
ESTUDIO DE LA CO-COMBUSTIÓN DE LODOS DE LA PTAR CAÑAVERALEJO DE LA CIUDAD DE CALI CON CARBONES CONSUMIDOS EN EL VALLE DEL CAUCA, COLOMBIA.



Francisco Javier Velasco Sarria, M.Sc.

Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

combustibles@univalle.edu.co

Magdalena Urhán Rojas, Ph.D.

Dirección de Investigaciones, Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia.

Acuña Polanco José Jaime, M.Sc.

Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

polancun@univalle.edu.co

Fabián Moreno Ruiz, Tec.

Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

fabimor@univalle.edu.co

RESUMEN

Se estudió el comportamiento en combustión de diferentes carbones consumidos en el Valle del Cauca procedentes de los departamentos de Antioquia, Cundinamarca, Valle y Cauca, los cuales son mezclados con lodos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Cañaveralejo de la ciudad de Cali para su valorización y la atenuación del impacto ambiental que estos residuos generan.

Se utilizó el “diseño experimental totalmente al azar”. El análisis estadístico de los diferentes parámetros estudiados al adicionar lodos en proporción hasta de 9 % en peso a los carbones consumidos en el Valle del Cauca muestra que no se afecta significativamente el comportamiento energético del combustible.

**Recibido : Septiembre 10 2008 *Aceptado: Octubre 25 2008*

ABSTRACT

The present research studies the behavior of the combustion of different coals used in Valle del Cauca departament and coming from Antioquia, Cundinamarca, Valle, and Cauca departament. These coals are mixed with mud resulting from the Cañaveralejo Waste Water Treatment Plant (PTAR) in the city of Cali, for their valorization and reduction of the environmental impact they produce.

An experimental design completely at random has been used. The statistical analysis for different parameters studied when adding mud in a proportion of up to 9% in weight to coals consumed in the departament Valle del Cauca. Results show that the energetic behavior of fossil combustion does not have a significant change.

PALABRAS CLAVES

Lodos de tratamiento de aguas residuales, análisis térmico, termogravimetría, reactividad, energía de activación, cocombustión, aprovechamiento energético de lodos, diseño experimental al azar.

KEYWORDS

Waste water treatment mud, thermal analysis, thermogravimetry, derivative thermogravimetry, reactivity, activation energy, co-combustion, mud energetic use, experimental design at random.

1. INTRODUCCIÓN

Diseño experimental totalmente al azar

El diseño experimental se emplea en casi todas las áreas del conocimiento aplicado y terminos como tratamiento, nivel, unidad experimental, entre otros, se han generalizado al emplearse en la práctica científica en diferentes campos.

Mesa (1999) plantea que el diseño experimental es utilizado para comparar tratamientos, en donde las unidades experimentales se consideran homogéneas; es decir, son semejantes entre sí en cuanto al efecto que pueden causar en la respuesta de la característica de interés, de tal forma que la diferencia en ella sea generada básicamente por los tratamientos bajo estudio por la variabilidad intrínseca de las unidades experimentales.

En este diseño, bajo el supuesto de unidades experimentales homogéneas, no hay restricción alguna en la aleatorización. El modelo estadístico y la aleatorización en experimentos factoriales dependen del diseño básico utilizado. Un diseño completamente al azar con arreglo factorial se puede expresar como:

$$Y_{jk} = \mu + A_j + B_k + AB_{jk} + E_{jk}$$

Donde :

- Y_{jk} : Variable de respuesta
- μ : Media general
- A_j : Efecto del primer factor
- B_k : Efecto del segundo factor
- AB_{jk} : Interacción de los dos factores
- E_{jk} : Error aleatorio

El análisis de varianza para dos factores A y B, con a y b niveles y r número de repeticiones se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 1 Análisis de varianza para dos factores A y B, con a y b niveles y r número de repeticiones.

Fuente de Variación	Soma de cuadrados SC	Grados de Libertad (GL)	MC	F	F*
Factor A	SCA	a-1	MCA	MCA/MCE	FA*
Factor B	SCB	b-1	MCB	MCB/MCE	FB*
Interacción AB	SCAB	(a-1)(b-1)	MCAB	MCAB/MCE	FAB*
Error	SCE	ab(r-1)	MCE		
Total	SCT	abr-1			

Donde:

$$C = \frac{1}{abr} \left[\sum_i \sum_j \sum_k Y_{ijk} \right]^2$$

$$SCT = \sum_i \sum_j \sum_k Y_{ijk}^2 - C$$

$$SCA = \frac{1}{br} \sum_i \left[\sum_j \sum_k Y_{ijk} \right]^2 - C$$

$$SCB = \frac{1}{ar} \sum_j \left[\sum_i \sum_k Y_{ijk} \right]^2 - C$$

$$SCAB = \frac{1}{r} \sum_i \sum_j \left[\sum_k Y_{ijk} \right]^2 - C - SCA - SCB$$

$$SCE = SCT - SCA - SCB - SCAB$$

SC: sumatoria de cuadrados

MC: SC/GL

F: s MC/MCE

F*: Parámetro de comparación determinado a partir de los grados de libertad (GL) del error y el tratamiento, con base a una confiabilidad del 95 % (denotada como $\alpha=0.05$) y se encuentra tabulado en tablas de F (Snedecor, 1986).

Para establecer comparaciones múltiples entre todos los pares de medias de tratamiento se puede emplear el método de Diferencia Mínima Significativa, cuyo valor crítico está dado por:

DMS=

$$t(\alpha, GLE) \sqrt{\frac{2CME}{r}}$$

Donde t se encuentra tabulado en tablas reportadas por Fisher (1989).

Problemática Ambiental

La elevada producción de lodos en las aguas residuales urbanas y los problemas medioambientales derivados de su eliminación, unidos a una legislación medioambiental cada vez más restrictiva, exigen el estudio más exhaustivo de las posibilidades de eliminación de los mismos. Entre dichas alternativas la del coprocesamiento con carbón en sistemas convencionales de combustión adquiere cada vez más relevancia.

La utilización de lodos como fuente energética es una alternativa poco investigada en los lodos de la PTAR Cañaveralejo. La presente investigación busca brindar las bases para viabilizar la utilización de lodos deshidratados de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Cali como fuente de energía, en mezclas con los carbones utilizados en la región del Valle del Cauca (de los departamentos de Valle, Antioquia y Cundinamarca), como mecanismo de disposición final y aprovechamiento.

2. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

2.1. Muestreo de Carbones

El muestreo se realizó en PROPAL S.A., planta No. 2, por ser un gran centro de acopio de la región donde se utilizan carbones de diferentes procedencias, no sólo para el consumo propio sino para ser distribuido a los ingenios dentro del convenio establecido para el trueque por bagazo. Se realizó muestreo en pilas, siguiendo la norma ASTM D2234 para los carbones de Valle, Cundinamarca y Antioquia, ya que desde el punto de vista práctico es la más viable y utilizada.

2.2. Muestreo del Lodo

Se muestreó en banda transportadora al final del proceso de deshidratación mecánica del biosólido en la PTAR siguiendo la norma ASTM D2234.

2.3. Definición de las Mezclas

Se definen las mezclas en función del porcentaje de lodo en la mezcla lodo-carbón, además de realizar siguientes consideraciones:

- La demanda de carbón en la región (800000 ton/año para el año 2005) y las demandas históricas (entre 400 y 500000 ton/año) (AUPEC, 2005).
- La producción actual (36000 ton/año) y futura (72000 ton/año) de biosólido de la PTAR Cañaveralejo (Moreno y Ospina, 2003).
- La remoción de humedad es del orden del 80% tal como se reporta en plantas instaladas para el secado de lodos de Ptar,s en Alemania (Billotet et al., 1995).

Además que se presentan problemas operativos ocasionados por temperaturas de fusibilidad cuando se utilizan

altos porcentajes de lodo de PTAR (Morgan y Van Kamp, 1995). Se seleccionan como mezclas de trabajo los siguientes porcentajes de biosólido: 0 %, 3%, 6% y 9%.

2.4. Secado de la Muestra

El secado de la muestra se realizó aplicando la norma ASTM 5142, a 106°C y con monitoreo cada hora hasta que el peso sea constante y se determinó en 68,99 %.

2.5. Análisis Termogravimétrico

Los análisis termogravimétricos se realizaron en un equipo TA Instrument SDT 2960 Simultáneo DSC-TGA. Se utilizaron aproximadamente 15 mg de muestra, sometidos a una velocidad lineal de calentamiento de 10°C/min en atmósfera estática de aire (100 ml/min) desde temperatura ambiente hasta 800 °C, con la información generada en los termogramas se determinan las temperaturas de pico y las energías de activación media ponderada.

2.6. Análisis Próximo

Para el análisis próximo se aplicaron las normas ASTM D5142 en las determinaciones de humedad residual, materia volátil, cenizas y carbono fijo la ASTM D4239 en las determinaciones de azufre y ASTM D5865 en el poder calorífico superior. Los equipos utilizados fueron Leco TGA 601, Leco SC 32 y Leco AC 350 .

2.7. Análisis Elemental

Para la realización del análisis elemental se sigue la norma ASTM D5373 y se realiza en un equipo Leco CHN2000, con los cuales se realiza el análisis de la relación molar H/C.

ENERGÍA MEDIA PONDERADA

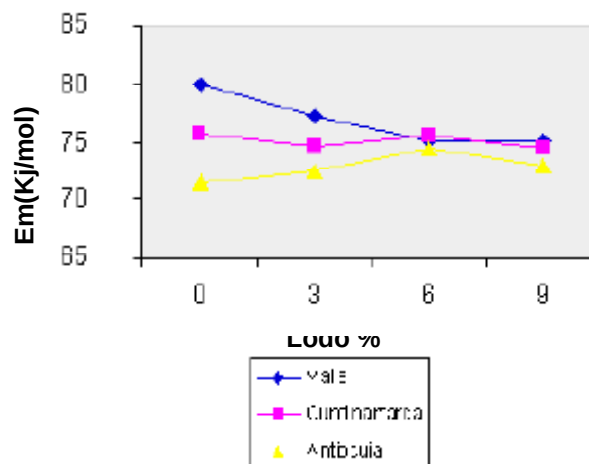


Figura 1. Energía de Activación Media ponderada

Tabla 2. Análisis de Varianza.

Fuente de Variación	SC	GL	CM	F	F*
Origen	62,00	2	31,00	20,48	3,88
% de lodo	6,98	3	2,33	1,54	3,49
Interacción	34,56	6	5,76	3,81	3,00
Error	18,16	12	1,51		
Total	121,70	23			

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Energías de activación

Se calculan las Energías de activación media (Em) utilizando la ecuación de Cumming (1984) a partir de los resultados obtenidos en los ensayos térmicos:

$$Em = Ea_1 + Ea_2 + Ea_3 + \dots = F_1 E_1 + F_2 E_2 + F_3 E_3 + \dots$$

En la Figura 1 y en la Tabla 2 se presentan los resultados de las Energías de activación obtenidas.

Como $F > F^*$ para el factor de origen y no para el porcentaje de lodo, no hay efecto del porcentaje de lodo agregado sobre la Energía de activación media ponderada. Esto se aprecia en la Figura 1, donde se presentan los valores medios para los dos factores y se muestran valores muy cercanos de las Energías de activación para un mismo origen con diferentes porcentajes de lodo (Valle (79,85 a 75,08 KJ/mol), Cundinamarca (75,80 a 74,41 KJ/mol) y Antioquia (71,49 a 74,37 KJ/mol), pero con diferencias mayores entre los diversos orígenes.

Temperaturas Características

Las temperaturas de pico obtenidas a partir de los termogramas son las siguientes:

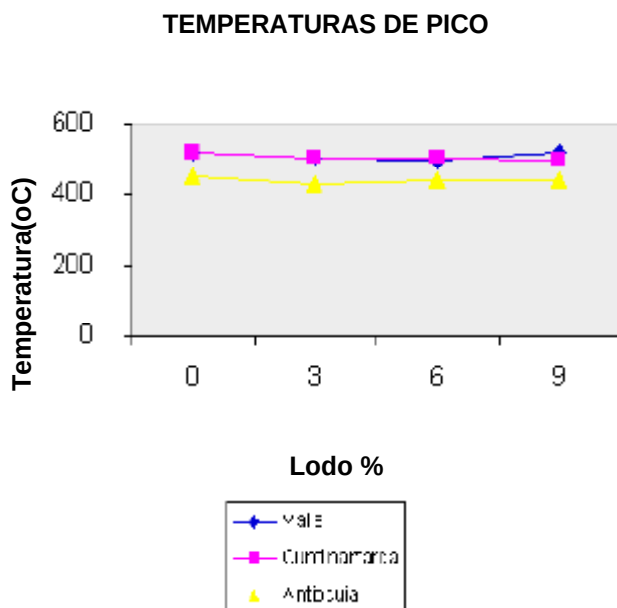


Figura 2. Temperatura de Pico de las mezclas.

Y el análisis de varianza es el siguiente:

Tabla 3. Análisis de Varianza.

Fuente de Variación	SC	GL	CM	F	F*
Origen	26055,70	2	13027,9	87,61	3,88
% de lodo	1094,57	3	361,5	2,48	3,49
Interacción	633,99	6	105,7	0,71	3,00
Error	1784,51	12	148,7		
Total	29569,78	23			

Los resultados del análisis de varianza (comparación de F y F*) muestran diferencias asociadas al origen del carbón y no a la adición del porcentaje de lodo.

Poder Calorífico

Los resultados del análisis de poder calorífico son los siguientes:

PODER CALORÍFICO

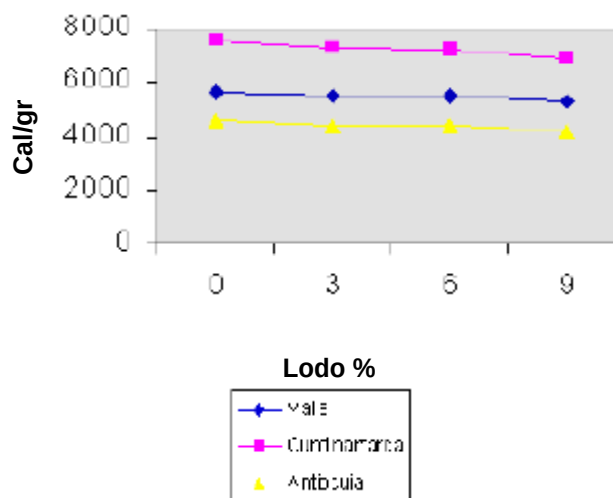


Figura 3. Poder Calorífico

El análisis de varianza se realiza de igual manera que en el caso anterior y los resultados son los siguientes:

Tabla 4. Análisis de Varianza.

Fuente de Variación	SC	GL	CM	F	F*
Origen	32751553,3	2	16375776,7	5446,7	3,88
% de lodo	539336,4	3	179778,8	59,8	3,49
Interacción	98645,4	6	16440,9	5,5	3,00
Error	3006,6	12	250,5		
Total	33392541,7	23			

Como $F > F^*$, existe efecto de los dos factores de estudio sobre el poder calorífico. El análisis de varianza y específicamente el factor F muestran un mayor efecto por el origen ($F = 5446,7$) que el asociado al porcentaje de lodo ($F = 59,8$).

Para establecer una comparación entre ellos se aplicó el método de comparaciones múltiples de diferencia mínima significativa (DMS). Con $\alpha = 0.05$ y $GLE = 12$ se tiene $t = 2,179$ (Fisher, 1989).

$$DMS = t(\alpha, GLE) \sqrt{\frac{2CME}{r}}$$

$$DMS = 2,179 \sqrt{\frac{2(250.5)}{2}} = 34.5 \frac{Cal}{g}$$

Por tanto, son significativas diferencias mayores a 34,5 Cal/g. Así pues, la diferencia mínima que puede causar cualquiera de los dos efectos debe ser mayor a 34,5 Cal/g. La Figura 3 muestra de una manera clara los dos efectos; y se registran los tres tipos de carbones con diferentes poderes caloríficos: el carbón con el mayor poder calorífico es el de Cundinamarca, seguido por el del Valle y luego el de Antioquia. Las mayores variaciones se presentan en el carbon de Cundinamarca (7537,6 cal/g a 6876,5 cal/g, 8.77 %), seguido del de Antioquia (4524,2 cal/g a 4250,7 cal/g, 6.05 %) y luego el del Valle (5637,7 a 5322,7 cal/g, 5.59 %); por tanto, el carbón del Valle es el que presenta el mejor comportamiento, además de tener un menor costo comparado con los carbones de Cundinamarca y Antioquia (Carbones y Suministros, 2005; Prominas, 2005).

Relación molar Hidrógeno/Carbono (H/C)

Se calcula a partir del análisis elemental así:

$$H/C = \frac{\%Hidrógeno * 12}{\%Carbono * 1}$$

Los resultados obtenidos de la relación H/C a partir del análisis elemental son los siguientes:

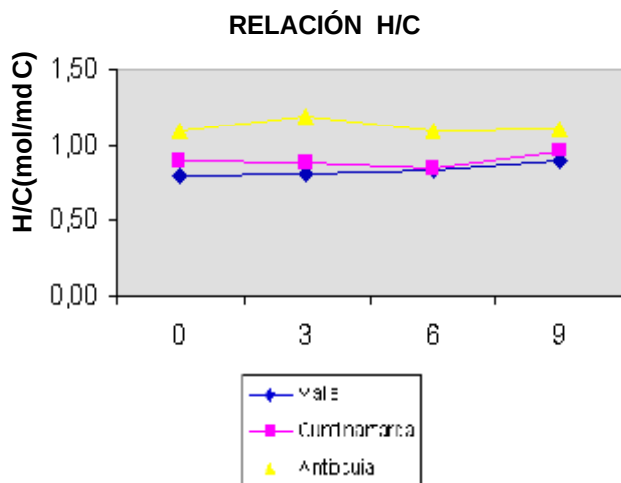


Figura 4. Relación H/C

Y el análisis de varianza es el siguiente:

Tabla 5. Análisis de Varianza.

Fuente de Variación	SC	GL	CM	F	F*
Origen	0.35	2	0.177	68.32	3.88
% de lodo	0.02	3	0.006	2.18	3.49
Interacción	0.02	6	0.004	1.38	3
Error	0.03	12	0.003		
Total	0.42	23			

La comparación de F y F* obtenidos en el análisis de varianza muestra que sólo hay efecto por el factor de origen mas no por la adición de lodo.

En la Figura 4 se muestra el comportamiento de los tres carbones como función del porcentaje de lodo. Se aprecian las diferencias entre los tres orígenes, donde el que presenta la mayor relación H/C es el de Antioquia (varía entre 1,09 y 1,11), seguido del de Cundinamarca (varía entre 0,90 y 0,97) y Valle (varía entre 0,80 y 0,90) que presentan similar comportamiento, además de la poca variación asociada a la adición de lodo, mostrando total coherencia con el análisis de varianza.

Esto evidencia cómo la adición del lodo no afecta la relación molar H/C para los diferentes carbones estudiados.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El porcentaje de lodo en las mezclas de estudio no afecta el comportamiento del carbón; las diferencias encontradas en los diferentes tratamientos obedecen al factor de origen. Esto es corroborado cuantitativamente en el análisis de varianza de los diferentes parámetros y cualitativamente en la termogravimetría.
- El factor de porcentaje de lodos empleados en las mezclas de interés no es significativo para: la energías de activación, la relación molar H/C, y las temperaturas características. Y, aunque es

significativa para el poder calorífico, es mucho menor el efecto que el obtenido por el factor de origen; lo anterior muestra que la adición de porcentajes pequeños de lodo deshidratado al carbón (menor que el 9 %) no genera modificación en el comportamiento del carbón. También se pudo determinar que el carbón que presenta el mejor comportamiento es el del Valle pues al mezclarse con el lodo experimenta el menor porcentaje de disminución en su poder calorífico, además de presentar un menor costo.

- En los escenarios actual y futuro, la producción de lodos en la PTAR Cañaveralejo no modifica el comportamiento del carbón al adicionar lodo en los porcentajes estudiados.
- Se recomienda estudiar los índices de Fouling y Slagging, ya que la composición química de las cenizas del biosólido puede afectar las temperaturas de fusibilidad, tal como lo reportan en la literatura Davidson (1999) y Pronobis (2005). Además, aunque el porcentaje de lodo en las mezclas es pequeño, éste puede disminuir las temperaturas de fusibilidad, tal como lo muestran Probst y Wehland (1995).
- Finalmente, se deben realizar los ensayos y el estudio a nivel de planta piloto, en el cual se evalúen los diferentes factores macroscópicos que afectan la combustión y estudiar los potenciales usos de las cenizas.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Billotet, T., Bemtgen, J., Hein, y K.; Minchener, A. (1995). Combustion test with dried sewage sludge in coal-fired power plant. In: APAS Clean Coal Technology programe 1992-1994. Volume II: Combined Combustion of biomasa/sewage sludge and coals, 18pp, paper B20, Stuttgart, Germany.
- Cumming, J. (1984). Reactivity assessment of coals via a weighted mean activation energy. *Fuel*, Vol 63, p.1436-1440.
- Folgueras, M. Díaz, M. Xiberta, J. (2003). Thermogravimetric analysis of the co-combustion of coal and sewage sludge. *Fuel*, Vol 82, p 2051-2055.
- Fisher, R. (1989). *Statistical Methods for Research Workers*, 10a.ed. Edinburgo.
- Mesa, E. (1999). *Diseño de experimentos*. Capítulo 2, Universidad del Valle, Facultad de Ingenierías, Cali, Colombia.
- Moreno, J., Ospina, G. (2003). Normatividad y caracterización de lodos y biosólidos generados en la PTAR: caso PTAR Cañaveralejo. Universidad del Valle. Facultad de ingeniería. EIDENAR. Ingeniería sanitaria. Santiago de Cali.
- Morgan, D., Van Kamp, W. (1995). The co-firing of bituminous coals with municipal sewage sludge for application to the power generation industry. In: APAS Clean Coal Technology programe 1992-1994. Volume II: Combined Combustion of biomasa/sewage sludge and coals, 35pp, paper B4, Stuttgart, Germany.
- Robst H. Wehland P. (1995). Combustión test with dried sewage sludge in coal-fired power plant. In: APAS Clean Coal Technology programe 1992-1994. Volume II: Combined Combustion of biomasa/sewage sludge and coals, 22 pp, paper B19, Stuttgart, Germany.
- Pronobis, M. (2005). Evaluation of the influence of biomasa co-combustion on boiler furnace slagging by means of fusibility correlations, *Biomasa & Bioenergy*, Vol 28, p 375-383.
- Snedecor, G. (1986). "Statistical Methods, 4 ed", The Collegiate, Ames, Iowa.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.