

Jerarquización de tecnologías para el aprovechamiento industrial del subproducto de la digestión anaerobia del bagazo de fique

Hierarchization of technologies to industrial use of byproduct from fique's bagasse anaerobic digestion

LORENA PLATA

Ing. Química

Programa Jóvenes Investigadores-Colciencias

lplata@colciencias.gov.co

Bogotá, Colombia

DAYANA RIVERA

Ing. Química

Empresa Salgado Meléndez y Asociados SA

esdayanarigo@unisabana.edu.co

Bogotá, Colombia

LILIANA CASTRO

Ing. Química Ph. D.

Profesora Universidad Santo Tomas

pilicasm084@gmail.com

Bucaramanga, Colombia

CAROLINA GUZMÁN

Microbióloga, Ph. D.

Profesora Universidad Industrial de Santander

caguzhun@uis.edu.co

Bucaramanga, Colombia

HUMBERTO ESCALANTE

Ing. Químico Ph. D.

Profesor Universidad Industrial de Santander

escala@uis.edu.co

Bucaramanga, Colombia

Fecha de recibido: 03/10/2011

Fecha de aceptado: 15/12/2012

RESUMEN

En Colombia existen aproximadamente 19 mil hectáreas sembradas con plantas de fique, con un rendimiento anual de 1,16 t/ha de fibra, las cuales generan alrededor de 108000 t de bagazo. La caracterización fisicoquímica y el poder calorífico del bagazo de fique (BF) lo hacen idóneo como fuente de carbono para la producción de biogás. La digestión anaerobia del BF, utilizando como inóculo líquido ruminal y lodo estiércol de cerdo, genera 0,45 m³ CH₄/kg SV adicionados y como subproducto un lodo efluente (LE). La inadecuada disposición del LE ocasionaría problemas ambientales en aguas subterráneas y suelos. La caracterización fisicoquímica y microbiológica del LE, reportó contenido de fibras, minerales, micronutrientes y un valor alimenticio relativo (156,12) que permite clasificarlo como forraje tipo prime y como biosólido clase B según el contenido de patógenos. Mediante la metodología analytical hierarchy process (AHP) y el software expert choice v.11.5, el acondicionamiento del suelo y la producción de concentrado para animales fueron seleccionadas como las alternativas adecuadas para el aprovechamiento industrial del LE.

PALABRAS CLAVES: Bagazo de Fique, Lodo Efluente, Analytical Hierarchy Process (AHP), Expert Choice.

ABSTRACT

In Colombia, there are 20000 hectares seeding with fique's plants, giving an annual yield of 1,16 t/ha of fiber, which generate approximately 108000 t of fique's bagasse (FB). This biomass is a suitable carbon source for biogas production according to its physicochemical characterization and heating power. Currently, FB anaerobic fermentation, using as inoculums of rumen fluid and pig manure, generate methane yield of 0,45 m³ CH₄/Kg added VS and a sludge effluent (SE) as a by-product. The inadequate disposition of SE would cause environmental problems in underground waters and soils. The physico-chemical and microbiological characterization of SE classified, according with content of fibers, minerals, micronutrients and relative feed value (156, 12), as prime forage and as class B biosolid owing to the content of pathogens. By means of the analytical hierarchy process (AHP) methodology and software expert choice v.11.5, the preparation of soil conditioner and the animal feed production was selected like the alternatives adapted for the industrial advantage of SE.

KEYWORDS: Fique's bagasse, Sludge Effluent, AHP, Expert Choice.

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo a la composición en peso de la hoja de fique, durante el proceso del beneficio, se produce 5% (p/p) en fibra, 75% (p/p) de jugo y 25% (p/p) de bagazo de fique (BF) [1].

En Colombia existen aproximadamente 19 mil hectáreas sembradas con plantas de fique (distribuidas en los departamentos de Cauca, Nariño, Antioquia, Santander y Boyacá), con un rendimiento anual de 1,16 t/ha de fibra, las cuales generan alrededor de 108000 t BF sembrada [2]. El bagazo y el jugo son residuos que causan contaminación en el ambiente debido a la incorrecta disposición. El BF posee una adecuada relación carbono/nitrógeno y un poder calorífico inferior (3298 kcal/kg), que lo hace idóneo como fuente de carbono para la producción de biogás [3]. La digestión anaerobia de BF, utilizando como inóculo la mezcla de líquido ruminal y lodo estiércol de cerdo, genera 0,45 m³ CH₄/kg de sólidos volátiles (SV) y un lodo efluente (LE) como subproducto [3].

En Santander, se generan aproximadamente 4,9 t BF/ha. El proceso de digestión anaerobia del BF genera diariamente 0,17 kg de LE por cada 0,3 kg de BF alimentado [4]. Si el proceso de digestión anaerobia de BF es implementado a nivel industrial, en Santander se producirían aproximadamente 7655 t de LE/año. La inadecuada disposición del LE ocasionaría problemas ambientales en aguas subterráneas (por lixiviados) y en suelos, afectando el ecosistema del área donde se depositen.

Existen diversos estudios enfocados al tratamiento y uso de residuos como LE. Teniendo en cuenta la caracterización fisicoquímica y microbiológica de LE se encuentran técnicas para su disposición como: la incineración [5], vertido al mar [6], fabricación de

cerámicos [7], producción de biodiesel [8], compostaje y acondicionamiento de suelos [9] y producción de alimento para animales [10].

Es necesario seleccionar y estudiar alternativas tecnológicas para el aprovechamiento y disposición final del LE; reduciendo su impacto ambiental. A nivel de ingeniería existen diferentes métodos de decisión que permiten la selección de tecnologías adecuadas para un determinado proceso. El objetivo de este trabajo fue jerarquizar las tecnologías, fabricación de ladrillos, el compostaje, la incineración, el acondicionamiento de suelos y la producción de alimento para animales, como alternativas tecnológicas para el LE de la digestión del BF. Para llevar a cabo este objetivo y buscar la tecnología que permita el aprovechamiento industrial del subproducto de la digestión anaerobia del BF se utilizó el *Analytical Hierarchy Process* (AHP); el cual es un método que utiliza una estructura jerárquica para la toma de decisiones ingenieriles. En la sección de la tecnología más apropiada para el aprovechamiento del LE se definieron cuatro criterios para el AHP: el nivel de desarrollo de la tecnología, los costos, el impacto ambiental y el componente social. El desarrollo del AHP se realizó mediante el software *Expert Choice 11.5* [11], el cual facilita los procesos de decisión y ofrece resultados completos para tomar una decisión final óptima.

2. METODOLOGÍA

2.1 Analytical Hierarchy Process (AHP)

El AHP se fundamenta en la asignación de determinados criterios, que permiten evaluar entre sí y dar prioridad a una tecnología con respecto a otras. Cada criterio se divide en varios sub-criterios y la toma de decisiones se realiza mediante comparaciones pareadas entre los elementos de la jerarquía.

Desde su introducción, AHP ha sido ampliamente utilizado, por ejemplo en procesos de fabricación, operadores de evaluación, selección de medicamentos, evaluación de software, selección de tecnología para reciclaje, método de selección de minería subterránea y evaluación de la sostenibilidad, selección de proyectos y selección de tecnologías de aprovechamiento energético [12].

El AHP se desarrolla mediante el software *Expert Choice 11.5*, el cual facilita los procesos de decisión, ofrece resultados completos para tomar una decisión final óptima. Además permite realizar un análisis de sensibilidad con el que se evalúa la importancia en el cambio de la estructura jerárquica al realizar modificaciones en la importancia de los criterios [13]. La aplicación del AHP involucra el planteamiento y desarrollo de las etapas de: modelización del problema, la definición de las escalas de ponderación, la evaluación de prioridades y la síntesis del problema.

2.1.1 Modelización del problema

En esta etapa, mediante el software *Expert Choice*, se definen los elementos de la estructura jerárquica: el objetivo, los criterios, los sub-criterios y las alternativas [14]. Es indispensable tener perfectamente definido el objetivo del análisis jerárquico y los ítem que se van a valorar; esto permite que el análisis este orientado a la solución del problema.

2.1.2 Definición de escalas de ponderación

Una vez construida la estructura jerárquica del problema se realizan comparaciones pareadas (generando una matriz de comparación) siguiendo la jerarquía del modelo: objetivo, criterios, sub-criterios y finalmente alternativas. Para realizar las comparaciones se requiere construir una escala, según las recomendaciones de *Saaty* [15], asignando un valor numérico a cada criterio de acuerdo a unos calificativos cualitativos (Tabla 1).

Tabla 1. Escala de Saaty, para ponderación de criterios y sub-criterios.

Valor cuantitativo	Valor cualitativo
1	Igual importancia
3	Moderadamente preferido
5	En esencia preferida
7	Muy fuertemente preferido
9	Muy preferido
2, 4, 6, 8	Importancia intermedia entre juicios adyacentes

El método AHP permite mediante la escala *Saaty* ordenar por preferencias los elementos para la toma de decisión. La persona que opera el software, a quien se denomina “el decisor”, debe realizar comparaciones pareadas y asignar una puntuación para los elementos del problema. La calificación se basa en una escala de 1 (igual importancia) a 9 (extrema importancia de un elemento con relación a otro). Los números pares se utilizan para expresar situaciones intermedia. Si hay “n” elementos se genera una matriz “n × n” (matriz de comparaciones pareadas), en la que los elementos en posiciones opuestas a la diagonal principal son recíprocos el uno del otro [13].

Expert Choice permite crear las matrices de comparación respecto a un criterio específico. *Expert Choice* asigna códigos de colores para la comparación de datos. La información compilada en la matriz indica que el elemento de una fila es «x veces» más importante que el de una columna, el software permite visualizar estos datos en color negro; si el valor es reportado en color rojo indica lo contrario. La comparación de un elemento consigo mismo da un valor de uno [14].

2.1.3 Evaluación de prioridades y síntesis del problema

Una vez alimentado el software con las matrices de ponderación para las tecnologías, *Expert Choice* define y calcula un vector de prioridades locales (alternativas respecto a cada uno de los criterios) y globales (criterios respecto al objetivo) [13]. Adicionalmente, en esta etapa se realiza el análisis de sensibilidad, para observar y evaluar la contribución de cada criterio respecto al orden jerárquico de las alternativas. Este tipo de análisis permite encontrar el rango de contribución de cada criterio al orden jerárquico, lográndose filtrar la subjetividad de las decisiones tomadas durante la asignación de los valores de *Saaty*.

2.2 Tecnologías para el aprovechamiento de lodos

Incineración

Este tratamiento térmico permite la reducción del volumen de lodos, la minimización de la generación de olores, la destrucción térmica de compuestos orgánicos tóxicos y la posibilidad de convertir el residuo en energía útil [16]. Sin embargo, la incineración no constituye un método de eliminación completa pues aproximadamente el 30% de los lodos se convierten en cenizas, que en algunos casos son consideradas como altamente tóxicas debido a su contenido compuestos

contaminantes [17]. La aceptación pública de la incineración impone que los gases de combustión sean sometidos a completa limpieza, para cumplir con límites de emisiones exigibles para estos residuos.

Compostaje

El compostaje es una de las tecnologías más utilizadas para el tratamiento de efluentes. El proceso de compostaje se lleva a cabo en pilas donde se requiere el uso de materiales de soporte (astillas de madera, residuos de poda y jardinería, forrajes, cáscaras de cereales, etc) para evitar la formación de grumos, mejorar la homogenización y porosidad de la materia orgánica y disminuir el porcentaje de humedad. En el compostaje, durante la transformación del residuo se alcanza condiciones termófilas con las que se logra la reducción de patógenos [18]. El proceso de compostaje, además de ser una alternativa de estabilización de la materia orgánica, favorece la gestión de los biosólidos generados en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) y permite la disminución de requerimientos de transporte y área para su disposición final [18].

El compostaje permite reciclar lodos residuales, producir abonos a bajos costos y genera beneficios económicos y ambientales. Se ha demostrado que los lodos de depuradoras y biosólidos podrían ser fuentes de N, P y K para los cultivos, la aplicación de estos lodos compostados mejora la absorción de minerales en el suelo y permite un mayor rendimiento en los cultivos [19].

Acondicionamiento de suelos

El uso de lodos de aguas residuales como acondicionador de terrenos para cultivos es una práctica promovida por su valor agronómico y su capacidad de recuperar los nutrientes del suelo perdidos a causa del cultivo excesivo [20]. Sin embargo, la aplicación de lodos crea potenciales impactos ambientales debido a contaminación del suelo y aguas subterráneas. Por lo general, los factores a considerar para la aplicación de lodos de depuradoras, en suelos destinados a cultivos, son la concentración de metales pesados en el suelo y las plantas [21].

Debido a la presencia de contaminante orgánico, metales pesados, exceso de materia orgánica, lixiviado y patógeno para la disposición de los lodos sobre el suelo, se requiere someter el residuo a un tratamiento de estabilización; el cual genera a su vez un biosólido.

Teniendo en cuenta la reducción de patógenos la U.S. EPA (Norma 503) clasifica los biosólidos como Clase A y Clase B; dependiendo del grado de tratamiento que los lodos hayan recibido [22]. Para aplicar un biosólido líquido, sobre la superficie del suelo o inyectado, este debe cumplir con las especificaciones de la categoría clase A [10]. En Colombia, la NTC 5167 (2011-03-23) utiliza parámetros microbiológicos con valores límites semejantes a un lodo clase A adicionando el ausencia de microorganismos fitopatógenos [23]. Es posible que la consistencia de los lodos aplicados en la superficie cree formación de grumos o terrones en el suelo, esto ocasiona retraso en la biodegradación normal. Si los lodos son aplicados mediante inyección o durante el arado del terreno, el retraso en la mineralización será más corto.

Producción de ladrillos

Por su alto contenido de humedad (80%) los lodos pueden ser utilizados para la fabricación de ladrillos. Entre las ventajas asociadas a esta tecnología se encuentran la inmovilización de metales pesados, la oxidación de la materia orgánica, destrucción de patógenos, reducción en los costos de materia prima [24] y el mejoramiento de la sinterización y propiedades de aislamiento térmico debido a la adición de estos residuos [25].

Estudios reportados muestran que lodos de la industria textil pueden ser empleados como sustitutos de parte del cemento en la fabricación de materiales para la construcción [26]. Además con las condiciones adecuadas de secado, los lodos pueden emplearse como sustituto de la arcilla en la producción de ladrillos, la calidad del ladrillo depende de la mezcla y temperatura de cocción [24].

Producción de concentrado para animales

Sustratos como residuos agroindustriales y efluentes de subproductos asociados a la intensificación agrícola pueden emplearse en la producción de alimentos para animales, con lo que se consigue la disminución del costo en la alimentación [10, 27]. La reutilización de lodos permite extraer biomateriales útiles o transformar el lodo en sustancias valiosas a través de procesos fisicoquímicos o biológicos. Los lodos pueden estar compuestos de sustancias orgánicas valiosas como ácidos nucleídos, enzimas, fibra y proteínas [10].

Los residuos agrícolas de naturaleza lignocelulósica, poseen alto potencial energético y bajo pH, han mostrado excelentes resultados al ser utilizados en forma de

ensilaje [28]. Así mismo ha sido posible la obtención de prebióticos a partir del *Agave Fourcroydes*, para emplearse como aditivo en la alimentación de cerdos y otras especies animales [29].

3. MATERIALES Y MÉTODOS

El lodo efluente utilizado en este estudio fue obtenido del proceso de digestión anaerobia del BF, de acuerdo con las recomendaciones de Escalante *et al.* (2012) [4]. Se utilizó como inóculo la mezcla de líquido ruminal y lodo estiércol de cerdo, con una relación sustrato/inóculo de 1,3 gsv/gsv a temperatura ambiente. El proceso fue llevado a cabo en un reactor continuo que operó durante 120 días con una producción diaria de 30 L de biogás. El reactor fue alimentado diariamente

con 300 g de BF, haciendo descargas de 170 g de lodo efluente, el cual fue separado en dos fases, la fracción líquida (biomasa) se recirculó al reactor y la fracción sólida, que corresponde al lodo efluente, se sometió a caracterización microbiológica y fisicoquímica.

3.1 Caracterización microbiológica de LE

Dada la naturaleza del inóculo, utilizado en la digestión anaerobia, se realizó la caracterización microbiológica al LE mediante la técnica del Numero Más Probable (NMP), las pruebas bioquímicas e identificación serológica y la flotación en $ZnSO_4$. La caracterización microbiológica del LE se realizó en los laboratorios de la Escuela de Bacteriología y Laboratorio Clínico de la Universidad Industrial de Santander.

Tabla 2. Caracterización microbiológica de LE obtenido en la DABF.

Análisis Microbiológico	Unidad	Valor	Técnica de medición	Clasificación según la EPA*	
				Clase A	Clase B
Coliformes Totales	NMP/g ST	$4,1 \times 10^9$	NMP en caldo LMX Fluorocult.	-	-
Coliformes Fecales	NMP/g ST	$5,8 \times 10^5$	NMP en caldo LMX Fluorocult	< 1000 NPM /g ST	< 2×10^6 NPM g ST
<i>Salmonella sp.</i>	Presencia	Ausente	Pruebas Bioquímicas e identificación serológica.	< 3 NPM /4 g ST	-
Huevos de Helminetos	HH/ 4 g ST	0	Flotación en $ZnSO_4$	< 1 huevo/4 g ST	-

*US EPA: Environmental Protection Agency

La caracterización microbiológica (Tabla 2) permitió cuantificar coliformes totales y fecales, *salmonella* y huevos de helmintos; la presencia de este tipo de microorganismos en LE es un indicador de contaminación. La caracterización microbiológica permitió clasificar al LE como un biosólido clase B, debido principalmente al contenido de coliformes fecales. La normatividad sanitaria establece dos restricciones referentes a los biosólidos tipo B: *i*) se prohíbe el acceso de personas al sitio donde ha sido vertido, *ii*) no puede ser utilizado en terrenos para pastoreo de ganado. Por consiguiente, el LE antes de ser dispuesto debe someterse a un proceso de acondicionamiento que permita cumplir con las estrictas regulaciones estipuladas para su utilización [30].

3.2 Caracterización fisicoquímica LE

La caracterización fisicoquímica del LE incluyó un análisis bromatológico, reporte en base húmeda e indicadores de degradación de la materia orgánica. Estos análisis se realizaron siguiendo los procedimientos establecidos en los *Standard Methods for Examination of water and Wastewater* [31]. El análisis bromatológico del LE (Tabla 3) permitió determinar la concentración de lignina, celulosa, hemicelulosa, FDA, FDN, proteína bruta, minerales y contenido energético. El análisis bromatológico del LE se determinó de acuerdo con el método de *Van Soest* [32].

Tabla 3. Características Bromatológicas del LE.

Parámetro	Unidades	Valor	
Fibras	FDN	%	44,65
	FDA	%	18,41
	FDK	%	3,40
Proteína bruta	%	14,88	
Lignina	%	1,30	
Celulosa	%	0,00	
Hemicelulosa	%	11,41	
Carbohidratos no estructurados	%	41,42	
Cenizas	%	29,52	
Minerales	Fósforo	%	3,83
	Potasio	%	1,1
	Calcio	%	2,96
	Nitrógeno	%	2,38
	Magnesio	%	2,44
Energías	Energía Digerible	Kcal/Kg	3305
	Energía Metabolizable	Kcal/Kg	2710
Valor alimenticio relativo (RFV)			156,12

Las características reportadas (Tabla 3 y 4), permiten clasificar al LE como un forraje tipo *Prime* (excelente) según la *American Forage and Grassland Council*, debido a su valor alimenticio relativo (RFV). Una clasificación tipo *prime* del LE garantiza altos aportes nutricionales en la alimentación animal [33]. El contenido de fibras y algunos minerales permiten que el LE sea empleado en la producción de ladrillos, concentrados para animales y acondicionador para suelos.

Tabla 4. Características fisicoquímicas en base húmeda del LE.

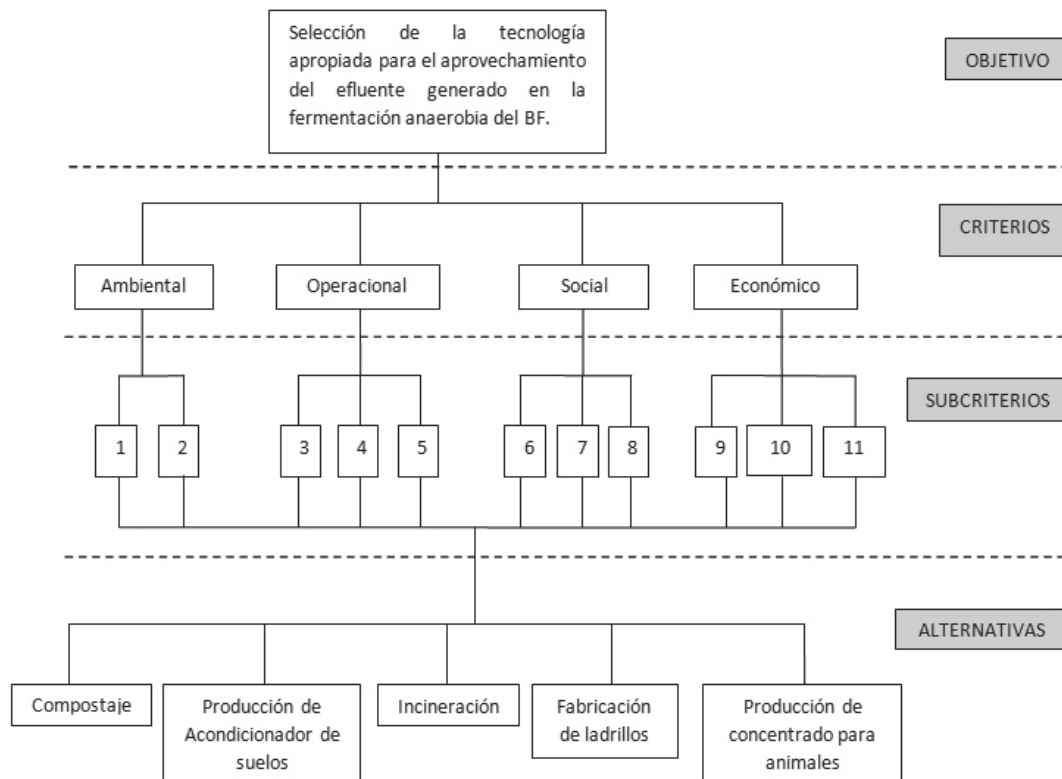
Parámetro	Unidades	Valor
Nitrógeno total	g/L	3,30
Potasio	g/L	0,93
K ₂ O	g/L	1,12
Fosforo	g/L	3,70
P ₂ O ₅	g/L	8,50
Azufre	g/L	1,00
Cobre	g/L	0,08
Zinc	g/L	0,15
Carbono orgánico Oxidable	g/L	45,80
Relación C/N		13,88

LE por su significativa concentración de nutrientes y bajo contenido de metales puede ser utilizado industrialmente, mediante la aplicación de tecnologías como el acondicionamiento del suelo y el compostaje. La disminución de algunos minerales se dio por aumento de pH que puede producir la volatilización principalmente de carbono y nitrógeno [34].

3.3 Diseño de AHP para seleccionar tecnología de aprovechamiento de LE

Con base en la revisión bibliográfica y los análisis fisicoquímicos y microbiológicos del LE se pre-seleccionaron como alternativas tecnológicas para el aprovechamiento del LE: el compostaje, la incineración, la producción de acondicionador de suelos, la fabricación de ladrillos y la producción de concentrado para animales.

El AHP, para seleccionar la mejor tecnología de aprovechamiento de LE, se realizó mediante el diseño de una estructura jerárquica específica a partir de cuatro niveles (Figura 1). En el primer nivel se definió el objetivo del análisis, en el segundo los criterios de evaluación, en el tercer nivel los sub-criterios y en el cuarto nivel las alternativas tecnológicas a estudiar.



Sub-criterios: 1. Descargas 2. Efectos de Contaminación
 3. Proceso 4. Transferencia tecnológica 5. Madurez de la tecnología
 6. Generación de empleo 7. Aceptación social 8. Impacto sobre la cadena productiva del Fique.
 9. Costo de inversión 10. Costo de operación 11. Servicios industriales

Figura 1. Estructura jerárquica para la selección de tecnologías para el aprovechamiento industrial del LE.

3.3.1 Criterios de evaluación

Se seleccionaron como criterios: el económico, el ambiental, el operacional y el social. Estos criterios son los más reportados en proyectos de selección de tecnología y disposición de lodos de manera sostenible [32, 35]. Estos criterios son estratégicos en el nivel intermedio de la estructura jerárquica para la priorización de las tecnologías.

3.3.1.1 Sub-criterios ambientales

El desarrollo de cualquier tecnología para el aprovechamiento de LE debe prever y controlar posibles contaminaciones futuras con los biosólidos producidos. Por consiguiente es necesario incluir en el diseño de

AHP sub-criterios para el manejo, control y seguimiento ambiental de la producción y comercialización de los biosólidos [34].

Como sub-criterios ambientales se contempló la evaluación de las descargas (subproductos líquidos, sólidos y gaseosos) emitidas con la implementación de cada una de las tecnologías en estudio (Tabla 5). Además, se evaluaron los efectos previsible directos o indirectos (alteración de la calidad y riesgo de contaminación) de cada tecnología sobre el aire, la flora, la fauna, el suelo y el agua [36]. AHP categoriza las alternativas con menores impactos sobre el entorno, de acuerdo con la mejor calificación del sub-criterio ambiental.

Tabla 5. Indicadores del criterio ambiental.

Tecnología	Sub-criterios Ambientales		
	Efluentes líquidos	Emisión de gases	Emisiones sólidas
Incineración	Contaminantes inorgánicos (Cd, Pb, Hg) [37]	HCl, CO, NO _x , SO ₂ , PCDD/PCDF (dioxinas y furanos) [37]	Cenizas [37]
Compostaje	Lixiviados [38]	Nitrógeno (NH ₃ , NO _x , NO ₂ , N ₂), Carbono (CO ₂ , CH ₄) [38]	
Fabricación de ladrillos	Lixiviados, Compuestos inorgánicos: Cl y sus compuestos, F y sus compuestos. [39]	Gases de combustión: CO, CO ₂ , NO _x , SO ₂ [39]	Metales pesados: As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn. [39]
Acondicionamiento de suelos	Lixiviados, exceso de compuestos orgánicos [22]	Nitrógeno (NH ₃ , NO _x , NO ₂ , N ₂) [22]	
Producción de concentrado animal			Material particulado

3.3.1.2 Sub-criterios económicos

Se consideraron como sub-criterios económicos los costos de inversión, de operación y de servicios industriales involucrados en el desarrollo de las tecnologías de disposición bajo estudio (Tabla 6) [32]. Los costos de operación, para el desarrollo de las tecnologías, se calcularon teniendo en cuenta una

cantidad fija de lodo a tratar. Con el objeto de unificar los costos de operación para cada una de las tecnologías, se recurrió a precios de operación reportados para el tratamiento de lodos de PTAR, dado que este residuo posee características fisicoquímicas bastante similares al lodo del presente estudio. [38, 39, 42] La alternativa con menores costos económicos fue ponderada con la mejor calificación.

Tabla 6. Indicadores del criterio económico.

Tecnología	Sub-criterios Económicos		
	Inversión	Operacionales	Servicios Industriales
Incineración	Incinerador de lecho fluidizado: US\$ 278 millones	US\$ 7.4 millones [37]	Electricidad, combustible [38]
	Incinerador de Hogar múltiple: US\$ 313 millones		
Compostaje	Biorreactor de flujo por gravedad: US\$ 836 mil [40]	US\$ 100-280 [38]	Electricidad, agua, diesel [39]
	Biorreactor operado en modo de recirculación: US\$ 864 mil [40]		
Fabricación de ladrillos	US\$ 296 millones	El secado es un obstáculo para la viabilidad del proceso, el lodo añade más agua a la materia prima que la arcilla.	Electricidad, Combustible Agua [37]
Acondicionamiento de suelos	Los valores de costos son estimados dependientes de la forma de aplicación.	US\$ 15- 25 [40]	Electricidad
Producción de concentrado animal	Los valores de costos son estimados tomando como base la industria de alimentación para bovinos. [42]	Los valores de costos son estimados tomando como base la industria de alimentación para bovinos. [42]	Agua, energía eléctrica, diesel. [42]

*Datos determinados tomando como base de cálculo 1 ton y 1 año

3.3.1.3 Sub-criterios operacionales

Los sub-criterios operacionales seleccionados fueron: *proceso*, *transferencia tecnológica* y *madurez de la tecnología* [41]. En el sub-criterio de *proceso* se valoró según la complejidad en la ejecución de la tecnología. La *transferencia tecnológica* se valoró teniendo en

cuenta la viabilidad de implementación de las técnicas de disposición en las zonas fiqueras. Con respecto a la *madurez de la tecnología* se estimó de acuerdo a la investigación, montajes piloto y plantas instaladas (Tabla 7). A la alternativa con menores implicaciones operacionales se le atribuye la mejor calificación.

Tabla 7. Indicadores del criterio operacional.

Tecnología	Sub-criterios operacionales		
	Proceso	Transferencia tecnológica	Madurez de tecnología
Incineración	Deshidratación, secado, limpieza gases de combustión [43]	La limitación principal es su alto costo, equipos sofisticados para llevar a cabo el proceso [43].	Tecnología madura con varias plantas industriales en operación ⁴
Compostaje	Reducción de tamaño, fermentación, homogenización, filtración de gases [39,40]	Proceso convencional de fácil transferencia, con biorreactores requiere requerimientos de seguridad [39,40]	Tecnología madura con varias plantas industriales en operación [39,40]
Fabricación de ladrillos	Molienda y tamizado, mezcla, moldeado, compactación, sinterización [45].	La limitación principal es su alto costo, equipos sofisticados para llevar a cabo el proceso [43].	Tecnología en desarrollo con pequeñas plantas pilotos e industriales [43]
Acondicionamiento de suelos	Estabilización Inyección o aplicación en la superficie, Almacenamiento [46].	Sin limitación generalmente se incorporan al terreno utilizando equipos agrícolas convencionales [46].	Además del uso agrícola, esta práctica se está convirtiendo en uno de las más prometedoras formas para la recuperación de suelos degradados [46].
Producción de concentrado animal	Molienda, tamizado, mezclado, secado y empaque [42].	Requiere de equipos para llevar a cabo el proceso [42].	Tecnología en desarrollo con pequeñas plantas pilotos.

3.3.1.4 Sub-criterios sociales

La implementación de una tecnología para la disposición de LE pretende contribuir al bienestar social de los empresarios y trabajadores del sector fiquero. Como sub-criterios se evaluaron: *la generación de empleo*, *la aceptación social de la tecnología* [33, 41] y *el impacto*

del proceso sobre la cadena productiva del fique (Tabla 8). Para la valoración de este criterio se realizaron encuestas en el sector productivo, con el fin de evaluar si la implementación de las tecnologías contribuye a mejorar la productividad y competitividad de la Cadena Productiva del Fique (CADEFIQUE).

Tabla 8. Indicadores del criterio social.

Tecnología	Sub-criterios Sociales		
	Generación de empleo	Aceptación social	Impacto sobre la cadena productiva del fique
Incineración	Exige mano de obra calificada para la supervisión y operación de los incineradores [43].	Preocupación pública acerca de posibles emisiones nocivas [43].	Solución no integral, reconocida como una de las alternativas de disposición para lodos más costosas [43].
Compostaje	Exige mano de obra calificada para la supervisión y operación de los biorreactores [39,40].	El abono no presenta riesgo público, riesgo por sustancias químicas durante el transporte a la planta [40].	Solución integral como alternativa de disposición, requiere de espacio e inversión.
Fabricación de ladrillos	Exige mano de obra calificada para la supervisión y operación de los procesos [4].	Opción atractiva para el reciclaje de lodos y ciertos tipos de residuos inorgánicos [45].	Solución parcial, los lodos representa solo el 30% de las materias primas empleadas en el proceso [25].
Acondicionamiento de suelos	Mano de obra poco calificada para su ejecución [46].	Creciente interés por el uso de los lodos como acondicionador de suelos y fertilizantes en la agricultura [46].	Excelente manera de reciclaje, tanto los nutrientes y la materia orgánica contenida en los lodos [46].
Producción de concentrado animal	Exige mano de obra calificada para la supervisión y operación de los procesos.	Creciente interés por la disminución de costos en la alimentación animal.	Solución integral, los lodos se convierten en materia prima para el proceso.

3.3.2 Definición de escalas de ponderación

Para valorar los diferentes sub-criterios se utilizó para cada tecnología tanto balances de masa como información secundaria reportada en bibliografía; con el fin de establecer una pre-jerarquización de las alternativas en cada criterio. Se realizaron comparaciones binarias siguiendo la jerarquía del modelo (Figura 1): objetivo, criterios, sub-criterios y finalmente alternativas. Las comparaciones de los diferentes criterios se llevaron a cabo mediante matrices de ponderación; para lo cual se asignó un valor numérico en cada comparación según el pre-orden establecido anteriormente.

4. RESULTADOS

4.1 Valoración de la importancia en los niveles jerárquicos

Expert Choice 11.5 realizó las comparaciones entre los niveles de la estructura jerárquica; nivel por nivel hasta el superior. En la Tabla 9 se presenta un ejemplo de la asignación de los valores numéricos, de acuerdo a la escala de *Saaty*, durante la comparación pareada

de los criterios frente a calificaciones cualitativas. Con la asignación de calificadores numéricos el software generó el vector de prioridades locales para los cuatro criterios; permitiendo definir la importancia en este nivel de la jerarquía.

Tabla 9. Comparación pareada de los criterios respecto al objetivo.

	Ambiental	Económico	Operacional	Social
Ambiental	1	3	5	7
Económico	1/3	1	3	5
Operacional	1/5	1/5	1	3
Social	1/7	1/3	1/3	1

Con respecto a los sub-criterios, después que *Expert Choice* realizó todas las comparaciones por pares, generó los vectores de prioridad local (pesos) los cuales proporcionan la medida de la importancia relativa de cada uno de los niveles de la jerarquía (Tabla 10 para el caso particular de los sub-criterios del criterio económico).

Tabla 10. Comparación por pares de los sub-criterios económicos.

	Costos de inversión	Costos de operación	Servicios industriales
Costos de inversión	1	1/3	1/5
Costos de operación	3	1	3
Servicios industriales	5	5	1

La selección de las tecnologías más adecuadas para el aprovechamiento industrial de LE se determinó sobre la base de los pesos de importancia obtenidos por el software para las diferentes alternativas. Los pesos que se obtuvieron proporcionan una medida de la importancia relativa de cada uno de los criterios (Tabla 11).

Tabla 11. Valor de importancia de criterios, sub-criterios y alternativas generados por Expert Choice.

Valor de importancia (Nivel 1)	Valor de importancia (Nivel 2)	Prioridad				
		Acondicionamiento de suelos	Compostaje	Producción de concentrado animal	Incineración	Fabricación de ladrillos
		43,0	19,2	26,7	3,7	7,4
Ambiental (L:0,565)		24,2	9,2	18,9	2,1	3,5
	Descargas (L:0,750)	0,205	0,070	0,121	0,015	0,026
	Efectos de contaminación (L:0,250)	0,037	0,022	0,068	0,006	0,009
Económico (L: 0,262)		12,7	5,2	3,2	0,7	1,5
	Costos de inversión (L:0,110)	0,014	0,006	0,004	0,001	0,002
	Costos de operación (L:0,567)	0,072	0,030	0,019	0,004	0,008
	Servicios industriales (L:0,323)	0,041	0,016	0,009	0,002	0,005
Operacional (L: 0,118)		5,4	3,4	2,0	0,4	1,0
	Proceso (L:0,731)	0,042	0,021	0,015	0,003	0,007
	Transferencia tecnológica (L:0,081)	0,005	0,002	0,001	0,000	0,001
	Madurez de la tecnología (L:0,188)	0,007	0,011	0,004	0,001	0,002
Social (L:0,055)		0,7	1,4	2,6	0,5	1,4
	Generación de empleo (L:0,738)	0,002	0,010	0,020	0,005	0,013
	Aceptación social (L:0,170)	0,003	0,002	0,005	0,000	0,001
	Impacto sobre cadena productiva del fique (L:0,092)	0,002	0,002	0,001	0,000	0,000

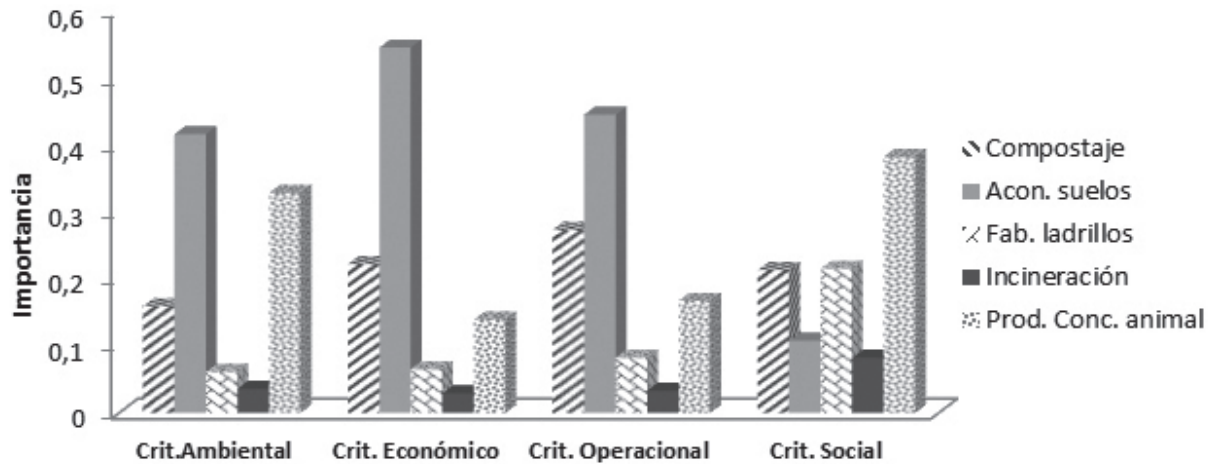


Figura 2. Integración del peso de las alternativas respecto a los criterios.

A partir de los pesos para los criterios de cada nivel, fue posible obtener el peso total (prioridad); el cual permitió establecer el aporte de cada criterio a la clasificación final de las alternativas. De acuerdo a los pesos totales (Tabla 12) *Expert Choice* categorizó los criterios por su importancia como: ambiental (0,565), económico (0,262), operacional (0,118) y finalmente el criterio social (0,055). Lo anterior es coherente con lo dispuesto en la legislación ambiental colombiana, para la protección del medio ambiente. La alternativa más viable según los criterios evaluados para este estudio fue el acondicionamiento de suelos con 43,0% de favorabilidad seguida por la producción de concentrado para animales con 26,3% y como alternativa menos conveniente la incineración con 3,7%.

En la Figura 2 se puede observar el peso relativo (valor de importancia) de las tecnologías respecto a los criterios. Se observa que el Acondicionamiento de Suelos (AS) y la Producción de Concentrado para Animales (PCA) tienen la mayor preferencia en el criterio ambiental lo cual se debe a las pocas descargas al ambiente que se generan con estas alternativas. La Incineración (I) y la Fabricación de Ladrillos (FL) están consideradas como las alternativas menos convenientes respecto a aspectos ambientales y económicos; esto debido a elevados costos para su implementación y a las regulaciones que deben cumplir con respecto a la calidad ambiental.

El AS presenta el mayor valor de importancia en los criterios ambiental, económico y operacional. Sin embargo el AHP castiga a esta tecnología, con respecto al criterio social, dado el bajo nivel de generación de empleo.

Adicionalmente se realizó un análisis de sensibilidad para evaluar la contribución de cada criterio respecto al orden jerárquico de las alternativas.

El análisis de sensibilidad, para las comparaciones pareadas obtenidas por *Expert Choice*, generó un vector de prioridades para los criterios así: ambiental 56,5%, económico 26,2%, operacional 11,8% y social 5,5%. La mayor importancia la tiene el criterio ambiental debido a las estrictas regulaciones establecidas para la disposición de un lodo efluente de digestión anaerobia. Cualquier alteración en valor del criterio ambiental, se traduce en una modificación en el orden jerárquico de las tecnologías. Por lo tanto, el análisis de sensibilidad permite encontrar el rango de contribución de cada criterio en el orden jerárquico de las alternativas (Tabla 11).

Tabla 12. Rango de contribución de los criterios al orden jerárquico de las alternativas.

Criterios	Rango de contribución	Orden de prioridad para alternativas
Ambiental	(0-0,21) (0,21-1)	(AS-C-PCA-PL-I)
		(AS-PCA-C-PL-I)
Económico	(0-0,61) (0,61-1)	(AS-PCA-C-PL-I)
		(AS-C-PCA-PL-I)
Operacional	(0-0,52) (0,52-1)	(AS-PCA-C-PL-I)
		(AS-C-PCA-PL-I)
Social	(0-0,43) (0,43-0,72) (0,72-0,79) (0,79-0,98) (0,98-1)	(AS-PCA-C-PL-I)
		(PCA-AS-C-PL-I)
		(PCA-C-AS-PL-I)
		(PCA-C-PL-AS-I)
		(PCA-PL-C-AS-I)

En la Tabla 12 se observa que el AS pasa al segundo orden de la jerarquía cuando se modifica la importancia del criterio social por encima de 0,43. El AS y la PCA sigue ocupando la mejor ubicación jerárquica en el mayor rango para el criterio social (0-0,72). Respecto al rango de contribución en los criterios ambiental, operacional y económico se puede observar que el orden jerárquico obtenido por el software se mantiene en el mayor intervalo de contribución (0,21-1). Se puede observar que el AS y la PCA son alternativas adecuadas para el tratamiento de LE, manteniéndose como prioridad en el mayor intervalo del rango de contribución en todos los criterios, incluso desde el punto de vista social, criterio con el menor peso en la jerarquía.

5. CONCLUSIONES

El acondicionamiento de suelos y la producción de un concentrado para animales son las alternativas tecnológicas más apropiadas para el aprovechamiento industrial del lodo efluente, generado durante la digestión anaerobia del bagazo de fique, según la jerarquización de tecnologías obtenida a partir de la aplicación del *Analytical Hierarchy Process*. El método de jerarquización se estructuró tomando como base las características fisicoquímicas y microbiológicas del lodo efluente y los criterios ambiental, económico, operacional y social.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan agradecimiento al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Colciencias y la Universidad Industrial de Santander por el apoyo para la realización de este trabajo.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Ministerio nacional de planeación. Guía ambiental del subsector fiquero. 2006.
- [2] MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL. Anuario estadístico del sector agropecuario y pesquero 2009.
- [3] CASTRO L., ESCALANTE H., QUINTERO M., ORTIZ C., GUZMÁN C. *Producción de Biogás a partir del bagazo de fique generado durante el beneficio de fique*. 2009. Cuarto Simposio de química aplicada. SIQUIA. [ISBN 978-958-8593-12-8].
- [4] ESCALANTE H., ORTIZ C., GUZMAN C. *Biogás a partir de bagazo de fique*. Ediciones UIS. 2012.
- [5] FYTILI D., ZABANIOTOU A. *Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods—A review*. 2008. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 12, pp.116-140.
- [6] NIHOUL C., *Dumping at sea*. 1991. *Ocean and Shoreline Management*. Vol. 16, (3-4), pp. 313-326.
- [7] MONTERO M., JORDÁN M., HERNÁNDEZ-CRESPO M., SANFELIU T. *The use of sewage sludge and marble residues in the manufacture of ceramic tile bodies*. 2009. *Applied Clay Science*. Vol. 46, pp. 404–408.
- [8] ANGERBAUER C., SIEBENHOFER M., MITTELBACH M., GUEBITZ G. *Conversion of sewage sludge into lipids by *Lipomyces starkeyi* for biodiesel production*. 2008. *Bioresource Technology*. Vol. 99, pp. 3051–3056.
- [9] SONG U., LEE E. *Environmental and economic assessment of sewage sludge compost application on soil and plants in a landfill*. 2010. *Resources, Conservation and Recycling*. Vol. 54, pp. 1109–1116.
- [10] HWANG J., ZHANG L., SEO S., LEE Y-W., JAHNG D. *Protein recovery from excess sludge for its use as animal feed*. 2008. *Bioresource Technology*. Vol. 99, pp. 8949–8954.
- [11] Expert Choice, Expert Choice Inc. Available from <<http://www.expertchoice.com>>.
- [12] ISHIZAKA A., LABIB A. Review of the main developments in the analytic hierarchy process. *Expert Systems with Applications*, Volume 38, Issue 11, October 2011, Pages 14336-14345
- [13] MARTÍNEZ E. *Aplicación del proceso jerárquico de análisis en la selección de la localización de una PYME*. 2007. Anuario jurídico y económico Escorialense. pp. 523-542.
- [14] COLOMBO S., ANGUS A., MORRIS J., PARSONS D., BRAWN M., STACEY K., HANLEY N. *A comparison of citizen and "expert" preferences using an attribute-based approach to choice*. 2009. *Ecological Economics* Vol. 68, pp. 2834–2841.
- [15] SAATY T., *Practical Strategy*. Open Access Material. AHP. 2004, Pearson Education Limited. pp. 2.
- [16] WERTHERA J, OGADAB T. *Sewage sludge combustion*. 1999. *Progress in Energy and Combustion Science*. Vol. 25, pp. 55–116.
- [17] GIUSEPPE M., SBRILLI A., GUERRIERO E., ROTATORI M. *Dioxins and furans formation in*

- pilot incineration tests of sewage sludge spiked with organic chlorine*. 2004. *Chemosphere*. Vol. 54, pp. 1337–1350.
- [18] TORRES P., PÉREZ A., ESCOBAR J.C., URIBE I. *Compostaje de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales*. 2007. *Eng. Agríc., Jaboticabal*, Vol. 27, pp. 267-275.
- [19] TARRASÓN D., OJEDA G., ORTIZ O., ALCAÑIZ JM., *Differences on nitrogen availability in a soil amended with fresh, composted and thermally-dried sewage sludge*. 2008. *Bioresource Technology*. Vol. 99, pp. 252–259.
- [20] FERNÁNDEZ J, PLAZA C., GARCIA-GIL J, POLO A. *Biochemical properties and barley yield in a semiarid Mediterranean soil amended with two kinds of sewage sludge*. 2009. *Applied Soil Ecology*. Vol. 42, pp. 18–24.
- [21] KIDD P., DOMÍNGUEZ-RODRÍGUEZ M., DÍEZ J., MONTERROSO C. *Bioavailability and plant accumulation of heavy metals and phosphorus in agricultural soils amended by long-term application of sewage sludge*. 2007. *Chemosphere*. Vol. 66, pp. 1458-1467.
- [22] U.S ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). *Land application*. 2000. under 832-F-00-064 Office of Water/ Office Science and Technology Sludge/ Risk Assessment Branch. Washington.
- [23] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC). NTC5167. *Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo*. Segunda Actualización. 2011. Bogotá. Colombia.
- [24] WENGA C-H., LIN D-F., CHIANG P-C. *Utilization of sludge as brick materials*. 2003. *Advances in Environmental Research*. Vol. 7, pp. 679–685.
- [25] BALASUBRAMANIAN J., SABUMON P., LAZAR J., ILANGOVARAN R. *Reuse of textile effluent treatment plant sludge in building materials*. 2006. *Waste Management*. Vol. 26, pp. 22–28.
- [26] CHIANG K-J., CHOUA P-H., HUANG C-R., CHIANG K-L, CHEESEMAN C. *Lightweight bricks manufactured from water treatment sludge and rice husks*. 2009. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 171, pp. 76–82.
- [27] CHOWDHURY S., *Biodigester effluent as protein supplement for indigenous (Bos indicus) growing bulls*. 1999. *Animal Production, Research Division, Bangladesh Livestock Research Institute, Savar, Dhaka 1341, Bangladesh*.
- [28] VILLAS-BOAS S., ESPOSITO E., MITCHELL D., *Microbial conversion of lignocellulosic residues for production of animal feeds Review*. 2002. *Animal Feed Science and Technology*. Vol. 98. pp. 1–12.
- [29] GARCÍA Y., GUADALUPE M., R. BOCOURT R., ALVELO N., NUÑEZ O., *Agave Fourcroydes, Una planta con potencialidades para obtener prebióticos*. *Revista Computadorizada de Producción Porcina 2010* [online] [cited; Abril 2 2011]: <http://www.iip.co.cu/rcpp/Rcpp%2017.1.pdf>.
- [30] U.S ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). *Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge*, in *EPA/625/R-92/013*. 2003.
- [31] TARAS, MICHAEL J., *Standard methods for the examination of water and wastewater*, American public health association: new york, n. y., 1971. 13th edition. pp.874.
- [32] VAN SOEST P. J., ROBERTSON B., and LEWIS B. A. *Methods for Dietary Fiber, Neutral Detergent Fiber, and Nonstarch Polysaccharides in Relation to Animal Nutrition*, Cornell University, Ithaca, NY, 1991, *J Dairy Sci* 743583-3597.
- [33] TORRES P., MADERA C., SILVA J., *Microbiological quality improvement of biosolids from domestic wastewater treatment plants*. 2009. *Revista EIA Print ISSN*, pp.1794-1237.
- [34] MARÍN A., AGUILAR H. *Evaluación de la efectividad del sistema de tratamiento de lodos sépticos de la Earth*. 2005. Universidad Earth. Costa Rica, pp. 25.
- [35] ZANGENEH A., JADID S., RAHIMI-KIAN A. *A hierarchical decision making model for the prioritization of distributed generation technologies: A case study for Iran*. 2009. *Energy Policy*. Vol. 37, pp. 5752–5763.
- [36] KAHRAMAN C., KAYA J., *A fuzzy multicriteria methodology for selection among energy alternatives*. 2010. *Expert Systems with Applications*. Vol. 37 (9), pp. 6270-6281.
- [37] U.S ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Standards of Performance for New Stationary Sources and Emission Guidelines for Existing Sources: Sewage Sludge Incineration Units; Final Rule*. 2011. Vol. 76. Part II. 40 CFR Part 60.
- [38] U.S ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Fact sheet in-vessel composting of*

- biosolids*.2000. Biosolids technology.EPA 832-F-00-061.
- [39] HARA K., MINO T. Environmental assessment of sewage sludge recycling options and treatment processes in Tokyo. 2008. Waste Management. Vol. 28, pp. 2645–2652.
- [40] U.S ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Compos-Free Bioreactor, treatment of acid rock drainage leviathan mine, California*.2006. Innovative technology evaluation report. EPA/540/R-06/009.
- [41] KAYA T., KAHRAMAN C. *Multicriteria renewable energy planning using an integrated fuzzy VIKOR & AHP methodology: The case of Istanbul*. 2010. Energy Vol.35. pp. 2517-2527.
- [42] ECKLER D.W., HARPER J. M. *Process and apparatus for recovering feed products from animal manure*.1975. *Patente de Estados Unidos* 3875319.
- [43] WERLE S., WILKA R. *review of methods for the thermal utilization of sewage sludge: The Polish perspective*. 2010. Renewable Energy. Vol. 35, pp. 1914–1919.
- [44] U.S ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY *Biosolids .Generation, Use, and Disposal in The United States*. 1999. EPA530-R-99-009.
- [45] CHIANG K-Y., CHOU P-H., HUA C-R, CHIEN K-L., CHEESEMAN C *.Lightweight bricks manufactured from water treatment sludge and rice husks* .2009. Journal of Hazardous Materials. Vol. 171, pp. 76–82.
- [46] SANCHEZ-MONEDEROA M.A., MONDINIB C., DE NOBILIC M., LEITAB .L, ROIG A. *Land application of biosolids. Soil response to different stabilization degree of the treated organic matter*. 2004. Waste Management. Vol. 24, pp. 325–332.