



## USE OF THE ENERGY IN AGRICULTURE UTILIZACIÓN DE LA ENERGÍA EN LA AGRICULTURA



ORIGINAL ARTICLE | ARTÍCULO ORIGINAL

DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.32441.16483>

# Multiple responses optimization on the anaerobic co-digestion of coffee wastewater with manures

## *Optimización múltiple de respuestas en la codigestión anaerobia de aguas residuales de café con estiércoles*

Dr.C. Yans Guardia-Puebla<sup>I</sup>, Dr.C. Janet Jiménez-Hernández<sup>II</sup>, M.Sc. Raúl F. Pacheco-Gamboa<sup>I</sup>, Dr.C. Suyén Rodríguez-Pérez<sup>III</sup>, Dr.C. Víctor Sánchez-Girón<sup>IV</sup>

<sup>I</sup> Universidad de Granma, Departamento de Ingeniería Mecánica, Bayamo, Granma, Cuba.

<sup>II</sup> Universidad de Sancti Spiritus, Centro de Estudios para la Energías y Procesos, Sancti Spiritus, Cuba.

<sup>III</sup> Universidad de Oriente, Centro de Estudios de Biotecnología Industrial, Santiago de Cuba, Cuba.

<sup>IV</sup> Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Madrid, España.

**ABSTRACT.** A simplex-centroid design, followed by a responses analysis using the response surface methodology (RSM) and the multiple responses optimization (MRO) were used for the maximization of methane production and percentage volatile solid removal (% VS removal) on the anaerobic co-digestion of three different substrates: coffee wastewater (CW), cattle manure (CM) and pig manure (PM). Response surface analysis were investigated in accordance with the responses selected, and showed that the best mathematical models were quadratic ( $R^2 = 97.3\%$ ) and special cubic ( $R^2 = 93.2\%$ ), respectively. MRO showed that the optimum mixture, coffee wastewater = 39% and pig manure = 61%, achieved a high D function value (87.3%). At these conditions, high values of methane production of 1.09 L methane L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> and % VS removal of 80.5% were predicted.

**Keywords:** design of mixtures, response surface, volatile solid removal, methane production.

**RESUMEN.** Un diseño de mezclas simplex centroide, seguido de un análisis de las respuestas usando la metodología de las superficies de respuestas (RSM) y la optimización múltiple de respuestas (MRO) se utilizó para maximizar la producción de metano y el porcentaje de remoción de sólidos volátiles (SV) en la codigestión anaerobia de tres diferentes sustratos: agua residual de café (CW), estiércol vacuno (CM) y estiércol porcino (PM). El análisis de las superficies de respuestas fueron estudiadas de acuerdo a las respuestas seleccionadas, y mostraron que los mejores modelos de ajuste fueron el cuadrático ( $R^2 = 97,3$ ) y el cúbico especial ( $R^2 = 93,2$ ), respectivamente. La MRO mostró que la mezcla óptima, agua residual de café = 44% y estiércol porcino = 56%, alcanzó un alto valor en la función de conveniencia global D (87,3%). A esas condiciones se predicen altos valores de producción de metano de 1,09 L<sub>metano</sub> L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> y de porcentaje de remoción de SV de 80,5%.

**Palabras clave:** diseño de mezclas, superficie de respuesta, remoción de sólidos volátiles, producción de metano.

### INTRODUCTION

Anaerobic digestion is an attractive technique, due to its high potential for the organic wastes treatment; for that reason, the anaerobic digestion has had an increasing growth on recent years. Furthermore, anaerobic digestion has several environmental benefits, for instance: it generates renewable energy in form of biogas (methane), the recycling of nutrients, and decreasing of pollution. For all these advantages, several types of organic wastes have been anaerobically treated: sludge, domestic and industrial wastes, fruit and vegetable wastes, crop residues and manures (Aiyuk *et al.*,

### INTRODUCCIÓN

La digestión anaerobia es una técnica atractiva, ya que tiene un alto potencial para el tratamiento de los residuos orgánicos; por esa razón, ha tenido un creciente auge en los últimos años. Al mismo tiempo, la digestión anaerobia tiene varios beneficios ambientales, los que incluyen: la generación de energía renovable en forma de biogás (metano), la de recirculación de nutrientes y la reducción de la contaminación. Por todas esas ventajas, varios tipos de residuos orgánicos han sido tratados anaeróticamente: lodos, residuales domésticos e industriales, residuos de frutas y vegetales, residuos de cosecha y estiércoles

2006; Alvarez *et al.*, 2010; Rao & Baral, 2011; Zhang *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2013).

Critical reviews of the literature reveals that fewer reports are available about the optimization of the anaerobic co-digestion of agricultural wastes, in order to maximize the methane production yield and % VS removal (Murto *et al.*, 2004; Neves *et al.*, 2006; Ward *et al.*, 2008; Wu *et al.*, 2010; Fang *et al.*, 2011). In those investigations several responses variables were determined, for instance: methane yield, cumulative methane, % VS removal, and chemical oxygen demand (COD) removal. However, the authors did not establish the optimum combinations of mixtures to maximize those responses. Therefore, the objective of this paper was maximizing the methane production and % VS removal on the anaerobic co-digestion of coffee wastewater with pig and cattle manures. In this work, the synergic and antagonism effects of the mixture composition on the responses were studied using the results of the experimental design selected.

## METHODS

### Substrates for the co-digestion

Substrates used for the study of anaerobic co-digestion were coffee wastewater (CW), cattle manure (CM) and pig manure (PM). The coffee wastewater was obtained from manual processing of fresh-harvest coffee bean. In a vessel were disposal, 33 kg of coffee bean were cleaned from their pulp with 10 L of distilled water in a vessel; subsequently, Fresh cattle and pig manures were obtained of a local farm, near of the laboratory. Both manures were recollected of semi-solid form; to 1 kg of manure were added 3 L of distilled water (ratio 1:3). All substrates were keeping at low temperature (4 °C) until later use. As inoculums for the batch reactors was used an anaerobic sludge of a local plant of anaerobic treatment located on the farm.

### Experimental procedure

The experiments of co-digestion were carried out using crystal serological bottles of 500 mL as batch reactors. All the experiments were performed with three replicas in a temperature controlled-room and the average value of observations was taken for interpretation. Crystal bottles filled with the quantities required of substrates were inoculated with 40 ml of anaerobic sludge and homogenized through agitation before finishing the inoculation process. The total volume of substrate in each reactor was maintained at 200 mL. The evaluation period of the experiments was 22 days approximately.

### Analytical methods

pH, alkalinity, alkalinity index, ammonia(N-NH<sub>3</sub><sup>+</sup>), total solids (TS), total volatile solids (TVS) and total fixed solids (TFS) were determine according to APHA (APHA, 1995). Alpha index was calculated as the quotient of partial alkalinity at pH 5.75 and total alkalinity at pH 4.3. The methane generated

(Aiyuk *et al.*, 2006; Alvarez *et al.*, 2010; Rao y Baral, 2011; Zhang *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2013).

Una revisión crítica de la literatura especializada revela que existe un limitado estudio que comprende la optimización de la codigestión anaerobia de residuos agrícolas, con el objetivo de maximizar el rendimiento del metano y la eficiencia de eliminación de SV (Murto *et al.*, 2004; Neves *et al.*, 2006; Ward *et al.*, 2008; Wu *et al.*, 2010; Fang *et al.*, 2011). En estos estudios varias variables de respuestas fueron evaluadas, por ejemplo: el rendimiento de obtención de metano, la cantidad de metano acumulado, y la remoción de SV y la remoción de la demanda química de oxígeno (DQO). Sin embargo, los autores no determinaron las combinaciones óptimas de las mezclas en orden de maximizar las variables de respuesta. Por tanto, el objetivo de este trabajo fue maximizar la producción de metano y la eficiencia de eliminación de SV en la codigestión anaerobia de residuales de café con estiércoles de ganado vacuno y porcino. En este trabajo, se estudiaron los efectos sinérgicos y antagónicos de la composición de la mezcla en las variables de respuestas seleccionadas usando los resultados del diseño experimental seleccionado.

## MÉTODOS

### Sustratos para la codigestión

Los sustratos utilizados en el estudio de biodegradabilidad anaerobia fueron residuales líquidos del despulpe de café (CW), estiércol vacuno (CM) y estiércol porcino (PM). Las aguas residuales de café se obtuvieron del proceso de despulpe manual de los granos frescos de café. Para esto, 3 kg de frutos fresco de café fueron despulpados en 10 L de agua destilada; posteriormente, se extrajeron los granos y el epicarpio (cáscara), obteniéndose así el agua residual de café. Los estiércoles frescos vacuno y porcino se obtuvieron en una granja local, aledaña al laboratorio. Ambos estiércoles fueron recolectados de forma semi-sólida, y se le adicionaron 3 L de agua por cada litro de estiércol (relación 1:3). Todos los sustratos fueron almacenados en frío, a una temperatura de 4 °C hasta su posterior uso. Como inóculo para los reactores en "batch" fue utilizado un lodo anaerobio proveniente de una pequeña planta de tratamiento anaerobio ubicada en la misma granja.

### Procedimiento experimental

Los experimentos de co-digestión anaerobia se realizaron usando botellas serológicas de cristal de 500 mL de volumen como reactores en lotes. Todos los experimentos se montaron en triplicado en un cuarto con temperatura controlada y el valor promedio de las observaciones se utilizó para la interpretación de los resultados. Las botellas de cristal fueron llenadas con 40 mL de inóculo y las cantidades requeridas de los sustratos, los cuáles fueron homogeneizados mediante agitación antes de finalizar el proceso de inoculación. El volumen total de las mezclas de sustratos se fijó a 200 mL. El período de evaluación de los experimentos tuvo una duración de aproximadamente 22 días.

### Métodos analíticos

En todas las muestras fueron determinados el pH, la alcalinidad, el índice de alcalinidad, nitrógeno amoniacal (N-NH<sub>3</sub><sup>+</sup>), los sólidos

was estimated by the increasing of pressure in the test bottle containing a 10% NaOH solution, so that all the CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S produced were absorbed in the concentrated solution. All the characterizations were performed in duplicate and the average values were taken for further interpretation. All the chemicals used for the analysis were of analytical grade.

**Mixture design**

Mixture designs are used for studying the effects of the components in a mixture on the response variables; where “q” represents the number of ingredients on the system under study, and “x<sub>i</sub>” denotes the proportions of those ingredients (Ec. 1).

$$\sum_{i=1}^q x_i = x_1 + x_2 + \dots + x_q = 1; \quad x_i > 0; i = 1, 2, 3, \dots, q \tag{1}$$

The three substrates considered as principal factors were: coffee wastewater, cow manure, and pig manure. In this design, the proportions of the different substrates that compose a mixture have a value of 1 (100%). The total size of the design was 10 trials, where 3 trials correspond with pure mixtures, three trials with combinations of two substrates, others 3 trials that correspond to the combinations of three, and a last trial on the center of the triangle. Mathematical standard forms of the simplex-centroid models are the following (Ec. 2, 3, 4):

Lineal model:

$$Y = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i \tag{2}$$

Quadratic model:

$$Y = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i<j}^q \sum_{i<j}^q \beta_{ij} x_i x_j \tag{3}$$

Special cubic model/Modelo cúbico especial:

$$Y = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i<j}^q \sum_{i<j}^q \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i<j<k}^q \sum_{i<j<k}^q \beta_{ijk} x_i x_j x_k \tag{4}$$

Where: Y represents the response variable of the process;  $\sum_{i=1}^q \beta_i x_i$  represents the effects of pure components or lineal combinations; and  $\sum_{i<j}^q \beta_{ij} x_i x_j$ ;  $\sum_{i<j<k}^q \beta_{ijk} x_i x_j x_k$  represents the effects of mixture of two and three components, respectively.

**Response variables**

Statgraphics Centurion XV software was used for performing experimental design and data analysis. The

totales (ST), los sólidos volátiles totales (SVT) y los sólidos fijos totales (SFT) según la metodología descrita por APHA (APHA, 1995). El índice de alcalinidad se calculó como el cociente de la alcalinidad parcial a pH 5.75 y la alcalinidad total a pH 4,3. La producción de metano generada se estimó por desplazamiento del líquido contenido en una botella conteniendo NaOH al 10%, donde todo el CO<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub>S producido se absorben en la solución concentrada. Todos los productos químicos utilizados en los análisis son de grado analítico.

**Diseño de mezcla**

Los diseños de mezcla se usan para estudiar los efectos de los componentes en una mezcla en las variables de respuesta; donde “q” representa el número de ingredientes en el sistema bajo estudio, y “x<sub>i</sub>” representa las proporciones de esos ingredientes (Ec. 1).

Los tres sustratos que se utilizaron como factores principales fueron: agua residual de café CW, estiércol vacuno (CM) y estiércol porcino (PM). En este diseño, las proporciones de los diferentes sustratos tienen valor 1 (100%). El tamaño total del diseño fueron 10 ensayos, donde 3 ensayos corresponden con mezclas puras de sustratos, 3 ensayos con combinaciones de dos sustratos, otros 3 ensayos que corresponden las combinaciones de los 3 sustratos, y un último ensayo en el centro del triángulo. Las formas estándar de los modelos simplex-centroide son las siguientes (Ec. 2, 3, 4):

Modelo lineal:

$$Y = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i \tag{2}$$

Modelo cuadrático:

$$Y = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i<j}^q \sum_{i<j}^q \beta_{ij} x_i x_j \tag{3}$$

Modelo cúbico especial:

$$Y = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i<j}^q \sum_{i<j}^q \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i<j<k}^q \sum_{i<j<k}^q \beta_{ijk} x_i x_j x_k \tag{4}$$

donde: Y representa la variable de respuesta del proceso,  $\sum_{i=1}^q \beta_i x_i$  representa los efectos de los componentes puros o combinación lineal, y  $\sum_{i<j}^q \beta_{ij} x_i x_j$ ;  $\sum_{i<j<k}^q \beta_{ijk} x_i x_j x_k$  representa los efectos de las mezclas de dos y tres componentes, respectivamente.

**Variables de respuesta**

El programa Statgraphics Centurion XV se utilizó para realizar el diseño experimental y el análisis de los datos. La eficiencia de la codigestión anaerobia se estudió analizando las variables respuesta:

efficiency of anaerobic co-digestion was investigated by analyzing the response variables: methane production and % VS removal. Methane production was daily quantified by the displacement of the liquid column for a period of 22 days. Meanwhile, % VS removal was determined as follows (Ec. 5):

$$\text{Percentage VS removal} = \frac{\text{VS}_{\text{initial}} - \text{VS}_{\text{final}}}{\text{VS}_{\text{initial}}} \quad (5)$$

### Multiple responses optimization

The desirability function  $d(y)$  expresses the desirability of a response value equal to  $y$  on a scale of 0 to 1. If a response variable is to be maximized, the desirability function can be defined by (Ec. 6):

$$d_i = \begin{cases} 0 & \hat{y} < A \\ \left(\frac{\hat{y} - A}{B - A}\right)^s & A \leq \hat{y} \leq B \\ 1 & \hat{y} > B \end{cases} \quad (6)$$

Where:  $\hat{y}$  is the predicted by the response variable,  $A$  is a value below which the response is completely unacceptable, and  $B$  is a value above which the desirability is high. Several studies about the construction of different desirability functions are reported by others (Didier *et al.*, 2007; Espinoza-Escalante *et al.*, 2008).

To combine the desirability of  $m$  responses, a single composite function is created called global desirability function ( $D$ ). This function should be maximized by choosing the best conditions of the design variables (Ec. 7):

$$D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}^{1/m} \quad (7)$$

## RESULTS AND DISCUSSION

### Characterization of substrates

All the substrates used for the co-digestion study were analyzed for pH, alkalinity, alkalinity index, ammonia, TS and TVS. The individual substrates and all combinations used were analyzed for all the parameters when finalizing the experiments. The results are shown in Table 1. The TS and TVS contents for the main mixtures were found to be varying between 7.05 - 7.99 g L<sup>-1</sup> and 4.01-4.75 g L<sup>-1</sup>, respectively. For all the other mixtures the interval variation of TS and TVS were found dependent on their compositions. Enough alkalinity to maintain an appropriate pH in an anaerobic reactor in all mixture was observed. The pH observed have an average value of 7.57 ± 0.17 among all the reactors, indicating good conditions for the anaerobic digestion. Moreover, physical-chemical values obtaining to the end of each trial in batch remains on the following intervals: alkalinity (625 - 875 mg CaCO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>), alkalinity index (0.79 - 0.84) and ammonia (0.27 - 0.81 g NH<sub>3</sub>-N L<sup>-1</sup>).

producción de metano y remoción de SV totales. La producción de metano diaria se cuantificó diariamente por el desplazamiento de la columna de líquido conectado a gasómetros durante 22 días. Mientras, la remoción de SV totales se calculó como sigue (Ec. 5):

$$\text{Percentage VS removal} = \frac{\text{VS}_{\text{initial}} - \text{VS}_{\text{final}}}{\text{VS}_{\text{initial}}} \quad (5)$$

### Optimización múltiple de respuestas

La función de conveniencia  $d(y)$  expresa la deseabilidad de un valor de respuesta igual a  $y$  en la escala de 0 a 1. Si la variable de respuesta será maximizada, la función  $d(y)$  se define como (Ec. 6):

$$d_i = \begin{cases} 0 & \hat{y} < A \\ \left(\frac{\hat{y} - A}{B - A}\right)^s & A \leq \hat{y} \leq B \\ 1 & \hat{y} > B \end{cases} \quad (6)$$

donde:  $\hat{y}$  es el valor predicho por la variable de respuesta,  $A$  es un valor inferior donde la respuesta es completamente inaceptable, y  $B$  es un valor superior donde la deseabilidad es alta. El parámetro  $s$  define el peso asignado a la respuesta  $i$ . Con una  $s$  máxima de 1, la función  $d_i$  variará desde 0 hasta 1. Para combinar la deseabilidad de  $m$  respuestas, una función compuesta única se construye denominada función de conveniencia global  $D$ . Si todas las variables de respuesta se consideran que tienen la misma importancia, entonces la función de conveniencia global  $D$  es la media geométrica de las deseabilidades separadas, dado por la ecuación (Ec. 7):

$$D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}^{1/m} \quad (7)$$

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Caracterización de los sustratos

Todos los sustratos utilizados para el estudio de codigestión anaerobia fueron examinados para pH, alcalinidad, índice de alcalinidad, amonio, ST y STF. Los sustratos individuales y todas las combinaciones usadas se analizaron para todos los parámetros cuando finalizaron los experimentos. Los resultados se muestran en la Tabla 1. El contenido de ST y STV de las mezclas principales estuvieron en el rango de 7,05 - 7,99 y 4,01 - 4,75 g L<sup>-1</sup>, respectivamente. Para todas las demás mezclas el intervalo de variación de los ST y STV estuvo en dependencia de sus composiciones. En todas las mezclas se observó una suficiente alcalinidad para mantener el pH adecuado en un reactor anaerobio. El pH observado tuvo un valor promedio de 7,57 ± 0,17 entre todos los reactores, indicando condiciones favorables para la digestión anaerobia. Además, los valores físico-químicos obtenidos al final de cada prueba permanecieron en los siguientes intervalos: alcalinidad (625 - 875 mg CaCO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>), índice de alcalinidad (0,79 - 0,84) y amonio (0,27-0,81 NH<sub>3</sub>-N L<sup>-1</sup>).

El perfil de la producción de metano acumulado se muestra en la Figura 1. Un incremento en la producción de metano se observó en todas las mezclas. Las combinaciones 3, 5, 6 y 7 tuvieron un comportamiento similar. Sin embargo, el mayor

**TABLE 1. Characterization of mixtures after the co-digestion**  
**TABLA 1. Caracterización de las mezclas después de la codigestión**

DOE order	CW:CM:PM	pH (unit)	Alkalinity (mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	Alkalinity index (absolute value)	Ammonia (g NH <sub>3</sub> -N L <sup>-1</sup> )	TS (g L <sup>-1</sup> )	TVS (g L <sup>-1</sup> )
1	1: 0:0	7.49	700	0.81	0.37	7.51	4.25
2	0: 1: 0	7.40	625	0.83	0.37	7.05	4.01
3	0: 0: 1	7.84	750	0.82	0.39	7.99	4.75
4	1/2: 1/2: 0	7.62	625	0.83	0.63	7.41	2.35
5	1/2: 0: 1/2	7.66	625	0.84	0.81	7.56	6.27
6	0: 1/2: 1/2	7.46	875	0.79	0.33	7.49	4.02
7	1/3: 1/3: 1/3	7.61	750	0.81	0.31	6.89	3.69
8	2/3: 1/6: 1/6	7.59	725	0.82	0.27	7.33	3.95
9	1/6: 2/3: 1/6	7.53	675	0.81	0.34	6.31	3.25
10	1/6: 1/6: 2/3	7.49	800	0.80	0.36	7.49	3.96

The profile of cumulative methane production is showed in Fig. 1. An increment on the methane production was observed in all mixtures. The combinations 3, 5, 6 and 7 showed similar performance. However, the highest volume of cumulative methane was observed on the combination 10. The % VS removal varied between 50% and 60% for most mixtures (Table 2). Nevertheless, the highest value observed (83.5%) was found on the combination 5, where similar amounts of coffee wastewater and pig manure substrates were used. This high value observed indicates an efficient conversion of volatile matter to methane. Although a high methane production was observed on the combination 3, the % VS removal value was lower to the ones observed on the combination 5.

**Optimization of methane production**

Table 3 shows the analysis of variance for estimated full model effects of the responses determined for three solutions: lineal (Ec. 2), quadratic (Ec. 3) y special cubic (Ec. 4). For methane production, lineal and quadratic models showed significant values ( $F_{\text{test calculated}} = F_{\text{cal}} = \text{MSS}/\text{MSS}_e = 18.12 \text{ and } 6.75 > F_{\text{test tabulated}} = F_{\text{tab}} = (F_{\alpha; \text{df}; (\text{n-df}+1)}) = F_{0.05; 2; 9} = 4.26 \text{ and } F_{0.05; 3; 9} = 4.07$ ), and low values of probability ( $p_{\text{lineal}}\text{-value} = 0.0017$  and  $p_{\text{quadratic}}\text{-value} = 0.003 > \alpha_{0.05}$ ), respectively. Fisher’s variance ratio at this level was enough to justify the suitability degree of both models. Table 4 shows an analysis of goodness of fit to both models. Quadratic model showed the higher values of fitting ( $R^2 = 97.33; R^2_{\text{adj.}} = 93.99; R = 98.66$ ), compared with the fitting values achieved of the lineal model ( $R^2 = 83.81; R^2_{\text{adj.}} = 79.18; R = 91.55$ ).

volumen de metano acumulado se observó en la combinación 10. El porcentaje de remoción de SV varió entre 50% hasta 60% para la mayoría de las mezclas (Tabla 2). No obstante, el mayor valor observado (83,5%) estuvo en la combinación 5, donde iguales cantidades de agua residual y estiércol porcino fueron manejadas. Este alto valor observado indica una eficiente conversión de la materia volátil a metano. Aunque se observaron altas producciones de metano en la combinación 3, pero los valores de porcentaje de remoción de SV fueron inferiores a los observados en la combinación 5.

**Optimización de la producción de metano**

La Tabla 3 muestra el análisis de varianza para los efectos estimados del modelo de las respuestas determinadas para las tres soluciones: lineal (Ec. 2), cuadrática (Ec. 3) y cúbico especial (Ec. 4). Para producción de metano, los modelos lineal y cuadrático mostraron tener valores significativos de ( $F_{\text{test calculado}} = F_{\text{cal}} = \text{MSS}/\text{MSS}_e = 18,12 \text{ y } 6,75 > F_{\text{test tabulado}} = F_{\text{tab}} = (F_{\alpha; \text{df}; (\text{n-df}+1)}) = F_{0.05; 2; 9} = 4,26 \text{ y } F_{0.05; 3; 9} = 4,07$ ) y muy bajos valores de probabilidad ( $p_{\text{lineal}}\text{-valor} = 0,0017$  y  $p_{\text{cuadrático}}\text{-valor} = 0,003 > \alpha_{0,05}$ ), respectivamente. La proporción de la varianza para Fisher a este nivel fue suficiente para justificar el grado de adecuación de ambos modelos. La Tabla 4 muestra un análisis del grado de ajuste para ambos modelos. El modelo cuadrático mostró los más altos valores de ajuste ( $R^2 = 97,33; R^2_{\text{adj.}} = 93,99; R = 98,66$ ), comparados con los resultados del modelo lineal ( $R^2 = 83,81; R^2_{\text{adj.}} = 79,18; R = 91,55$ ).

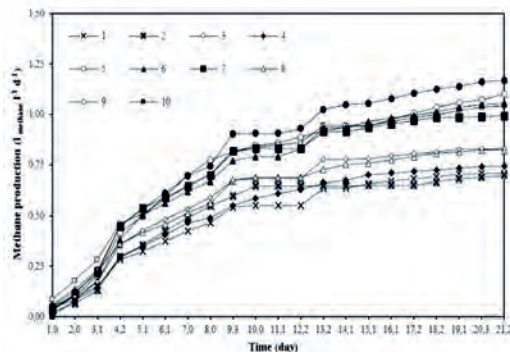


FIGURE 1. Cumulated methane production over time of mixtures evaluated.  
 FIGURA 1. Producción acumulada de metano en el tiempo de las mezclas evaluadas.

**TABLE 2. Mixture design experimental, observed and predicted values obtained in this study**  
**TABLA 2. Diseño experimental de mezclas, valores observados y predichos obtenidos en este estudio**

Order DOE	Mixtures	Variables			Response: Methane production (L <sub>methane</sub> L <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )			Response: % VS removal		
		CW (mL)	CM (mL)	PM (mL)	Observed	Predicted	Residual	Observed	Predicted	Residual
1	1: 0:0	500	0	0	0.71	0.70	0.013	56.6	55.81	0.795
2	0: 1: 0	0	500	0	0.70	0.69	0.009	56.9	57.48	-0.578
3	0: 0: 1	0	0	500	1.10	1.12	-0.020	58.2	57.15	1.049
4	1/2: 1/2: 0	250	250	0	0.75	0.73	0.024	56.4	56.18	0.217
5	1/2: 0: 1/2	250	0	250	1.05	1.05	-0.005	83.5	81.66	1.844
6	0: 1/2: 1/2	0	250	250	1.05	1.06	-0.009	53.7	53.23	0.471
7	1/3: 1/3: 1/3	166.6	166.6	166.6	0.99	0.98	0.007	53.4	49.60	3.799
8	2/3: 1/6: 1/6	333.4	83.3	83.3	0.82	0.86	-0.043	55.0	58.65	-3.651
9	1/6: 2/3: 1/6	83.3	333.4	83.3	0.83	0.86	-0.032	50.2	49.73	0.468
10	1/6: 1/6: 2/3	83.3	83.3	333.4	1.17	1.11	0.055	53.7	58.11	-4.414

That result indicates that for methane production the quadratic model is the most significant. The results in the actual study indicate a good correlation between observed and predicted values by the quadratic model. The significance of each component of the quadratic model (Ec. 3) was determined by Student’s test, and the values are showed in Table 5. The p-values below  $\alpha = 0.05$  specify that the coefficients of the model are significant at 95% of probability. For methane production, all the coefficients that characterize the lineal and two interaction terms were significant in the quadratic model.

Empiric relations between methane production and the substrates selected were obtained by the application of quadratic or second-order model. The model was defined for:

Estos resultados indican que para la producción de metano el modelo cuadrático es el más significativo. Los resultados en el actual estudio indican una buena correlación entre los valores observados y los predichos por el modelo cuadrático. La significación de cada componente del modelo cuadrático (Ec. 3) se determinó mediante la prueba *t* de Student y los valores son presentados en la Tabla 5. Los valores de probabilidad inferiores a  $\alpha = 0,05$  indican que los coeficientes del modelo son significativos a 95% de probabilidad. Para producción de metano, todos los coeficientes que caracterizan los términos lineales y de interacción fueron significativos en el modelo cuadrático.

Las relaciones empíricas entre producción de metano y los substratos seleccionados se obtuvieron por la aplicación de un modelo de segundo orden o cuadrático. El modelo se definió por:

$$Biogas\ production = 0.697138 \cdot CW + 0.690774 \cdot CM + 1.11987 \cdot PM + 0.585858 \cdot CW \cdot PM + 0.613131 \cdot CM \cdot PM \quad (8)$$

**TABLE 3. Analysis of variance for estimated full model effects of the responses evaluated**  
**TABLA 3. Análisis de varianza para los efectos del modelo estimado de las respuestas evaluadas**

Source	Sum of Squares	Degree of freedom	MSS <sup>c</sup> MSS=SS/df; MSS <sub>e</sub> =SS <sub>e</sub> /df <sub>e</sub>	F-value calculated <sup>d</sup> Fcal.=MSS/MSS <sub>e</sub>	p-value
<b>Cumulative methane production</b>					
Mean	8.4009	1	8.4009		
Lineal model	0.2288	2	0.1144	18.12	0.0017 <sup>e</sup>
Quadratic models	0.0369	3	0.0123	6.75	0.0481 <sup>e</sup>
Special cubic model	1.3·10 <sup>-5</sup>	1	1.3·10 <sup>-5</sup>	0.01	0.9459
Error	0.2730	3	0.0024		
Total	8.6819	10			
Quadratic model	0.2657	5	0.0531	29.17	0.0030 <sup>e</sup>
Error total	0.0073	4	0.0018		
Total (correlación)	0.2730	9			

Source	Sum of Squares	Degree of freedom	MSS <sup>c</sup> MSS=SS/df; MSS <sub>e</sub> =SS <sub>e</sub> /df <sub>e</sub>	F-value calculated <sup>d</sup> Fcal.=MSS/MSS <sub>e</sub>	p-value
<b>Percentage VS removal</b>					
Mean	33362.2	1	33362.2		
Lineal model	125.5	2	62.7467	0.67	0.5428
Quadratic models	414.7	3	138.2360	2.27	0.2221
Special Cubic model	190.1	1	190.0590	10.72	0.0466 <sup>e</sup>
Error	53.2	3	17.7317		
Total	34145.6	10			
Special cubic model	730.2	6	121.7050	6.86	0.0713 <sup>f</sup>
Total error	53.2	3	17.7322		
Total (correlation)	783	9			

<sup>e</sup> p-values <0.05 were considered to be significant./<sup>e</sup> Valores de probabilidad <0.05 se consideraron como significativos./  
<sup>f</sup> p-values <0.10 were considered to be significant./<sup>f</sup> Valores de probabilidad <0.01 se consideraron como significativos./

For a better understanding of the effect of substrate evaluated on the anaerobic co-digestion a 3D plots (Fig. 2) was designated by the quadratic model (Ec. 8) to modeling the methane production. Fig. 2a and 2b show the estimate contour surface and contours for estimate contour surface of both responses. The nonlinear nature of 3D plots demonstrated that the interactions between independent variables and the methane production were considerable. These results indicate that in the anaerobic co-digestion of those wastes the amount of pig manure should be elevated to obtain high levels of methane production. According to the proportion of pig manure was increased, near to its maximum levels, a beneficial effect on the methane production was observed (Fig. 2c). In addition, when increasing the proportions of coffee wastewater and cow manure, similar antagonist effects on the methane levels were observed.

Para tener un mejor entendimiento del efecto en la codigestión anaerobia de los substratos evaluados, un gráfico 3D (Figura 2) se creó por el modelo cuadrático (Ec.8) para modelar la producción de metano. Las Figuras 2a y 2b muestran la superficie y el contorno triangular de ambas respuestas. La naturaleza no lineal de la superficie demuestra que fueron considerables las interacciones entre las variables independientes y la producción de metano. Estos resultados indican que en la codigestión anaerobia de estos residuos las proporciones de estiércol porcino deben ser elevadas para tener altos niveles de producción de metano. A medida que se incrementaron las porciones de estiércol porcino, cercanos a sus niveles máximos, se observó un efecto beneficioso en la producción de metano (Figura 2c). Además, al aumentar las proporciones de agua residual de café y estiércol vacuno se observaron efectos antagónicos similares en los niveles de metano.

**TABLE 4. Full model results**  
**TABLA 4. Resultados del ajuste de los modelos**

Model	Standard error	R <sup>2</sup> (%)	R <sup>2</sup> <sub>adj.</sub> (%)	R (%)
<b>Cumulative methane production</b>				
Linear	0.0795	83.81	79.18	91.55
Quadratic*	0.0427	97.33	93.99	98.66
Special Cubic	0.0492	97.34	92.01	98.66
<b>Percentage VS removal</b>				
Linear	9.6948	16.02	0	40.02
Quadratic	7.7983	68.95	30.14	83.04
Special Cubic*	4.2109	93.21	79.63	96.54

\* was considered as the best model/\* se consideró como el mejor modelo

**TABLE 5. Quadratic and special cubic model results for the responses evaluated**  
**TABLA 5. Resultados del modelo cuadrático y cúbico especial para las respuestas evaluadas**

Model			Standard error	t-statistic	p-value
<b>Methane production</b>					
Quadratic	CW	0.6971	0.0412	16.92	0.0000 <sup>e</sup>
	CM	0.6908	0.0412	16.77	0.0000 <sup>e</sup>
	PM	1.1200	0.0412	27.18	0.0000 <sup>e</sup>
	CW·CM	0.1276	0.1898	0.67	0.5382
	CW·PM	0.5858	0.1898	3.09	0.0367 <sup>e</sup>
	CM·PM	0.6131	0.1898	3.23	0.0320 <sup>e</sup>
<b>Percentage volatile solid removal</b>					
Special cubic/	CW	55.8052	4.0707	13.71	0.0000 <sup>e</sup>
	CM	57.4779	4.0707	14.12	0.0000 <sup>e</sup>
	PM	57.1507	4.0707	14.04	0.0000 <sup>e</sup>
	CW·CM	-1.8337	20.491	-0.09	0.9343
	CW·PM	100.712	20.491	4.91	0.0161 <sup>e</sup>
	CM·PM	-16.3428	20.491	-0.80	0.4834
	CW·CM·PM	-442.271	135.091	-3.27	0.0466 <sup>e</sup>

<sup>e</sup> p-value<0.05 was considered as significant./<sup>e</sup> Valores de probabilidad <0.05 se consideraron como significativos.

Optimal proportions achieved from the analysis were: coffee wastewater = 1 %; cow manure = 14 %; pig manure = 85 %. For this substrate combination, the maximum yield of methane production calculated was 1.13 L<sub>methane</sub> L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>.

Las proporciones óptimas obtenidas del análisis fueron: agua residual de café = 1%; estiércol vacuno = 14%; estiércol porcino = 85%. Para esta combinación de sustratos el rendimiento máximo calculado de producción de metano fue 1,13 L<sub>metano</sub> L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>.

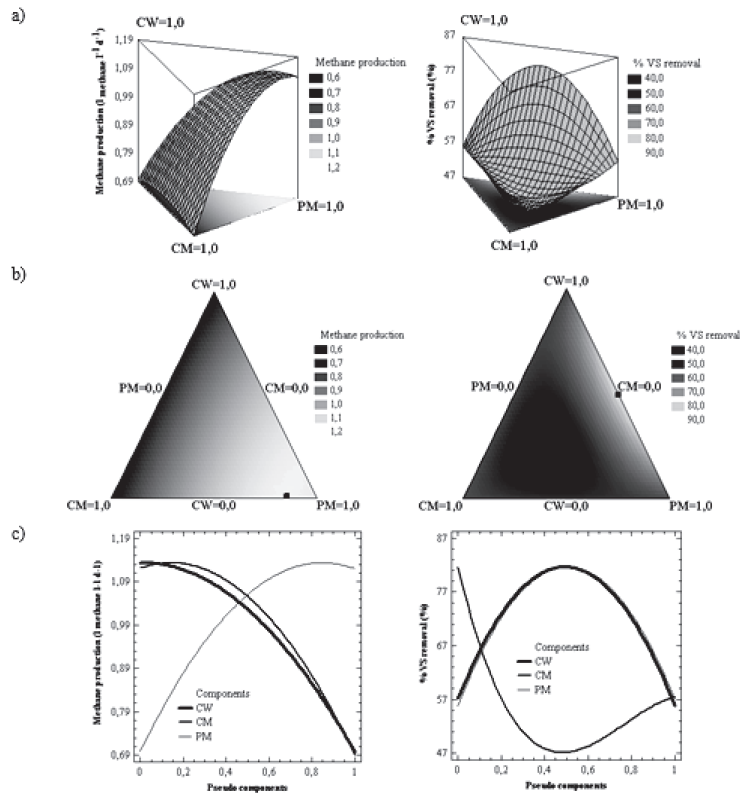


FIGURE 2. Response plots corresponding to the quadratic model for methane production and cubic model for % VS removal: a) estimate contour surface; b) contours for estimate contour surface; c) trace plot.

FIGURA 2. Gráficas de respuestas correspondientes al modelo cuadrático para producción de metano y al modelo cúbico especial para eficiencia de remoción de SV: a) superficie de respuesta estimada; b) contornos de la superficie de respuesta estimada; c) gráfico de trazas.



**Optimization of percentage volatile solid removal (% VS removal)**

The analysis of variance (Table 3) shows that the unique significant model for % VS removal was special cubic. The analysis of goodness of fit for the special cubic model (Table 4) showed higher adjustment values ( $R^2 = 93.21$ ;  $R^2_{adj.} = 79.63$ ;  $R = 96.54$ ) showing a higher significance of the model. Yetilmezsoy *et al.* (2009) reported that the  $R^2_{adj}$  correct the  $R^2$  value for the sample size and the number of terms in the model. For our investigation a drop on the  $R^2_{adj}$  value until 79.63% was observed; in spite of  $R^2_{adj}$  descent, the value was high enough. All the evaluated substrates had a high significant effect in the % VS removal. With the cubic special model (Ec. 9) is observed that the lineal parameters have a synergic effect on the co-digestion, due to the coefficients of the model are positive.

$$\% VS\ removal = 55,8052 * CW + 57,4779 * CM + 57,1507 * PM + 100,712 * CW * PM - 442,271 * CW * CM * PM \tag{9}$$

According to Fig. 2a and 2b, the greater values of % VS removal are obtained in the near when CM substrate is not present. In both figures are observed that the response have a nonlinear tendency. The most significant mixture was observed in the combination 5, where similar amounts of both substrates are evaluated (Fig. 2c). The optimum proportion to maximize % VS removal were founded to coffee wastewater = 49%, cow manure = 0%, and pig manure = 51%. According to the special cubic model obtained, a maximum optimum value of 81.6% is achieved.

**Multiple responses optimization (MRO)**

Higher values of observed and predicted partial desirability functions (*d*), to maximize both response variables, were obtained on the combination 5, with values of 83.2% and 84.2%, respectively. Fig. 3a and 3b show the response plots corresponding to global desirability function for methane production and % VS removal. Is obvious the nonlinear nature of response surface, where the plots that connect the points for higher increases of (*D*) function are found on the combination region between coffee wastewater and pig manure. The optimum values defined for the substrates were: coffee wastewater = 44%; cow manure = 0%; pig manure = 56%, with a *D* function value of 87.3%. With these conditions, mathematical model predicted values of methane production and % VS removal of  $1.09 L_{methane} L^{-1} d^{-1}$  and 80.5%, respectively.

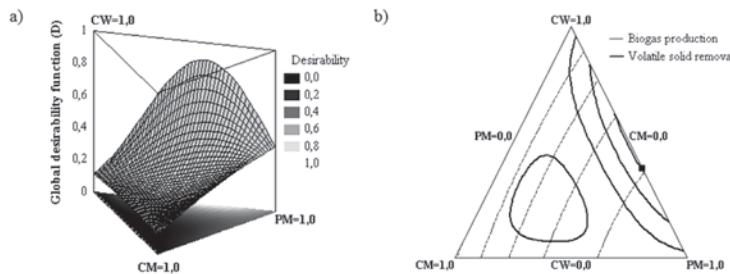


FIGURE 3. Response plots corresponding to global desirability function (*D*) for methane production and percentage of solid removal: a) estimate contour surface; b) contours for estimate contour surface.

FIGURE 3. Respuesta correspondiente a la función de conveniencia global (*D*) para la producción de metano y porcentaje de remoción de solido: a) estimado de la superficie del contorno; b) los contornos para la superficie de estimación.

**Optimización del porcentaje de remoción de sólidos volátiles**

El análisis de varianza (Tabla 3) muestra que el único modelo significativo para el porcentaje de remoción de SV fue el cúbico especial. El análisis del grado de bondad de ajuste del modelo cúbico especial (Tabla 4) mostró elevados valores ( $R^2 = 93,21$ ;  $R^2_{adj.} = 79,63$ ;  $R = 96,54$ ) indicando una alta significancia del modelo.

Yetilmezsoy *et al.* (2009) reportaron que el  $R^2_{adj.}$  compensa el valor de  $R^2$  para el tamaño de muestra y el número de términos en el modelo. Para nuestra investigación se observó un descenso en los valores de  $R^2_{adj.}$  hasta 79,63; a pesar del descenso, el valor fue suficientemente alto. Todos los substratos evaluados tuvieron un efecto altamente significativo en el porcentaje de remoción de SV. Del modelo cúbico especial (Ec. 9), se observa que todos los parámetros lineales tuvieron un efecto sinérgico en la codigestión, debido a que los coeficientes del modelo son positivos

Según las Figuras 2a y 2b, los mayores valores de porcentaje de remoción de SV se obtienen en las cercanías en donde el substrato CM no está presente. En ambas figuras se observa que la respuesta tiene una tendencia no lineal. La mezcla más significativa se observó en la combinación 5, donde similares proporciones de ambos substratos se evaluaron (Figura 2c). Las proporciones óptimas para maximizar la remoción de SV fueron fijadas en agua residual de café = 49%, CM = 0% y estiércol de cerdo = 51%. Según el modelo cúbico especial obtenido, se alcanza un valor óptimo máximo de 81,6%.

**Optimización múltiple de respuestas (MRO)**

Los mayores valores de las funciones de conveniencia parcial (*d*) observada y predicha, para maximizar ambas variables de respuesta, fueron obtenidas en la combinación 5, con valores de 83,2% y 84,2%, respectivamente. Las Figuras 3a y 3b muestran los gráficos de respuesta correspondientes a la función de conveniencia global para la producción de metano y la eficiencia de remoción de SV. Es obvia la naturaleza no lineal de la superficie de respuesta, donde las curvas que conectan los puntos para los mayores incrementos de la función (*D*) se encuentran en la región de combinación entre agua residual de café y estiércol porcino. Los valores óptimos definidos para los substratos fueron: agua residual de café = 44%; CM = 0%; estiércol porcino = 56%, con un valor de la función *D* de 87,3%. Con esas condiciones, el modelo matemático predijo valores de producción de metano y porcentaje de remoción de SV de  $1,19 L_{metano} L^{-1} d^{-1}$  y 80,5%, respectivamente.

## CONCLUSIONS

- The analytical methodology selected, a simplex-centroid design followed by an analysis of responses using the response surface methodology and multiple optimizations through D function, was an adequate work strategy to optimize the anaerobic co-digestion process.
- Optimum mixture for maximizing the methane production was obtained combining proportions of 1% of coffee wastewater, 14% of CM and 85% of pig manure adjusted for a quadratic model (97.3%); achieving a production of cumulative methane of  $1.13 \text{ L}_{\text{methane}} \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ .
- For our study, a mixture of 49% of coffee wastewater and 51% of pig manure achieves a maximum % VS removal of 81.6%, adjusted for a special cubic model ( $R^2 = 93.2\%$ ).
- The combination coffee wastewater = 44% and pig manure = 56% achieved a high value of D function value = 87.3%. At these conditions was predicted a methane production of  $1.09 \text{ L}_{\text{metano}} \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}$  and % VS removal de 80.5% were predicted.

## CONCLUSIONES

- La metodología analítica seleccionada, un diseño simplex centroide seguido de un análisis de las respuestas usando la metodología de las superficies de respuestas y la optimización múltiple a través de la función *D*, fue una estrategia de trabajo adecuada para optimizar el proceso de codigestión anaerobia.
- La mezcla óptima para maximizar la producción de metano se obtuvo combinando proporciones de 1% de agua residual de café, 14% de estiércol vacuno y 85% de estiércol porcino ajustado por un modelo cuadrático (97,3%); alcanzando producciones de metano acumulado de  $1.13 \text{ L}_{\text{metano}} \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ .
- Para nuestro estudio, una mezcla de 49% de agua residual de café y 51% de estiércol porcino alcanza una máxima eficiencia de remoción de SV, ajustado por un modelo cúbico especial ( $R^2 = 93,2\%$ ).
- La combinación agua residual de café = 44% y estiércol porcino = 56% alcanzó un alto valor de la función *D* = 87,3%. A esas condiciones se predice una producción de metano de  $1.09 \text{ L}_{\text{metano}} \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}$  y un porcentaje de remoción de SV de 80,5%.

## REFERENCES / REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIYUK, S.; FORREZ, I.; LIEVEN, D.K.; VAN HAANDEL, A.; VERSTRAETE, W.: "Anaerobic and complementary treatment of domestic sewage in regions with hot climates—A review", *Bioresource Technology*, 97(17): 2225-2241, noviembre de 2006, ISSN: 0960-8524, DOI: 10.1016/j.biortech.2005.05.015.
- ÁLVAREZ, J.A.; OTERO, L.; LEMA, J.M.: "A methodology for optimising feed composition for anaerobic co-digestion of agro-industrial wastes", *Bioresource Technology*, 101(4): 1153-1158, febrero de 2010, ISSN: 0960-8524, DOI: 10.1016/j.biortech.2009.09.061.
- CLESCERL, L.S.; GREENBERG, A.E.; EATON, A.D. (eds.): *Standard Methods for Examination of Water & Wastewater*, [en línea], Ed. Amer Public Health Assn, 20.ª ed., 1325 p., enero de 1999, ISBN: 978-0-87553-235-6, Disponible en: [http://www.amazon.com/Standard-Methods-Examination-Water-Wastewater/dp/0875532357?ie=UTF8&\\*Version\\*=1&\\*entries\\*=0](http://www.amazon.com/Standard-Methods-Examination-Water-Wastewater/dp/0875532357?ie=UTF8&*Version*=1&*entries*=0), [Consulta: 3 de junio de 2016].
- DIDIER, C.; ETCHEVERRIGARAY, M.; KRATJE, R.; GOICOECHEA, H.C.: "Crossed mixture design and multiple response analysis for developing complex culture media used in recombinant protein production", *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 86(1): 1-9, 15 de marzo de 2007, ISSN: 0169-7439, DOI: 10.1016/j.chemolab.2006.07.007.
- ESPIÑOZA, E.F.M.; PELAYO, O.C.; GUTIÉRREZ, P.H.; GONZÁLEZ, Á.V.; ALCARAZ, G.V.; BORIES, A.: "Multiple response optimization analysis for pretreatments of Tequila's stillages for VFAs and hydrogen production", *Bioresource Technology*, 99(13): 5822-5829, septiembre de 2008, ISSN: 0960-8524, DOI: 10.1016/j.biortech.2007.10.008.
- FANG, C.; BOE, K.; ANGELIDAKI, I.: "Anaerobic co-digestion of by-products from sugar production with cow manure", *Water Research*, 45(11): 3473-3480, mayo de 2011, ISSN: 0043-1354, DOI: 10.1016/j.watres.2011.04.008.
- MONTGOMERY, D.C.: *Design and analysis of experiments*, [en línea], no. solc. QA279 .M66 2013, Ed. John Wiley & Sons, Inc., 8.ª ed., Hoboken, NJ, 730 p., 2013, ISBN: 978-1-118-14692-7, Disponible en: <http://www.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-EHEP002024.html>, [Consulta: 3 de junio de 2016].
- MURTO, M.; BJÖRNSSON, L.; MATTIASSON, B.: "Impact of food industrial waste on anaerobic co-digestion of sewage sludge and pig manure", *Journal of Environmental Management*, 70(2): 101-107, febrero de 2004, ISSN: 0301-4797, DOI: 10.1016/j.jenvman.2003.11.001.
- NEVES, L.; OLIVEIRA, R.; ALVES, M.M.: "Anaerobic co-digestion of coffee waste and sewage sludge", *Waste Management*, 26(2): 176-181, 2006, ISSN: 0956-053X, DOI: 10.1016/j.wasman.2004.12.022.
- RAO, P.V.; BARAL, S.S.: "Experimental design of mixture for the anaerobic co-digestion of sewage sludge", *Chemical Engineering Journal*, 172(2-3): 977-986, 15 de agosto de 2011, ISSN: 1385-8947, DOI: 10.1016/j.cej.2011.07.010.
- STATPOINT TECHNOLOGIES: *Statgraphics Centurion*, [en línea], (Versión 16.1 (XV)), [Windows], ser. Centurion, 21 de mayo de 2010, Disponible en: <http://statgraphics-centurion.software.informer.com/download/>.
- WARD, A.J.; HOBBS, P.J.; HOLLIMAN, P.J.; JONES, D.L.: "Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources", *Bioresource Technology*, 99(17): 7928-7940, noviembre de 2008, ISSN: 0960-8524, DOI: 10.1016/j.biortech.2008.02.044.
- WU, X.; YAO, W.; ZHU, J.; MILLER, C.: "Biogas and  $\text{CH}_4$  productivity by co-digesting swine manure with three crop residues as an external carbon source", *Bioresource Technology*, 101(11): 4042-4047, junio de 2010, ISSN: 0960-8524, DOI: 10.1016/j.biortech.2010.01.052.
- YETILMEZSOY, K.; DEMIREL, S.; VANDERBEL, R.J.: "Response surface modeling of Pb(II) removal from aqueous solution by Pistacia vera L.: Box-Behnken experimental design", *Journal of Hazardous Materials*, 171(1-3): 551-562, 15 de noviembre de 2009, ISSN: 0304-3894, DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.06.035.
- ZHANG, T.; LIU, L.; SONG, Z.; REN, G.; FENG, Y.; HAN, X.; YANG, G.: "Biogas Production by Co-Digestion of Goat Manure with Three Crop Residues", *PLOS ONE*, 8(6), 25 de junio de 2013, ISSN: 1932-6203, DOI: 10.1371/journal.pone.0066845, Disponible en: <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0066845>, [Consulta: 6 de junio de 2016].

Received: 20/07/2015.

Approved: 03/06/2016.

Yans Guardia-Puebla, Prof., Universidad de Granma, Departamento de Ingeniería Mecánica, Carr. Manzanillo, Peralejo, Bayamo, CP 85100, Cuba. Tel.: +53 0123 452208, E-mail: [yguardiap@udg.co.cu](mailto:yguardiap@udg.co.cu)

Janet Jiménez-Hernández, E-mail: [janet@suss.co.cu](mailto:janet@suss.co.cu)

Raúl F. Pacheco-Gamboa, E-mail: [yguardiap@udg.co.cu](mailto:yguardiap@udg.co.cu)

Suyén Rodríguez-Pérez, E-mail: [suyen@uo.edu.cu](mailto:suyen@uo.edu.cu)

Víctor Sánchez-Girón, E-mail: [victor.sanchezgiron@upm.es](mailto:victor.sanchezgiron@upm.es)

Logos representativos  
de las diferentes secciones  
que usted encontrará en la  
**Revista Ciencias Técnicas  
Agropecuarias**



Máquinas a Prueba



Explotación y Procesos Mecanizados



Agricultura de Precisión



Tractores y Máquinas Agrícolas



Utilización de la Energía en la  
Agricultura



Suelo y Agua



Oleohidráulica



Postcosecha



Mecanización Pecuaría



Tracción Animal



Reparación y Tecnología Mecánica



Electrificación y Construcciones Rurales



Computación y Matemática Aplicada



Docencia y Capacitación



Agricultura Conservacionista

**Suscríbase**