

$$volumen (m^3) = \frac{volumen\ sustratos * TRH}{365}$$

Pollinaza 3 meses: 60 ton/año

ρ Pollinaza 3 meses: 0,993 ton/m<sup>3</sup>

Residuos Rosas: 90,56 ton/año

ρ Residuos Rosas: 198 ton/m<sup>3</sup>

Los materiales para la elaboración del biodigestor de volumen de 6,1 m<sup>3</sup>, se muestran en el anexo 1 [34].

En el biodigestor es necesario eliminar el ácido sulfhídrico ya que es altamente toxico, corrosivo y provoca daños en la tubería, existen en el mercado filtros de biogás con un alto costo, para disminuir estos se utiliza una “Y” sanitaria de PVC de 4” de diámetro con tapa de rosca, a esta se le adapta un tubo de 1m de longitud con el mismo diámetro, se deben utilizar dos 2 reductores de 4” a 1 1/2” para la entrada y salida del gas, además de una unión. Este tubo se llena con una esponjilla de brillo, la cual reacciona con el ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S), eliminando su poder corrosivo [34]. Se escogió esta alternativa ya que resulta ser mucho más económica y de igual manera garantiza su durabilidad.

A continuación, se muestran los consumos actuales de la granja en unidades de energía térmica y los producidos con la implementación del biodigestor, ver tabla 3.

*Tabla3. Consumo de energía térmica de Agroinca Ltda y generación de metano con el proyecto.*

| Consumo<br>Gas propano | Generación<br>metano | Unidades   |
|------------------------|----------------------|------------|
| 107.545.350            | 61.010.560,38        | Kcal/año   |
| 449.969.744.400        | 255.268.184.623      | julios/año |

*Fuente: Autores*

La generación de metano teniendo en cuenta la disponibilidad de los residuos es de 7119.085 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/año, lo que equivale a 61.010.560.38 Kcal/año. La energía producida mediante la co-digestión supliría en un 57% los consumos de energía térmica con los que actualmente cuenta la granja. Teniendo en cuentas estos valores se procedió a realizar el flujo de caja de la vida útil del proyecto para la empresa Agroinca Ltda. ver tabla 4.

*Tabla 4. Flujo de caja proyecto Biodigestor*

| Años                                | 1                   | 2            | 3             | 4            | 5             | 6            |
|-------------------------------------|---------------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|
| <b>Inversión</b>                    |                     |              |               |              |               |              |
| Materiales                          | \$2'450.680         |              |               |              |               |              |
| Maquinaria                          | \$ 300,000          |              |               |              |               |              |
| Mano de obra                        | \$ 300,000          |              |               |              |               |              |
| Total                               | <b>\$ 3'050 680</b> |              |               |              |               |              |
| <b>Costos</b>                       |                     |              |               |              |               |              |
| Mano de obra                        | \$ 5'254,420        | \$ 5'702,870 | \$ 6189,594   | \$ 6,717,859 | \$ 7,291,210  | \$ 7,913,495 |
| Mantenimiento                       | \$ 900,000          | \$ 976,813   | \$ 1,060,181  | \$ 1,150,664 | \$ 1,248,870  | \$ 1,355,458 |
| Renovación plástico Tubular         | \$ 23.176           | \$ 25.154    | \$ 27.301     | \$ 29.631    | \$ 32.160     | \$ 34.905    |
| Total                               | \$ 6.177.596        | \$ 6.704.837 | \$ 7.277.076  | \$ 7.898.154 | \$ 8.572.240  | \$ 9.303.857 |
| Total inversión + costos primer año | <b>\$ 9.228.276</b> |              |               |              |               |              |
| Factura gas sin proyecto            | 19504892            | 21169580,7   | 22976345,98   | 24937313,7   | 27065644,6    | 29375622,66  |
| Factura gas con proyecto            | 11066141            | 12010605,59  | 13035677,63   | 14148236,74  | 15355749,69   | 16666320,55  |
|                                     | \$ 1.837.865        | \$ 6.704.837 | \$ 13.035.678 | \$ 7.898.154 | \$ 15.355.750 | \$ 9.303.857 |

*Fuente: autores*

Los criterios económicos indicaron una VPN de \$ 42'914.308 y una TIR de 150% teniendo presente que los costos del biodigestor fueron de muy bajo costo.

La proyección se realizó a 6 años dado que en este tiempo se deben hacer cambios de insumos que hacen parte del biodigestor y tendría que realizarse nuevamente una reinversión, adicionalmente se contemplan los gastos de mantenimiento; estos valores aumentan cada año respecto al aumento del IPC. El valor presente neto del proyecto a implementar es de \$42'914.308 lo que indica que en términos económicos el proyecto es viable.

## Conclusiones

Los residuos evaluados de pollinaza y de la poscosecha de rosas demostraron tener la capacidad de ser utilizados para la producción de metano. En la prueba de BMP, la cama de 3 meses presentó mayor producción de metano con 700 mLCH<sub>4</sub>/gSV, seguido la de 6 meses con 153 mLCH<sub>4</sub>/gSV y por último la cama de 2,5 años con 151 mLCH<sub>4</sub>/gSV. Un pretratamiento a la digestión anaerobia beneficia al sistema ya que facilita la degradación de las macromoléculas y aumenta la velocidad de la fase de hidrólisis. Los resultados de la prueba de co-digestión anaerobia muestra que la mejor mezcla en términos de producción de biogás respecto a los gSV fue la de 0,5 gSV combinada con la cama de 3 meses, con esta mezcla se alcanzó una relación C/N de 16 que estableció una condición de rendimiento óptimo a pesar que estudios indican que la C/N óptima es entre 20 y 30.

La cama de 3 meses y los residuos de poscosecha de rosas alcanzaron una producción de metano de 2560 mLCH<sub>4</sub>/gSV. Los resultados obtenidos en las diferentes pruebas indican que la aplicación de esta metodología permite la valoración de residuos sólidos que actualmente está causando un impacto ambiental negativo. El potencial de biogás encontrado para los sustratos individuales y sus mezclas correspondientes es la primera fase para la creación de modelos que facilitan la optimización del proceso de codigestión, la cama de 3 meses es un excelente sustrato para ser utilizado en diferentes procesos de digestión anaerobia debido a que no posee una deficiencia marcada en carbono como la mayoría de materias con estiércol animal.

La energía producida mediante el proceso puede suplir el 57% de la energía térmica consumida por la granja anualmente. El VPN \$ 42'914.308 refleja que el proyecto es factible desde el punto de vista financiero.

## Bibliografía

- [1] UPME, «Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia,» Colombia, 2011.
- [2] Federación Nacional de Avicultores de Colombia, «Fondo Nacional Avícola,» 2017. [En línea].
- [3] Silva M, Brás I, «Co-Composting of Poultry Manure with Different Organic Amendments,» *International Journal of Environmental and Ecological Engineering*, vol. 10, nº 8, pp. 848-852, 2016.
- [4] Benito, L M, «La problemática de las camas húmedas en las granjas broilers,» (*XXVIII Symposium de la Sección Española de la WPSA*, pp. 8-10, 1991.
- [5] Superintendencia de Sociedades, «Desempeño del sector floricultor 2008-2012,» Bogotá, 2013.
- [6] DANE, «Informe de resultados. Censo de fincas productoras de flores en 28 municipios de la sabana de Bogotá y Cundinamarca,» Bogotá, 2010.

- [7] Anton S, Ivelina V, Lyubomir S, Albena S, «Valorization of wastes from the rose oil industry-review,» *Environmental Science and Bio/Technology*, 2017.
- [8] Deicy Mabel Garcia Romero, «Responsabilidad social ambiental en el sector floricultor colombiano,» Bogotá, 2016.
- [9] Ministerio de medio ambiente, SAC, Asocolflores, «Guías de buenas prácticas ambientales para cultivo de flores y ornamentales,» Colombia, 2010.
- [10] AINIA Centro tecnológico, de *Co-digestión anaerobia*, Valencia, España, 2008, pp. 1-2.
- [11] Agencia Andaluza de la energía , de *Estudio básico del biogas*, Andalucía, España, 2011, pp. 3-166.
- [12] Asociación Española de Biogás, «Informe Estadístico 2016 de la Asociación Europea de Biogás,» España, 2016.
- [13] Gonzalez M, Perez S, Wong A, Bello R, Yañez G, «Residuos agroindustriales para la producción de metano mediante la digestión anaerobia,» *Revista argentina de microbiología*, nº 47, pp. 229-235, 2015.
- [14] Owen, W. F.; Stuckey, D. C.; Healy Jr, J. B., «Bioassayfor monitoring biochemical methane potential and anaerobictoxicity.,» *Water Research*, vol. 13, pp. 485-492, 1979.
- [15] Moody L, Burns R, Wu-h, Wei, Spajic R, «Use of Biochemical Methane Potential (BMP) Assays for Predicting and Enhancing Anaerobic Digester Performance,» *Proceedings of the 44th Croatian and the 4th International Symposium on Agriculture*, 2009.
- [16] Cendales Ladino, E. D., «Producción de biogás mediante la co-digestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable.,» Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2011.
- [17] Souto T, Aquino S, Silva S, Chernicharo C, «Influence of incubation conditions on the specifcmethanogenic activity test,» *Biodegradation*, vol. 21, pp. 411-424, 2010.
- [18] APHA, «Standard methods for the examination of water and wastewater,» Centennial Edition, Washington, EUA, 2005.
- [19] Alvarez S M, « Selección de métodos de diagnóstico de nitrógeno aprovechable en el suelo,» Colegio de Postgraduados , Chapingo, México, 1988.
- [20] Ministerio de energía y minas, «Tabla de conversiones energéticas,» [En línea]. Available: <http://www.energia.gob.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=3622>. [Último acceso: marzo 2018].

- [21] Rico J , Aguilar A, Mendez J, Cid C, Alor G, «Predicción del contenido de humedad en la pollinaza para estimar la producción de bioenergía a través de una red neuronal artificial,» *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, vol. 13, nº 3, pp. 933-955, 2014.
- [22] Cabeza I, Thomas M, Vásquez A, Acevedo P, Hernández M, «Anaerobic Co-digestion of Organic Residues from Different Productive Sectors in Colombia: Biomethanation Potential Assessment,» *Chemical Engineering Transactions*, vol. 49, pp. 385-390, 2016.
- [23] Environmental Protection Agency (EPA) AgSTAR, «Increasing Anaerobic Digester Performance with Codigestion,» EPA, 2012.
- [24] Matheri A.N, Ndiweni S, Belaid M.+, Muzenda E, Hubert R., «Optimising biogas production from anaerobic co-digestion of chicken manure and organic fraction of municipal solid waste,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 80, pp. 756-764, 2017.
- [25] Soria M, Ferrera, Ronald E, Jorge A, Javier T , Borges L, Pereyda G, «Producción de Biofertilizantes Mediante Biodigestión de Excreta Líquida de cerdo,» *Terra*, vol. 19, nº 4, pp. 353-362, 2001.
- [26] Kondusamy D, Kalamdhad A., «Pre-treatment and anaerobic digestion of food waste for high rate methane production- A review,» *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 2, p. 1821–1830, 2014.
- [27] Velmurugan B, Ramanujam R, « Co-Digestion of tannery solid wastes with primary sewage sludge and vegetable wastes for biogas production,» *The Journal of Solid Waste Technology and Management*, nº 1, pp. 11-18, 2012.
- [28] Fierro J, Martínez J.E, Rosas J G, Blanco D, Gómez X, «, Anaerobic co-digestion of poultry manure and sewage sludge under solid-phase configuration,» *Environmental Progress and Sustainable Energy*, pp. 33, 866-872, 2014.
- [29] Abouelenien F, Namba Y, Kosseva M, Nishio N, Nakashimada Y, «Enhancement oh methane production from co-digestion of chicken manure with agricultural wastes,» *Bioresourse Technology*, vol. 159, pp. 80-87, 2014.
- [30] James J, Huang H, Jason C, Shih H, «The potencial of biological methane generation from chicken manura,» *Biotechnologu and bioengineering*, vol. 23, pp. 2307-2314, 1981.
- [31] Nielfa A, Cano R, FDS-Polanco, M., «Theoretical methane production generated by the co-digestion of organic fraction municipal solid waste and biological sludge.,» *Biotechnology Reports*, vol. 5, pp. 14-21, 2015.
- [32] Rodriguez A, Angel J, Rivero E, Acevedo P, Santis A, Cabeza I, Acosta M, Hernandez M, «Evaluation of the Biochemical Methane Potential of Pig Manure, Organic Fraction of Municipal Solid Waste and Cocoa Industry Residues in Colombia,» *Chemical engineering transactions* , vol. 57, pp. 55-60, 2017.

[33] López A, «Valorización del estiércol de cerdo a través de la producción de biogás,» Asociación colombiana de porcicultores: fondo nacional de la porcicultura, Colombia, 2012.

## Anexo 1.

### Materiales para la construcción del biodigestor.

| Cantidad     | Descripción                                                          | Valor unitario (\$) | Valor total (\$)    |
|--------------|----------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|
| 300          | Ladrillos                                                            | \$ 450              | \$ 135.000          |
| 50 kg        | Cemento                                                              | \$ 24.000           | \$ 24.000           |
| 50           | Paladas de arena                                                     | \$ 458              | \$22.900            |
| 2            | Tubos PVC                                                            |                     | \$86.000            |
| 3,5          | 1 mt                                                                 |                     |                     |
| 20           | ½"mt                                                                 |                     |                     |
|              | ½" cm                                                                |                     |                     |
| 2            | Acople macho y hembra roscado de PVC de 1 ½"                         |                     | \$5.300             |
| 2            | Arandelas en aluminio de 15 cm de diámetro y agujero central de 1 ½" | \$ 3.200            | \$ 7.500            |
| 1            | Reductor de 1 ½" a ½"                                                |                     | \$13.900            |
| 2            | Reductores de 4" a ½"                                                |                     |                     |
| 1            | Tapa de ajuste o roscada de 1 ½"                                     | \$ 1.200            | \$ 1.200            |
| 1            | Galón transparente                                                   | \$ 2.000            | \$ 2.000            |
| 1            | "Y" sanitaria de PVC de 4"                                           | \$ 18.000           | \$ 18.000           |
| 10           | Metros de manguera roscada                                           | \$ 2.900            | \$ 19.000           |
| 20           | Metros de plástico tubular calibre 8 con protección de los rayos UV  | \$ 5.794            | \$115.880           |
| 1            | Generador de motor                                                   | \$ 2'000.000        | \$ 2'000.000        |
| <b>Total</b> |                                                                      |                     | <b>\$ 2'450.680</b> |

