UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Análisis mediante el método emergético de la disposición de los lodos producidos en una planta de tratamiento de aguas residuales. (Aplicación a una PTAR en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá).

Natalia Andrea Cano Londoño

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas
Escuela de Geociencias y Medio ambiente
Medellín, Colombia
2012

Análisis mediante el método emergético de la disposición de los lodos producidos en una planta de tratamiento de aguas residuales. (Aplicación a una PTAR en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá).

Natalia Andrea Cano Londoño

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Medio Ambiente y Desarrollo

Director (a):
Darío Gallego Suarez
Codirector (a):
Héctor Iván Velásquez

Tratamiento de aguas
Bioprocesos y Flujos Reactivos (BIO-FRUN)

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de minas
Escuela de Geociencias y Medio ambiente
Medellín, Colombia
2012

“La fe consiste en creer lo que no vemos. La recompensa es ver lo que creemos”. A Dios que me envió al ángel que no me dejó desfallecer y por quién fue posible el desarrollo del presente, a mi familia el motor de mi vida y a las personas que creyeron en mí”.

Agradecimientos

Al tutor y director Darío Gallego Suárez, por su profesionalismo, asesoría e incansable apoyo incondicional para el desarrollo del presente.

Al codirector Héctor Iván Velásquez por sus aportes.

A Andrés Naranjo, estudiante de Ingeniería de Petróleos por su apoyo y asesoría a los procesos operacionales del método.

A Jessica Pérez y Elizabeth Rodríguez, integrantes del grupo de investigación “Termodinámica Aplicada y Energías Alternativas” de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, por la asesoría brindada en los procesos térmicos de biomasa

A la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales San Fernando de Empresas Publicas de Medellín por los datos suministrados

Resumen

Se corroboró que el método del análisis emergético permite comparar dos alternativas de disposición de los biosólidos integrando el aspecto energético, económico y ambiental. Por ~~lo~~ tanto, haciendo uso de dicho método como herramienta de valoración de la sostenibilidad para la toma de decisiones ambientales, y entendiendo la sostenibilidad de un proceso como aquel que alcanza un mayor beneficio económico con la mínima carga ambiental, se evaluó y comparó la actual disposición de los biosólidos: "uso de biosólidos como fertilizantes de suelos", con otra alternativa referenciada como adecuada "recuperación energética de los biosólidos mediante gasificación por lecho fluidizado", bajo dos escenarios así: los biosólidos considerados como recursos renovables y como recursos importados.

Resulta como mejor alternativa de acuerdo a los índices de sostenibilidad la recuperación energética de los biosólidos mediante gasificación por lecho fluidizado; es decir, esta alternativa es energéticamente aprovechable, económicamente viable y ambientalmente aceptable. No quiere decir que la actual disposición de los biosólidos sea inadecuada económica o ambientalmente, por el contrario, no genera estrés ambiental debido a que no se está obteniendo el rendimiento económico que ésta puede alcanzar.

El análisis de los índices emergéticos no sólo permiten evaluar la sostenibilidad en un proyecto, sino que además brindan la posibilidad de mejorar la práctica que se realiza, así, por ejemplo, para la disposición actual de los biosólidos, el índice de sostenibilidad permite decir que el postratamiento del biosólido antes su disposición hace que mejore la alternativa y se convierta en la más aceptable.

Palabras clave: Emergía, sostenibilidad, índices emergéticos, biosólidos, disposición, Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.

Abstract

It was confirmed that the emergy analysis method allows to compare two alternatives for disposal of biosolids integrating the energy aspect, economic and environmental. Therefore, by using the method of emergy analysis as a tool for sustainability assessment for environmental decision making, and understanding the sustainability of a process as the one that reaches greater economic benefit with minimal environmental load, was evaluated and compared the actual disposition of biosolids "using biosolids as Soil Fertilizer" with an a suitable alternative referenced in the literature as “energy recovery from Biosolids using fluidized bed gasification" were compared under two scenarios: biosolids considered as a renewable resource and as a imported resource.

Being the best alternative according to the sustainability indices “Energy Recovery from Biosolids Using Fluidized Bed Gasification", ie, this alternative is energetically profitable, economically viable and environmentally acceptable. Does not mean that the actual disposition of the biosolids is economically or environmentally inappropriate, on the contrary does not produce environmental stress because its economic performance it’s not being taken to the limit.

The analysis of emergetic indices not only allow us to evaluate the sustainability of a project, It also offer the possibility to improve the practice, so for example for the current disposition of biosolids the sustainability index allows us to say that a pretreatment of sewage sludge before its disposal makes the alternative improve and become the most acceptable

Keywords: Emergy, sustainability, emergy índice, sludge sewage, disposition, plant wastewater treatment.

Contenido

Pág.

Resumen ..... **IX**

Abstract ..... **X**

Lista de figuras ..... **XIV**

Lista de tablas ..... **XV**

Lista de símbolos y abreviaturas ..... **XVI**

Introducción **1**

1. Planteamiento del Problema **7**
1.1. Propuesta 14
1.2. Hipótesis 14
1.3. Objetivos 14
Objetivo general 14
Objetivos específicos 14

2. Marco Teórico **17**
2.1. Aguas residuales 18
2.1.1. Planta de tratamiento de aguas residuales 19
2.2. Características de producción de biosólidos en las PTAR de Colombia. 20
2.3. Alternativas de disposición de biosólidos 21
2.3.1. Aprovechamiento de los biosólidos para fines agrícolas 21
2.3.2. Aprovechamiento de los biosólidos en rellenos sanitarios 22
2.3.3. Disposición de los biosólidos en el mar 23
2.3.4. Aprovechamiento de los biosólidos mediante incineración 23
2.4. Método de la contabilidad emergética 25
2.4.1. Calidad de la energía y transformicidad: 25
2.4.2. Emergía 27
2.4.3. Álgebra emergética 28
2.4.4. Uso de transformicidades ya calculadas 29
2.4.5. Insumos del sistema: 30
2.4.6. Símbolos emergéticos. 30
2.4.7. Diagramas de flujo 31
2.4.8. Uso de colores recomendados 31
2.4.9. Índices emergéticos 31
2.5. Emergía y sostenibilidad 35

3. Estado del arte 37
3.1. Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales 38
3.2. Aprovechamiento de biosólidos para uso agrícola 43
3.3. Tratamientos térmicos como método de recuperación de la energía de los biosólidos 46

4. Metodología 49
4.1. Evaluación de la aplicación del método del análisis emergético a una PTAR mediante revisión bibliográfica. 49
4.2. Desarrollo de la metodología emergética 51
4.2.1. Desarrollo de la aplicación de la metodología emergética al aprovechamiento de los biosólidos generados en una PTAR 51
4.3. Comparación de las dos alternativas de aprovechamiento 57

5. Resultados y análisis 59
5.1. Evaluación emergética de una PTAR 59
5.2. Análisis de la sostenibilidad del sistema de aprovechamiento de los biosólidos comparando dos alternativas de aprovechamiento 72
5.2.1. Alternativa A: Aprovechamiento de biosólidos como fertilizantes para suelos silvopastoriles 73
5.2.2. Selección de una alternativa de aprovechamiento de los biosólidos para comparar con la alternativa de de utilización en suelos silvopastoriles 75
5.2.3. Alternativa 2: Aprovechamiento del biosólido para la recuperación de energía mediante gasificación por lecho fluidizado 77
5.3. Aplicación de la metodología emergética a las dos alternativas 83
5.4. Comparación de las dos alternativas para los cuatro escenarios evaluados 102

Conclusiones y recomendaciones 109
Conclusiones 109
Recomendaciones 111

Bibliografía 113

2.1. Anexo: Conceptos del análisis emergético 125
2.1.1. Características del método emergético 125
2.1.2. Ventajas y Desventajas del Método de La Contabilidad Emergética 126

2.2. Anexo: diferencias de la emergía con otros métodos 129
2.2.1. Análisis del Ciclo de Vida 129
2.2.2. Análisis Exergético 130
2.2.3 ¿Emergía como función de la exergía o energía? 132

5.1. Anexo: Cálculos de la evaluación energética del pasto kikuyo abonado con lodo (hectarea por año). Biosólido como F. 137

5.2. Anexo: Calculo de la evaluación energética del pasto kikuyo abonado con lodo (hectárea por año). Biosólido como R. 141

5.3. Anexo: Cálculo de la evaluación energética del proceso de generación de electricidad mediante gasificación del biosólido por lecho fluidizado (hectárea por año). Biosólido como F 145

5.4. Anexo: Cálculo de la evaluación energética del proceso de generación de electricidad mediante gasificación del biosólido por lecho fluidizado (hectárea por año). Biosólido como R. 149

5.5. Anexo: Cálculos de la simulación de la acumulación de metales pesados en suelos fertilizados con biosólidos. 153

5.6. Anexo: Balances de materia y energía. 154
Balance de materia y energía en el secador 156
Balance de materia y energía en el gasificador 157
Balance de Materia y Energía en el Limpiador 158
Balance de Materia y Energía en la turbina 159

Lista de figuras

Pág.

Figura 2.1 Rutas de disposición de lodos en la Unión Europea hasta el año 2005. 24
Figura 2.2 Cambios en los modos de utilización de los biosólidos en la Unión Europea . 25
Figura 2.3 Diagrama energético de la jerarquía en la transformación de la energía. 26
Figura 4.1 Interacción de todas las entradas (R, N, F), generan una salida ("output") del sistema Y. 52
Figura 5.1 Proceso de depuración de las aguas residuales en la PTAR seleccionada 59
Figura 5.2 Estructura y flujos de un sistema de tratamiento de aguas residuales 61
Figura 5.3 Diagrama emergético de un sistema de tratamiento de aguas residuales. 62
Figura 5.4 Diagrama emergético general del proceso del tratamiento de aguas residuales 63
Figura 5.5. Diagrama emergético de la PTAR 65
Figura 5.6 Diagrama emergético general del proceso del tratamiento de aguas residuales 72
Figura 5.7 Aplicación de los biosólidos a suelos silvopastriles 74
Figura 5.8 Gasificador de lecho fluidizado 79
Figura 5.9 Diagrama del proceso de gasificación de los biosólidos por lecho fluidizado . 82
Figura 5.10 Delimitación de los sistemas de estudio 84
Figura 5.11 Diagrama emergético del uso de los biosólidos como fertilizante de suelos . 87
Figura 5.12 Diagrama emergético de la recuperación de energía de los biosólidos mediante gasificación por lecho fluidizado 88
Figura 5.13 Diseño de un humedal a escala de laboratorio 89
Figura 5.14 Simulación de la acumulación de metales pesados en suelos fertilizados con biosólidos 92
Figura 5.15 Comparación emergética del sistema agrícola considerando los biosólidos como R y F 103
Figura 5.16 Comparación emergética del sistema de térmico considerando los biosólidos como R y F 104
Figura 5.17 Comparación emergética del sistema agrícola y térmico considerando los biosólidos como F 104
Figura 5.18. Comparación emergética del sistema agrícola y térmico considerando los biosólidos como R 105
Figura 5.19 Comparación emergética del sistema agrícola y térmico considerando los biosólidos como F y R 106
Figura 2.2.1. Modelo simplificado de la producción de trigo. 134

Lista de tablas

Pág.

Tabla 2.1 Características típicas de aguas residuales domesticas en mg/l..... 18
Tabla 2.2 Tipos de tratamiento del agua y de lodos en las principales PTAR de Colombia 19
Tabla 2.3 Características físicas de los biosólidos de las principales PTAR de Colombia 20
Tabla 2.4 Contenido de nutrientes en los biosólidos residuales municipales en base seca 21
Tabla 2.5 Valores límites de metales pesados estipulados por la Directiva de Agricultura. 22
Tabla 4.1 Componentes básicos de la síntesis emergética 54
Tabla 5.1 Análisis elemental de los biosólidos..... 60
Tabla 5.2 Insumos del proceso de tratamiento de aguas residuales..... 67
Tabla 5.3 Índices emergéticos del proceso de tratamiento de aguas residuales..... 68
Tabla 5.4 Resultados del proceso de tratamiento de las aguas residuales de la PTAR.. 70
Tabla 5.5 Concentración de metales pesados en el suelo, biosólido y límites de la EPA 91
Tabla 5.6 Evaluación energética del pasto kikuyo abonado con lodo (hectárea por año). Biosólido como F..... 95
Tabla 5.7 Evaluación energética del pasto kikuyo abonado con lodo (hectárea por año). Biosólido como R 96
Tabla 5.8 Evaluación energética del proceso de generación de electricidad mediante gasificación del biosólido por lecho fluidizado (hectárea por año). Biosólido como F 97
Tabla 5.9 Evaluación energética del proceso de generación de electricidad mediante gasificación del biosólido por lecho fluidizado (hectárea por año). Biosólido como R 98
Tabla 5.10 Índices emergéticos de las dos alternativas evaluadas..... 99
Tabla 2.1.1. Ventajas y desventajas de la aplicación del método del análisis emergético 127

Lista de símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI
DBO_5	Demanda Biológica de Oxígeno al quinto día	mg O_2/L
DQO	Demanda Química de Oxígeno	mg O_2/L
E_m	Emergía	SeJ
E_{xi}	Energía	J
Q	Caudal	m^3/año

Abreviaturas

Abreviatura	Término
PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
R	Recursos Renovables
N	Recursos no Renovables
F	Recursos Importados
ELR	Índice de Carga Ambiental
EYR	Índice de Rendimiento Emergético
ESI	Índice de Sostenibilidad
EIR	Índice de Inversión emergética
SEC	Costo Emergético del Suelo
EER	Índice de la Tasa de Cambio Emergético
ACV	Análisis de Ciclo de Vida
EPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (Environmental Protection Agency)
EPM	Empresas Públicas de Medellín
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
LCA	Método de Evaluación del Ciclo de Vida
EMR	Emergy Money Ratio
PIB	Producto Interno Bruto
W	Residuos (agua residual)

Abreviatura	Término
SST	Sólidos Suspendidos Totales
ER	Ratio Equivalente
H/C	Relación moles de hidrogeno y carbono

Introducción

La gestión del tratamiento de las aguas residuales queda inconclusa, si no se le acoplan a las descargas de sus productos alternativas de aprovechamiento de manera sostenible, entendiendo la sostenibilidad de un proceso como aquel que alcanza un mayor beneficio económico con la mínima carga ambiental, por lo que se debe emplear una metodología de valoración de la sostenibilidad para el aprovechamiento de éstos, propuesta por autores como (Agostinho, Diniz, Siche, & Ortega, 2008; Cherubini, Bargigli, & Ulgiati, 2009; Cohen, Brown, & Shepherd, 2006; Odum & Odum, 2003) entre los más representativos y valorada en otros países en diferentes aplicaciones que comprometen la sostenibilidad (Geber & Bjo, 2002; Liu & Chen, 2007; Siracusa & La Rosa, 2006; Zhou, Jiang, Chen, & Chen, 2009; Zhou, Zhang, & Cai, 2010) de una manera soportable y equitativa a nivel económico, energético y ambiental.

A pesar que el análisis emergético representa una herramienta muy poderosa parece que en nuestro caso no ha sido implementada para valorar procesos y productos que comprometen la sostenibilidad; no se encontraron evidencias que en nuestro país haya sido utilizada a nivel académico, político y/o económico, pese a que en otros países su aplicación se considere prioritaria en la etapa de diseño de cualquier proyecto de gran envergadura, pues permite evaluar la mejor manera de mitigar los impactos ambientales anticipándose a los mismos y evitando que estos ocurran. Éste es un método analítico que integra economía, ecología y termodinámica, y permite evaluar de manera integral los impactos económicos, sociales y ambientales de forma teórica, siendo considerado en la actualidad como uno de los pilares más fuertes en áreas afines a la economía ecológica y a la ingeniería ambiental. De acá la idea de contribuir a que la teoría del análisis emergético tenga una rápida difusión y divulgación a nivel nacional para que su uso se implemente en proyectos de gran envergadura con miras al desarrollo sostenible, dado que permite comparar dos o más alternativas integrando los aspectos energético, económico y ambiental; y a la vez poder aportar elementos de su potencial aplicación para que sean analizados por los grupos de investigación que en la Facultad de Minas lo proyectan para sus líneas de trabajo.

En esta investigación se evaluará la aplicación del método del análisis emergético como alternativa de valoración de la sostenibilidad (no antes aplicada a la evaluación del aprovechamiento de uno de los productos de una PTAR en la ciudad de Medellín, ni otra ciudad de Colombia) del actual aprovechamiento de los biosólidos generados en una PTAR en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, teniendo como referencia otra opción

de aprovechamiento reportada en la bibliografía como la adecuada nivel ambiental, energético y económico; permitiendo de esta manera corroborar si el método del análisis emergético se puede usar para estos proyectos y si la actual alternativa de aprovechamiento de los biosólidos en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá es la mejor comparada con otra alternativa de aprovechamiento referenciada en la bibliografía como la adecuada, bajo estos tres parámetros. Se tomó como hipótesis que el método del análisis emergético permite comparar dos alternativas de aprovechamiento integrando el aspecto energético, económico y ambiental.

Inicialmente se evalúa la aplicación del método del análisis emergético a una PTAR mediante revisión bibliográfica de estudios anteriores, con la finalidad de analizar la sostenibilidad de un proceso de tratamiento de aguas residuales haciendo uso de los índices de sostenibilidad emergéticos. Esta valoración de la aplicación del análisis emergético a la PTAR permite la extensión de la aplicación del método para la valoración del aprovechamiento de los biosólidos que se generan en ésta.

El actual aprovechamiento de los biosólidos (clase B) como fertilizantes de suelos se compara con la recuperación de energía de los mismos mediante gasificación de lecho fluidizado. Se muestra cómo seleccionar la alternativa más adecuada en términos de sostenibilidad; es decir, aquella que sea económicamente rentable, energéticamente aprovechable y ambientalmente aceptable. Para la investigación se apropió la metodología del análisis emergético realizada en estudios similares a sistemas agrícolas y térmicos; es de resaltar que hasta la fecha no se ha realizado la aplicación de esta metodología a las dos alternativas objeto de estudio, ni tampoco se ha valorado emergéticamente el aprovechamiento de los biosólidos como un recurso potencial para ser explotado, siendo la presente investigación pionera en desarrollo y aplicación del análisis emergético en Colombia; aunque entidades académicas ya han tenido interés en esta metodología pero en otras aplicaciones, presentando acercamientos de acuerdo a la recolección de información que se hizo.

Un factor determinante en el desarrollo de la investigación para alcanzar el objetivo propuesto, fue la apropiación del concepto de recurso renovable y no renovable, ya que la sostenibilidad de un proceso depende principalmente de los tipos de recursos o de energías que intervienen en los mismos; siendo sostenible la dependencia de estos de los recursos renovables y no por los que no son renovables. La investigación es una oportunidad para valorar el concepto de renovabilidad y las características de fuentes que no se agotan con su utilización, debido a que se regeneran a una tasa mayor que la tasa de utilización o consumo, lo que hace que los biosólidos puedan ser considerados fuentes renovables, pero dejar de serlo si su tasa de utilización es tan alta que evita su renovación (mayor demanda que oferta) pasando de ser un recurso renovable a importado. Se muestra como considerar los biosólidos como una fuente renovable o importada es sumamente decisivo en el resultado del análisis emergético; la decisión llega a ser tan impactante en el resultado que ambas alternativas pasan de ser grandes generadores de impactos ambientales cuando éste se toma como recurso importado, a

ser muy amigables con el ambiente (impacto ambiental muy bajo) cuando es tomado como recurso renovable. Esta sostenibilidad es arrojada por los índices emergéticos que son los que permiten relacionar la influencia del tipo de recursos (renovables e importados) sobre la decisión de "sostenibilidad" de las alternativas evaluadas.

En la investigación las dos alternativas de aprovechamiento de los biosólidos de clase B se evaluaron bajo cuatro escenarios; haciendo el biosólido renovable e importado para cada una de las alternativas de aprovechamiento. De esta manera la mejor alternativa, para el aprovechamiento sostenible de los biosólidos fue la recuperación energética mediante gasificación por lecho fluidizado. Sin embargo, el análisis de los resultados muestra cómo se puede aprovechar la infraestructura actual de aprovechamiento para que la alternativa de llevarla al campo pueda ser aceptable, ya que los índices emergéticos brindan la posibilidad de mejorar la actual práctica de aprovechamiento de los biosólidos mediante un posible pretratamiento antes de su aprovechamiento en el suelo.

De la misma manera se corroboró la hipótesis planteada al inicio de este estudio "El método del análisis emergético permite comparar dos alternativas de aprovechamiento integrando el aspecto energético, económico y ambiental".

El documento que se presenta como informe de la investigación se encuentra dividido en las siguientes secciones[1]:

a) En la justificación se expresa de manera rápida la problemática del trabajo y la propuesta como la solución a ella mediante la concepción del objetivo general y especifico

b) El marco teórico presenta todos los conceptos necesarios para abordar la aplicación del método del análisis emergético a los dos sistemas propuestos, y al análisis de la aplicación del método a un sistema de tratamiento de aguas residuales: proceso de generación de los biosólidos, alternativas de aprovechamiento de los mismos, conceptos básicos del análisis emergético. Por términos de practicidad (extensión del documento) este segundo capítulo se dividió en el Anexo 2.1 que presenta otros conceptos básicos del método de la contabilidad emergética no tratados dentro del capítulo en sí (conceptos, objetivos, características y ventajas y desventajas del método), y el anexo 2.2 presenta las diferencias del método del análisis emergético respecto a otros métodos de valoración de impactos ambientales y sostenibilidad (análisis del ciclo

[1] Los diagramas y tablas emergéticas se elaboraron en inglés dado que la terminología técnica del método impide la traducción correcta y literal de la misma, por lo tanto se evita en incurrir en errores de traducción.

de vida, análisis exergético), así mismo se describe de manera exhaustiva la razón para usar las transformicidades ya calculadas de estudios anteriores.

c) En el estado del arte se muestran los estudios que hasta la fecha se han realizado de la aplicación del análisis emergético a sistemas de tratamiento de aguas residuales, agrícolas y térmicos; pero ninguno de estos sistemas hacen uso de los biosólidos reflejándose la no referencia de investigaciones en los que hagan análisis emergéticos del aprovechamiento de biosólidos

d) En la metodología se propone un proceso descriptivo, que sirve de guía no sólo para evaluar y comparar emergéticamente dos alternativas de aprovechamiento final de los biosólidos estabilizados producidos en una PTAR, sino también para aplicarla en otros sistemas de interés

e) En los resultados y análisis, se aplica la metodología anteriormente descrita con base a los objetivos específicos para lograr alcanzar el objetivo general de la investigación y corrobora la hipótesis propuesta, presentándose de manera conjunta los resultados y sus respectivos análisis y discusiones Este capítulo se complementa con los anexos 5.1 - 5.5, donde se encuentran de manera muy detallada todos los cálculos emergéticos necesarios para llevar a cabo el objetivo propuesto.

f) Por último se tiene el capítulo de conclusiones y recomendaciones de todo el trabajo realizado.

Los resultados directos que se alcanzaron con el desarrollo de los objetivos específicos del proyecto son:

- Dar a conocer la metodología y las ventajas de la aplicabilidad del método emergético para la toma de decisiones ambientales, con el fin que sea adoptado para analizar la viabilidad de proyectos a diferentes escalas.
- Una guía para evaluar otras alternativas de aprovechamiento de los biosólidos producidos en una PTAR o para proponer otras alternativas adecuadas de aprovechamiento que no han sido implementadas.
- Proponer un método para buscar soluciones prácticas para el aprovechamiento adecuado de los biosólidos producidos en una PTAR en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, que sea viable o que sea fuente posible de futuras investigaciones. Brinda además la posibilidad de evaluar acciones para mejorar o corregir las practicas actuales de aprovechamiento para que sean más sostenibles, mediante la valoración de los índices emergéticos
- El proyecto puede ser ofrecido a entidades comprometidas (aquellas asociadas directamente con la problemática), reguladoras o aquellas que ejercen otro tipo de control en el ámbito de la gestión sostenible de los biosólidos generados durante el tratamiento de las aguas residuales. Así mismo, puede ser ofrecido al sector

académico para incluirlo en los procesos de formación a profesionales como una herramienta para la concepción de proyectos de desarrollo.

Con el desarrollo de esta investigación titulada “Análisis mediante el método emergético de la disposición de los lodos producidos en una planta de tratamiento de aguas residuales. (Aplicación a una PTAR en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá) para optar el titulo de Magister en Medio Ambiente y Desarrollo, se evidencia que se cumplió a cabalidad con el objetivo propuesto en dicho programa: “Formar investigadores con las habilidades y actitudes necesarias para la ejecución de investigaciones interdisciplinarias dirigidas a la solución de problemas relativos al desarrollo sostenible, que fomente la investigación en el área de la gestión ambiental”.

1. Planteamiento del Problema

No es desconocido que la alternativa de tratamiento de las aguas residuales en la ciudad de Medellín es por medio de una PTAR aerobia seguida de la estabilización anaerobia de los biosólidos, debido a que en la ciudad estas aguas no se pueden tratar por medio de lagunas de oxidación, dadas las condiciones y limitaciones topográficas del terreno.

Estas aguas residuales combinadas contienen un gran contenido de materia orgánica y por tanto energético, lo que las hace ser un potencial contaminante del ambiente si estos niveles no se reducen antes de ser vertidos al río receptor por las siguientes razones: en primer lugar, la descomposición biológica de los compuestos orgánicos de las aguas sin tratar consumen la cantidad de oxígeno disponible de las aguas receptoras para la vida acuática, al igual que produce gases mal olientes; en segundo, lugar los microorganismos patógenos son perjudiciales para la salud humana; en tercer lugar, la presencia de compuestos tóxicos como metales pesados, pueden ser peligrosos para plantas y animales, y finalmente, la presencia de fósforo y nitrógeno pueden conducir a un crecimiento incontrolado de plantas acuáticas (Chobanoglous, 1987). Por consiguiente, un tratamiento por lodos activados permite reducir el contenido energético y minimiza al máximo la carga orgánica (DQO y DBO) y, en parte, nitrógeno y fósforo de las mismas; así como la destrucción de microorganismos patógenos.

Simultáneamente, durante el proceso de depuración de las aguas residuales, se generan significativos volúmenes de biosólidos con mayor concentración de energía y carga orgánica altamente putrescibles; en el caso particular de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales San Fernando (propiedad de Empresas Públicas de Medellín E.S.P), se producen unas 70 ton/día de biosólidos, como producto del tratamiento de 1.100 l/s de aguas servidas que deben ser evacuados permanentemente (Vélez, 2007).

Para complementar y facilitar el tratamiento, los biosólidos generados se someten a procesos de espesamiento, digestión y deshidratación, adquiriendo así la categoría de **biosólidos clase B** (Chobanoglous, 1987), mediante un proceso de estabilización o mineralización de la materia orgánica para poder reducir esos niveles, y así cumplir con la reglamentación de la EPA; reducción del 30 a 40% del contenido energético[2].

---

[2] **Véase.** Environmental Protection Agency. Federal register. title 40—protection of environment:part 503--standards for the use or disposal of sewage sludge. United States Environmental Protection Agency, 2002.

A pesar que los lodos estabilizados o biosólidos son considerados residuos asimilables a urbanos y, aunque no pueden clasificarse como tóxicos ni peligrosos, si poseen contaminantes que obligan a su tratamiento (todavía tienen niveles de energía y materia orgánica significativos); acá hay que tener en cuenta el término “contaminante” definido por la EPA [2] en su legislación sobre la utilización de lodos, como un organismo patógeno o como una sustancia orgánica o inorgánica o la combinación de ambas que al tener contacto con un organismo por vía dérmica, ingestión o inhalación, directamente del medio ambiente o a través de la cadena alimenticia, pueda causar la muerte, inducir cáncer, producir enfermedades, alteración del comportamiento, mutaciones genéticas, malformaciones fisiológicas y/o físicas o daños teratogénicos; esto hace a los biosólidos potencialmente peligrosos en caso de no darles una adecuada disposición final, contribuyendo de manera importante no sólo a la contaminación del ambiente, afectando suelo, agua y aire (Conesa, Marcilla, Moral, Moreno-Caselles, & Perez-Espinosa, 1998), además son potenciales generadores de una problemática energética y económica.

Algunos de los muchos impactos al entorno en donde se depositan estos residuos son: contaminación de aguas superficiales por escorrentía, de aguas subterráneas y de acuíferos por lixiviación; generación de olores desagradables, emisiones de metano (CH_4)(Romdhana, Hamasaiid, Ladevie, & Lecomte, 2009) y riesgos asociados a la insalubridad. Sin embargo, no se pueden ignorar las características y propiedades de estos biosólidos, que los hacen ocupar un lugar importante como alternativa de materia prima para darles aprovechamiento energético y económico como disposición ambientalmente amigable.

La cantidad de biosólidos producidos actualmente en la ciudad de Medellín incluyendo el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, son aproximadamente de 663.433.200L/. Se tiene en cuenta que la producción de los biosólidos en las PTARs se encuentra en acelerado crecimiento, debido a que éstos están inducidos por el aumento en el porcentaje de hogares conectados a centrales de tratamiento de aguas residuales, al igual que cada vez crecen más las restricciones de los límites de la carga orgánica que son descargadas en los efluentes a los cuerpos receptores (Werther & Ogada, 1999). No puede ser esta problemática ajena a la formación profesional en áreas de la gestión y el ambiente, si se proyecta hacia el futuro la cantidad de biosólidos producidos y el efecto de su acumulación (no controlada), en la hipotética situación de no darles un adecuado aprovechamiento o, en el peor de los casos que no se les de ningún uso, si se cuenta con una tasa anual de crecimiento poblacional de 1,58% (DANE, 2007); es decir, cifras de esta magnitud imponen la búsqueda de soluciones sostenibles.

Smith, *et al*; (2009) enfatiza en la necesidad de otorgar un valor añadido a este tipo de biosólidos, para poderles dar una salida racional desde el punto de vista energético,

económico y ambiental, ya que se ha venido teniendo una disminución o pérdida en las rutas tradicionales (vertimiento en rellenos sanitarios, en el mar, incineración) para la eliminación de estos por razones de sostenibilidad, creándose así una gran demanda en buscar alternativas eficaces y favorables con el medio ambiente de mucho mayor rendimiento económico (Smith, Fowler, Pullket, & Graham, 2009), que conlleva a la motivación de tomar los biosólidos estabilizados como un recurso importado dentro del desarrollo de la metodología emergética, como se evidenciará a lo largo del documento.

Por ello se han venido implementando diversas alternativas para la utilización y aprovechamiento de los biosólidos, pero la falencia de estos métodos tradicionales (producción de energía, materiales de construcción, restauración de espacios naturales, usos agrícolas) (Fytili & Zabaniotou, 2008); y que actualmente se aplican en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, puede ser que sólo se analiza el aprovechamiento energético, económico y ambiental de forma individual; es decir, puede ser considerada "aceptada" una alternativa de aprovechamiento si ésta es "técnicamente correcta" y "económicamente viable", sin importar si no lo es desde el punto energético a o ambiental, como se trata posteriormente:

En cuanto al aprovechamiento energético de los biosólidos, estos presentan un contenido energético significativo (el valor calorífico de los biosólidos procedentes de la depuración de aguas residuales, es similar a la del carbono (Romdhana *et al*., 2009)*,* lo que les posibilita ser utilizados como combustible alternativo, pues conlleva a un ahorro neto en la emisión de dióxido de carbono (CO_2), dado que sus emisiones no contabilizan por ser biomasa, al contrario si estos se depositan en vertederos, ya que sus emisiones contabilizan a través de la fermentación.

El contenido energético de los biosólidos les otorga un potencial para ser sometidos a procesos térmicos como: pirólisis, gasificación, combustión y oxidación húmeda (Fytili & Zabaniotou, 2008). El proceso de gasificación es una tendencia en el ámbito de la gestión de biosólidos para transformarlos en energía utilizable y de esta manera reducir la problemática ambiental, posicionándose como una de las tecnologías más prometedoras (Aznar, Caballero, Gil, Martin, & Corella, 1998; Mathieu & Dubuisson, 2002). Este proceso implica la eliminación, degradación térmica u oxidación de la materia orgánica a dióxido de carbono, agua y nitrógeno, convirtiéndolo a gas combustible limpio y dejando sólo el componente de la ceniza para la eliminación final en rellenos sanitarios. La principal ventaja de este método en particular, respecto a la pirolisis, combustión y oxidación húmeda subyace en el hecho que generalmente el proceso es energéticamente autosostenible, por lo que no es necesario la inversión de energía.

La incineración de los biosólidos es otro de los procesos térmicos utilizados por razones de rentabilidad. Comparándolo con los altos costos de transporte asociados a la aplicación en tierra, la incineración resulta económica; pues a pesar de que también requiere de transporte, los costos son soportados total o parcialmente por el producto final; algunos argumentan que este método es seguro y que no afecta el medio ambiente

ya que el producto final de la incineración lo constituye una ceniza estéril, exenta de patógenos e inodora, según Gervin, (2004). La limitante de este tratamiento es que la concentración de los gases que se pueden emitir a la atmósfera debe de cumplir con la Reglamentación Ambiental Europea; debido a que la ley de aire limpio rige la calidad y cantidad de las emisiones que se liberan al ambiente producto de la incineración; además, esta práctica también está regida por la ley 40 CFR parte 503 que atañe a la aplicación a la tierra[3]. Esto significa que la incineración sería la más reglamentada de todas las opciones de utilización de los biosólidos, lo que la hace más amigable con el ambiente.

Otra alternativa de aprovechamiento térmico de los biosólidos es la generación de biogás producido a través del proceso de digestión anaerobia de los mismos, que suministra cuatro alternativas básicas de utilización; la producción de calor y vapor de agua, la generación de electricidad / co-generación, el uso como combustible para vehículos, y (posiblemente) la producción de productos químicos. El poder calorífico de este biogás está determinado por el contenido de metano CH_4 (aproximadamente 55 a 65 %), lo que le confiere una combustión limpia dado que reduce al máximo los productos contaminantes, y porque el dióxido de carbono (CO_2) que se genera (30 al 40 %), tampoco se considera como un contaminante (Appels, Baeyens, Degrève, & Dewil, 2008). Además, cuando el biogás es dedicado a la producción de energía térmica se traduce en un ahorro de combustible convencional.

Las desventajas de emplear los procesos térmicos para los biosolidos, reside en el hecho que se requiere no sólo de un exceso de energía (excepto gasificación) para alcanzar altas temperaturas, sino también de equipos sofisticados, aparte de la emisión de una cantidad significativa de compuestos contaminantes a la atmósfera como dioxinas y furanos (Fytili & Zabaniotou, 2008).

Utilizar biosólidos estabilizados como aditivos para material de construcción constituye otra alternativa para su destino final, ya que la inertización o mineralización de los mismos en matrices cerámicas mediante incineración permite obtener materiales aptos para la construcción como ladrillos y cemento, o como mejoradores de ciertas propiedades de dichos materiales (Käántee, Zevenhoven, Backman, & Hupa, 2004).

Además, la alta demanda de estos materiales de construcción requiere de grandes cantidades de materia prima para su producción, por lo que puede absorber prácticamente la totalidad de los biosólidos generados por las aguas residuales de un país, lo que convierte en ser una fuente **no renovable** para esta aplicación, debido a que su tasa de consumo posiblemente es más alta que su tasa de producción.

[3] **Véase** ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. FEDERAL REGISTER. Title 40—Protection of Environment:part 503--Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge.United States : Environmental Protection Agency, 2002.

Al igual que en los procesos térmicos, la restricción más grande de utilizar los biosólidos como aditivos para materiales de construcción reside en la emisión de sustancias nocivas y metales pesados; en algunos casos este proceso modifica física y/o químicamente los metales, convirtiéndolos de su forma elemental a óxidos metálicos o complejos organometálicos, o del estado sólido a vapor o finas partículas; es así como estos cambios pueden resultar en un incremento de la toxicidad de los mismos.

Los biósolidos pueden presentar propiedades agronómicas útiles y por este motivo resulta justificado fomentar su valorización en la agricultura; no sólo la presencia de nitrógeno y fósforo (Metcalf & Eddy, 1991), sino de otros elementos que son necesarios para el crecimiento de las plantas, los hace ser excelentes candidatos para disponerlos como fertilizantes en conjunto, porque el suelo por su capacidad depuradora puede ser un buen receptor de los mismos. Los tratamientos más aplicados para la valorización de los lodos en la agricultura son la deshidratación, el secado térmico y el compostaje. Pero autores como Liu, Kong, Li, & Zeng (2009) y (Gu & Wong (2007) consideran que estos poseen relativamente un contenido bajo de nutrientes comparándolo con un fertilizante convencional completo, además su aplicación debe llevarse a cabo en el marco legislativo vigente con el objetivo de evitar efectos perjudiciales en los suelos, la vegetación, los animales y el ser humano.

Como resultado de una década de evaluación sobre la disposición de los biosólidos, la EPA concluyó que reciclar éstos a la tierra es una solución ambientalmente responsable, cuando estos cumplen los estándares y se usan de acuerdo a la normativa[4] Por su parte, Alliende (2006) destaca que el contexto legislativo reseñado no significa que el esparcimiento de los biosólidos sea riesgoso para el medio ambiente o para la salud humana. Él sostiene que los numerosos estudios realizados en Europa han verificado ampliamente la inocuidad de esta práctica y la eficacia agronómica de los biosólidos. Sin embargo, como lo menciona Cohen *et al*. (2006) los tiempos están cambiando y paulatinamente están surgiendo más restricciones sobre todas las vías de eliminación de los biosólidos. Es así como la legislación sobre la disposición de los biosólidos es cada vez más restrictiva, y sumada la preocupación por los posibles riesgos medioambientales y sanitarios que conlleva el esparcir los biosólidos en tierras de cultivo, hace más agudo el problema del uso y aprovechamiento de los mismos.

Una desventaja de utilizar los lodos para esta aplicación, es que éstos pueden contener al mismo tiempo otros elementos, como metales pesados, que pueden ser nocivos cuando entran a la cadena alimentaría humana; por esta razón, previamente al uso como

[4] **Véase** ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. FEDERAL REGISTER. Title 40—Protection of Environment:part 503--Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge.United States : Environmental Protection Agency, 2002.

fertilizantes se deben pretratar para minimizar al máximo estos compuestos, lo que conlleva a la generación de otros costos.
Simultáneamente se tienen que evaluar los obstáculos técnicos y sociales; en cuanto a lo técnico, se debe considerar que los biosólidos se producen durante todo el año y la aplicación en la tierra se realizan una o dos veces al año, lo que va a generar un almacenamiento o acumulación de estos; es decir, la demanda de los biosólidos para esta práctica puede llegar a ser mucho menor que su oferta. En lo social cabe resaltar que el reciclado de lodos en la agricultura es un agujero negro, ya que no hay una confianza de calidad ni aceptación de utilización por parte de los agricultores, compradores e industria alimentaria (Hudson & Lowe, 1996). Bien el suelo tiene la capacidad de degradar algunos de sus compuestos y reciclar nutrientes a través de las plantas, dicha capacidad tiene un límite, el cual una vez sobrepasada puede llegar a la degradación y contaminación del suelo, de las aguas superficiales y subterráneas, y a la captación de metales pesados por las plantas que sustenta, incorporando de esta manera elementos contaminantes a la cadena trófica, potencialmente perjudicial a la salud humana y animal.

En la recuperación o restauración de suelos, los biosólidos estabilizados son también útiles cuando se presentan incendios forestales o degradación de los mismos por prácticas agrícolas y humanas, la aplicación de biosólidos en este tipo de zonas favorece el aumento de materia orgánica, funcionando como una clase de enmienda de tipo orgánico que favorece el emplazamiento alterado, al igual que se evita la erosión hídrica gracias a las mejoras físicas (capacidad de adsorción, erodabilidad, compactación, entre otras); pero trae consigo las mimas desventajas que presenta la alternativa de utilizarlos para uso agrícola (Fytili & Zabaniotou, 2008).

Por último se tiene la disposición de los lodos en rellenos sanitarios, en lo que no se entrará en detalle debido a que esta práctica ha ido disminuyendo sustancialmente por la creciente restricción de la normativa legislativa para esta disposición, por los elevados costos de multas y por las múltiples desventajas y efectos perjudícales que trae consigo al medio ambiente y por ende a la cadena trófica (Fytili & Zabaniotou, 2008).

De lo anterior se evidencia que utilizar los biosólidos como fertilizantes o restauradores de suelos para hacer uso de su materia orgánica y nutrientes puede ser una amenaza a la salud humana, animal y al medio receptor por la acumulación de sustancias indeseables (patógenos, metales pesados, contaminantes orgánicos); y si el uso es como fuente de energía para recuperar su valor calorífico o para producir materiales de construcción (materiales cerámicos, cemento, ladrillos), se requiere de procesos de pretratamiento que conllevan la inversión de un enorme capital y a la contaminación del ambiente a causa de la emisión de sustancias peligrosas (dioxinas, furanos, metales pesados, mercurio), formándose de esta manera una problemática ya sea ambiental, energética o económica.

Tomando como base el concepto de sostenibilidad como “la compatibilidad entre el aspecto energético, económico (máximo rendimiento) y ambiental” (Redclif, 1987), estos métodos que se han venido empleando durante años para la disposición de los biosólidos, deben estar enfocados en ser una alternativa de aprovechamiento que brinden un rendimiento energético y económico con una carga ambiental aceptable; es decir, a estos biosólidos estabilizados se les debe dar una disposición que armonice lo económico con lo energético y ambiental; debido a que estos tres factores no se pueden evaluar de manera independiente, sino que se tienen que analizar de manera conjunta e interrelacionada para darle un aprovechamiento de manera sostenible, con el fin de no tener las discrepancias anteriormente expuestas.

Se crea entonces la necesidad de establecer entre las metodologías de valoración disponibles, una que permita evaluar de manera sostenible el modo de la actual disposición de los biosólidos que son producidos en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá para corroborar su manejo y complementar el proceso de tratamiento de las aguas residuales; es decir, para la gestión sostenible de los biosólidos, se debe emplear una metodología de valoración del aprovechamiento de estos, de una manera soportable y equitativa a nivel económico, energético y ambiental. Entendiendo como gestión al conjunto de operaciones encaminadas con el fin de proporcionar a los residuos producidos el destino global más adecuado desde el punto de vista medioambiental, de acuerdo con sus características, volumen, procedencia, costo de tratamiento, posibilidades de recuperación, comercialización y normas jurídicas (Vélez, 2007).

Hace varios años se ha venido estudiando la posibilidad de *cuantificar* la sostenibilidad de un sistema mediante el Método de la Contabilidad Emergética que permite *no solo cuantificar parámetros, sino también analizar las consecuencias e interrelaciones de los aspectos económicos y ambientales de dichos procesos a largo plazo. Es decir, dicha metodología contabiliza el uso de todos los recursos requeridos para la generación de un producto o servicio (producción de energía), al mismo tiempo que evalúa la degradación ambiental* causada por los residuos (sumideros), y la gestión que se les puede dar a estos, para que sean económicamente y socialmente viables. (Brown, Raugei, & Ulgiati, 2012).

El propósito de la investigación, es que siendo el método del análisis emergético una herramienta metodológica de valoración de la sostenibilidad de un sistema o proceso para la toma de decisiones ambientales, se usará de modo tal que permitan evaluar la correcta gestión de los lodos producidos en una planta de tratamiento de aguas residuales, para seleccionar aquella alternativa de disposición final que sea “aceptable”; es decir, aquella que sea “energéticamente aprovechable”, “económicamente rentable” y “ambientalmente amigable”, mediante indicadores de sostenibilidad, brindando la posibilidad de involucrar de manera conjunta e interrelacionada los factores energéticos, económicos y ambientales.

1.1. Propuesta

Dando como respuesta al problema anteriormente planteado “Se ha considerado que una opción para tratar las aguas residuales domesticas y las combinadas con industriales, es por medio de un proceso de lodos activados, pero se han encontrado polémicas que plantean el **no adecuado aprovechamiento de los biosólidos** generados en este proceso, a pesar de las múltiples alternativas de disposición existentes, generando de esta manera una problemática ambiental, energética y económica”, en esta investigación se propone valorar la mejor entre dos opciones para disponer los biosólidos generados en el tratamiento de aguas residuales en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, minimizando los impactos ambientales, siendo energética y económicamente viables; es decir se va a comparar la actual alternativa de disposición de los lodos con otra alternativa de disposición referenciada como adecuada en la bibliografía bajo estos tres parámetros. Para ello es necesario desarrollar el método del análisis emergético a las dos alternativas seleccionadas de disposición, utilización y aprovechamiento de los biosólidos.

1.2. Hipótesis

El método del análisis emergético permite comparar dos alternativas de aprovechamiento integrando el aspecto energético, económico y ambiental

1.3. Objetivos

Objetivo general

Evaluar la actual disposición de los biosólidos generados en una PTAR en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá mediante el método del análisis emergético (ambiental, energético y económico), comparando la alternativa actual de disposición y otra opción referenciada como adecuada en la bibliografía.

Objetivos específicos

- Analizar la aplicación del método del análisis emergético a una PTAR en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, con las condiciones de operación del periodo de tiempo a desarrollar, incluyendo en el sistema total los lodos generados en dicho proceso e integrando cada una de las dos alternativas seleccionadas de disposición, aprovechamiento de los mismos.

- Analizar la sostenibilidad del sistema, comparando las dos alternativas de aprovechamiento de los biosólidos evaluadas, mediante el cálculo de los índices emergéticos de cada una

- Concluir entre las dos alternativas seleccionadas, cual es la alternativa correcta para la gestión de los biosólidos producidos en una PTAR, mediante la toma de decisiones ambientales seleccionando aquella alternativa de aprovechamiento que sea “aceptable”; es decir aquella utilización que sea “energéticamente aprovechable”, “económicamente rentable” y “ambientalmente amigable”.

2. Marco Teórico

En este apartado, se dan elementos básicos que se requieren para un mejor entendimiento de la investigación, como lo es el funcionamiento de una PTAR para la generación de los biosólidos estabilizados objeto de estudio, dado que dependiendo de la calidad de las aguas a tratar, y por ende del tratamiento especial (pretratamiento o estabilización) a los que son sometidos los lodos se van a obtener unos biosólidos estabilizados de una determinada calidad, del que se deriva su posterior uso; se evidencia una fuerte tendencia por una PTAR de lodos activados, seguido por los diferentes modos de aprovechamiento y utilización de los mismos bajo ciertos criterios económicos y ambientales, y se detalla como es el cambio en el posicionamiento de uso a lo largo del tiempo a medida que mejoran las tecnologías de aprovechamiento; marcando la pauta los tratamientos térmicos y agrícolas. Finalmente se dan las bases metodológicas y herramientas del análisis emergético[5] (definición, base conceptual, desarrollo de la metodología) que se tomaron para desarrollar el presente trabajo; pues más que dar un valor de sostenibilidad de las dos alternativas valoradas, es evaluar la aplicacabilidad y efectividad del método emergético sobre otros métodos de valoración para estimar la sostenibilidad de un proyecto o comparación entre los mismos. Simultáneamente, se enfatizó en las diferencias que hay entre el análisis emergético y otras metodologías utilizadas para la valoración de la sostenibilidad de un proceso, como lo son el análisis ciclo de vida y el análisis exergético[6]. Se describe de manera exhaustiva la razón del porqué no se está incurriendo en errores cuando se utilizan las transformicidades[6] ya calculadas de estudios anteriores y, así mismo, se invalida con base a la literatura la teoría de que “la emergía es la exergía incorporada” (Odum & Odum, 2003) o, en otras palabras, que la emergía se calcula con base a la exergía y no a la energía, teoría generadora de la discrepancia y polémica entre exergístas y energístas.

---

[5] Parte de las bases metodológicas y herramientas del análisis emergético se encuentran en el anexo 2.1

[6] Parte de las diferencias que hay entre el análisis emergético y otras metodologías se encuentran en el Anexo 2.2, en este anexo también se define si el cálculo de la emergía es con base a exergía o energía

2.1. Aguas residuales

Como se mencionó con antelación, cuando se hace uso del término aguas residuales se hace referencia a las aguas usadas y los sólidos que por uno u otro medio se introducen en las cloacas y son transportados mediante el sistema de alcantarillado (Lasprilla & Botero, 2009). Estas aguas residuales pueden contener ciertos componentes indeseables, incluyendo sustancias orgánicas, inorgánicas y tóxicas, así como patógenos causantes de enfermedades y/o microorganismos. En la Tabla 2.1 se muestra una composición típica de las aguas residuales domesticas sin tratar.

Tabla 2.1 Características típicas de aguas residuales domesticas en mg/l.

	Bajo	Medio	Superior
Sólidos Suspendidos Totales	100	200	350
Sólidos Volátiles	75	135	210
DBO_5 (Demanda Biológica de Oxígeno)	100	200	400
DQO(Demanda Química de Oxígeno	175	300	600
Amonio (N)	5	10	20
Nitrógeno Orgánico	8	20	40
PO_4 (P)	7	10	20

Fuente: Tomado de MacGhee, Water supply and sewegera (1991)

Los principales compuestos de los sólidos orgánicos presentes en las aguas residuales son proteínas, carbohidratos, grasas y aceites. Las proteínas contienen aproximadamente un 16% de nitrógeno y, junto con la urea, son las principales fuentes de nitrógeno en las aguas residuales (McGhee, 1991).

Las aguas residuales sin tratar no deben ser eliminadas por varias razones. En primer lugar, la descomposición biológica de los materiales orgánicos en las aguas residuales consume oxígeno y, por tanto, reduce la cantidad disponible en las aguas receptoras para la vida acuática, al mismo tiempo que produce grandes cantidades de gases malolientes. En segundo lugar, entre los microorganismos presentes pueden existir diversas clases de patógenos que son peligrosos para la salud de los seres vivos. En tercer lugar, sus compuestos tóxicos, especialmente los metales pesados, pueden ser peligrosos para plantas y animales y, finalmente, la presencia de fosfatos y nitrógeno pueden conducir a un crecimiento incontrolado de plantas acuáticas en aguas receptoras (Chobanoglous, 1987). Por consiguiente, es necesario reducir los componentes orgánicos, nitrógeno y fósforo, compuestos tóxicos y antes de ser vertidas al medio receptor.

Entre las aguas residuales se encuentran **las *aguas residuales domesticas*** (los líquidos provenientes de las viviendas o residencias, edificios comerciales e institucionales), y *las aguas residuales industriales* (las aguas residuales provenientes de la descarga de industrias de manufactura), estas dos forman ***las aguas residuales municipales*** junto con los residuos líquidos transportados por el alcantarillado de una

ciudad o población y tratados en una planta de tratamiento municipal; esta ultima objeto de estudio de esta investigación.

2.1.1. Planta de tratamiento de aguas residuales

Las aguas residuales, independientemente del origen, son tratadas en PTAR, cuya finalidad es obtener un agua efluente de mejores características de calidad; es decir, disminuir los niveles de carga orgánica (DBO y DQO) con base a ciertos parámetros normalizados por la legislación, mediantes diferentes procedimientos físicos, químicos y biológicos, y así poder ser vertidas en las fuentes naturales, impidiendo que éstas sean contaminadas. Existen diferentes tipos de tratamientos acorde al tipo de afluente a ser tratado (aguas residuales domesticas, aguas residuales industriales, aguas residuales municipales). En la Tabla 2.2 se muestran los tipos de tratamiento de aguas residuales que ofrecen las principales PTAR de Colombia.

Tabla 2.2 Tipos de tratamiento del agua y de lodos en las principales PTAR de Colombia

Tratamiento	**Biosólidos PTAR El Salitre (Bogotá)**	**PTAR San Fernando (Medellín)**	**PTAR Cañaveralejo (Cali)**	**PTAR Río Frío (Bucaramanga)**
Caudal actual (m^3/s)	4.0	1.2	3.5	0.5
Tratamiento del agua	Tratamiento primario avanzado	Tratamiento primario y secundario (lodos activados)	Tratamiento primario avanzado	Tratamiento primario y secundario (Reactor UASB y laguna facultativa)
Tratamiento de lodos	Digestión anaeróbica mesofílica y deshidratación por filtros banda	Digestión anaeróbica mesofílica y deshidratación por centrífuga	Digestión anaeróbica mesofílica y deshidratación por filtros banda	Digestión en UASB y deshidratación por lechos de secado
Forma de aprovechamiento principal o disposición	Cobertura final relleno sanitario Doña Juana	Recuperación de suelos	Cobertura final Basura de Navarro (I semestre-2003) Disposición en Monorrelleno	Aprovechamiento silvicultural (Viveros CDMB)

Fuente: Tomado de ("http://www.geocities.com/ptarcolombia/gestion.htm," n.d.)

Los productos generados como resultado de este proceso de depuración son agua residual tratada y **biosólidos**.

Para alcanzar los límites establecidos para los vertidos de efluentes, una PTAR moderna pueden emplear tres etapas de tratamiento: mecánica, biológica, y una tercera etapa adicional para la eliminación de nitrógeno y el fósforo como lo explica (Chobanoglous, 1987), (Mathias, 1994), (Solter, Peschen, Rohricht, & Gehrke, 1994), (Reimann, 1989), (Schowanek et al., 2004), (Manzel & Sevar, 1989).

2.2. Características de producción de biosólidos en las PTAR de Colombia.

En Colombia actualmente se generan 274 toneladas de biosólidos a diario, es decir, 94 toneladas en base seca, donde el 97% de esta producción es generada por tres PTAR especificas: El Salitre, Cañaveralejo y San Fernando. De esta disponibilidad de biosólidos y de sus características fisicoquímicas depende su adecuada gestión, pues dependiendo de su calidad, se da prelación a una u otra alternativa de aprovechamiento (“http://www.geocities.com/ptarcolombia/gestion.htm,” n.d.)

El control de los biosólidos de las PTAR se basa en el análisis de parámetros físicos, químicos, agrológicos y microbiológicos. Tal como se observa en la Tabla 2.3 los biosólidos de las grandes plantas del país presentan valores de humedades similares; por el contrario, la producción varía dependiendo del sistema de tratamiento de aguas residuales y del caudal afluente (“http://www.geocities.com/ptarcolombia/gestion.htm,” n.d.)

Tabla 2.3 Características físicas de los biosólidos de las principales PTAR de Colombia

Parámetro	**PTAR El Salitre (Bogotá) Datos Sep 2000 –Dic 2002**	**PTAR San Fernando (Medellín) Datos de 2003**	**PTAR Cañaveralejo (Cali) Datos de 2003**	**PTAR Río Frío (Bucaramanga) Datos de 2003**
Humedad (%)	67	68	66	29
Sequedad (%)	33	32	34	71
Producción Toneladas/día (Base húmeda)	130	80	60	2
Producción Toneladas/día (Base seca)	43	28	20	1.4

Fuente: Tomado de ((“http://www.geocities.com/ptarcolombia/gestion.htm,” n.d)

2.3. Alternativas de disposición de biosólidos

Debido a que la generación de biosólidos de una PTAR está incrementándose continuamente, el procesamiento y vertido de tal cantidad de subproductos supone uno de los retos más importantes desde el punto de vista ambiental relacionados con la depuración de aguas residuales (Fytili & Zabaniotou, 2008). Hasta la fecha las alternativas más comunes para darle una salida a los biosólidos son: utilizarlos como fertilizantes, verterlos al mar e incinerarlos. A continuación se detallarán cada una de estas.

2.3.1. Aprovechamiento de los biosólidos para fines agrícolas

Los biosólidos; residuos generados durante el tratamiento de aguas residuales, se utilizan a menudo como un acondicionador orgánico y fertilizantes de suelos (EPA, n.d.), es decir, son aplicados a las tierras agrícolas (pastos y tierras de cultivo), a las áreas perturbadas (tierras minadas, tierras cultivadas), viveros, bosques, áreas recreativas, céspedes, jardines domésticos, entre otros. Esta alternativa de uso se basa en los altos contenidos de nitrógeno y fósforo que presenta este residuo [Tabla 2.4 (Poletschny, 1988)] confiriéndole buenas propiedades para este fin.

La principal agencia federal de los Estados Unidos de América responsable de la gestión de biosólidos generados en las depuradoras de aguas residuales (EPA), promueve el uso beneficioso de los lodos a través de la aplicación en suelos, una vez que hayan sido tratados adecuadamente para uso posterior, dado que estos contienen un gran contenido de nutrientes benéficos (nitrógeno, fósforo y otros micronutrientes) que lo convierten en una interesante enmienda agrícola. Además, también mejora la estructura de los suelos; además, una de las principales ventajas de este aprovechamiento radica en el retorno de los materiales al ciclo biogeoquímico sustituyendo la aplicación de fertilizantes artificiales cuya producción requiere de una gran cantidad de energía y costo monetario. Estos también pueden contener patógenos u otros compuestos tóxicos que atentan contra la salud pública y el medio ambiente, de ahí las altas restricciones en cuanto a calidad, cantidad y frecuencia de aplicación de los mismos.

Tabla 2.4 Contenido de nutrientes en los biosólidos residuales municipales en base seca

Componente	**N**	**P_2O_5**	**K_2O**	**MgO**	**CaO**
Promedio (kg/Ton)	38	36	4.2	9.8	73.8
Mínimo(kg/Ton)	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1
Máximo(kg/Ton)	246	344	95	122	727

Fuente: Tomado de Sewage sludge—Useful or dangerous for agriculture. Poletschny, 1988.

Otro de los inconvenientes de este método de disposición es que la incontrolada adición de biosólidos en el suelo incrementa la concentración de metales pesados en el mismo, lo que conduce a la transferencia de estos metales a los seres humanos por medio de las plantas y animales. Por esta razón, para regular el uso de biosólidos en la agricultura, la EPA junto con la directiva sobre los residuos (Communities, 1999) ha introducido unas concentraciones límite de los metales pesados contenidos en los biosólidos aplicados al suelo, como también su frecuencia de aplicación. En la Tabla 2.5 se muestran estos valores limite de acuerdo a la concentración nativa de los mismos en los suelos receptores (Schowanek *et al*., 2004).

Tabla 2.5 Valores límites de metales pesados estipulados por la Directiva de Agricultura.

Metal pesado	**Concentración límite en el suelo (mg/Kg)**	**Concentración límite en el lodo (mg/Kg)**	**Promedio límite anual permitido en el suelo por hectárea (Kg / hectárea, año)**
Cadmio	1-3	20-40	0.15
Cobre	50-140	1000-1750	12
Níquel	30-75	300-400	3
Plomo	50-300	750-1200	15
Zinc	150-300	2500-4000	30
Mercurio	1-15	16-25	30
Cromo	---	---	---

Fuente: Tomado de (3)(86/278/EEC), 1986

2.3.2. Aprovechamiento de los biosólidos en rellenos sanitarios

Éste ha sido el método más usado, pero paulatinamente ha ido perdiendo auge a medida que se han desarrollado otros métodos de disposición más aceptados ambientalmente. Existen dos maneras de llevar estos residuos a un relleno sanitario; la primera se conoce como co-disposición, en la que los biosólidos son vertidos junto con otros residuos sólidos municipales, y la mono-disposición, en la que solo se vierten los biosólidos una vez estabilizados y deshidratados de manera separada (Werther & Ogada, 1999), es decir, rellenos exclusivos para la disposición de biosólidos.

Esta alternativa de uso conlleva a la percolación de aguas (contaminación de aguas superficiales y subterráneas) y a la emisión de gases y olores por lo que se ha hecho necesario disminuir a un 35% el contenido de humedad de los mismos, al igual que mejorar sus propiedades físicas como: contenido de sólidos, contenido de humedad, capacidad de retención, entre otros. Adicionalmente la disponibilidad de tierras para su evacuación ha ido decreciendo aceleradamente conforme se desarrollan proyectos urbanísticos, de reforestación y demás, siendo una de las principales limitantes para esta práctica.

La directiva sobre residuos (Communities, 1999) se centra en directrices relacionadas a la disposición de los biosólidos en vertederos elimina la posibilidad de verter completamente los lodos sin tratar (aquellos que tienen un poder calorífico mayor o igual a 6.0 MJ/kg en base seca) en sitios diferentes a un vertedero de residuos netamente peligrosos.

2.3.3. Disposición de los biosólidos en el mar

La disposición de los biosólidos en el mar depende tanto de la calidad y cantidad de los mismos, como de la calidad y naturaleza del medio receptor. Antes de 1998, solo tres países de la Unión Europea llevaban a cabo ésta alternativa de uso: en Irlanda el 35% de los biosólidos generados eran dispuestos en el mar, el 30% en Reino Unido y el 10% en España (Werther & Ogada, 1999). Después de 1998, esta práctica fue abolida con la conferencia del Mar del Norte, en la que mediante el acuerdo del 31 de diciembre de ese año se prohibió la evacuación de biosólidos en el mar (Goldsmith, 1994).

2.3.4. Aprovechamiento de los biosólidos mediante incineración

Las limitaciones de las anteriores alternativas de disposición de los biosólidos conducen a la expectativa de que la opción de la incineración se incremente en el futuro. Las principales ventajas que ésta presenta respecto a las otras opciones son: reducción del volumen del biosólido hasta en un 10% llevándolo a ceniza estabilizada y a la destrucción térmica de los componentes tóxicos orgánicos del mismo, aparte de que el contenido energético puede ser recuperado (Romer & Thermische, 1991; Vesilind & Ramsey, 1996). Se han venido desarrollando diferentes métodos de incineración con el fin de controlar las emisiones gaseosas y mejorar los costos de inversión, siendo cada vez más competitivo frente a las otras alternativas de disposición hasta el punto de verse como la única solución, dadas las crecientes limitaciones de los otros métodos (Schowanek *et al*., 2004). En la Figura 2.1 Se muestran las tendencias de las diferentes rutas de evacuación de los biosólidos hasta el año 2005 para la Unión Europea.

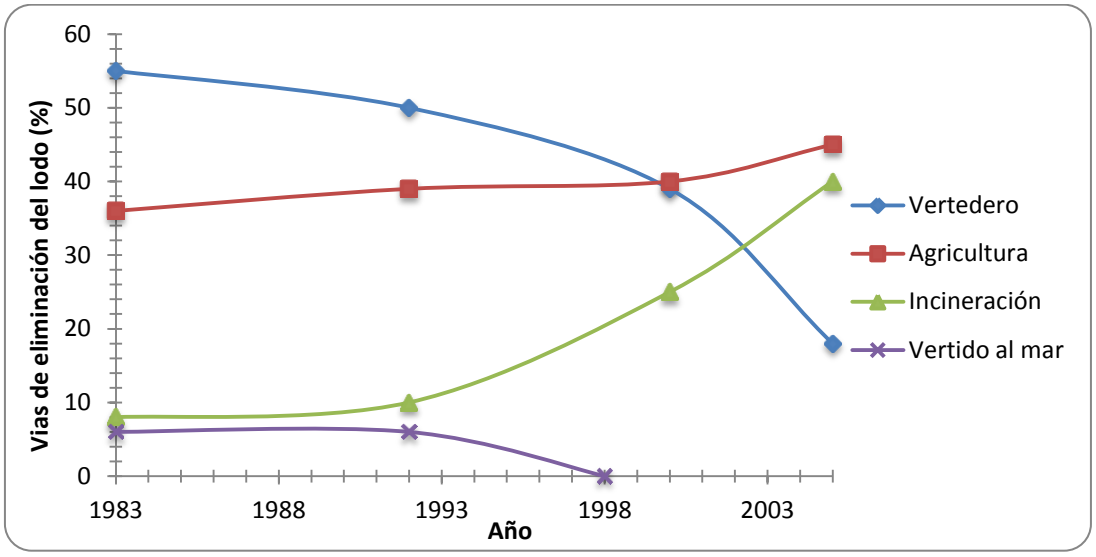

Figura 2.1 Rutas de disposición de lodos en la Unión Europea hasta el año 2005.
Fuente: Tomado de .Hall & Dalimer, 1994. Sewage sludge: Survey of sludge production, treatment, quality and disposal

De la Figura 2.1 se infiere que, aunque en un principio el vertido de los biosólidos en rellenos sanitarios era la opción más utilizada, ésta decreció abruptamente por razones de sostenibilidad (tratadas en apartados anteriores), entre las que se destaca la creciente competencia de espacios para vertederos, los altos costos de disposición y la alta rigurosidad en las políticas ambientales frente a esta práctica; por lo tanto, se espera que esta alternativa disminuya y que sea la última en considerarse. Al mismo tiempo, se reconocen ciertas ventajas que poseen los biosólidos al utilizarlos como fertilizantes, dados sus altos contenidos de nitrógeno y fósforo, pero se advierte la presencia de metales pesados que limita su uso condicionado a las concentraciones límite de los mismos señalados por la EPA. La disposición de los lodos estabilizados en el mar como solución a la problemática de disposición sostenible, desde los inicios, fue insignificante, aboliéndose por completo. Finalmente se tiene la incineración, la cual en un comienzo fue la alternativa menos atractiva pero la más prometedora para hacerle frente a la creciente disponibilidad de biosólidos producidos en una PTAR y que previamente eran dispuestos de manera no sostenible (rellenos sanitarios).

Igualmente, para el año 2005 se tenía previsto que el 45% de los lodos serían utilizados en la agricultura, mientras que el 38 y 17% se dispondrían en incineración y llevados a rellenos sanitarios, respectivamente.

En conclusión, respecto a las diferentes alternativas de disposición de estos biosólidos, se puede decir que hay una fuerte competición entre utilizarlos para *fines agrícolas* (siendo en el 2005 la alternativa preferida) y *fines energéticos* también conocidos como *tratamientos térmicos* (posicionándose aceleradamente como una de las salidas más utilizada).

En la Figura 2.2. se muestra una aproximación de la evolución de estas dos alternativas más competitivas hasta el año 2018 para la Unión Europea; en la que para el año 2010 se evidencia la misma tendencia del año 2005 (Schowanek *et al.*, 2004) (aproximadamente el 88% de los biosólidos son provistos para usos agrícolas dentro de los que se incluye la recuperación de suelos y uso como fertilizantes, y el 12 % restante para usos térmicos), y se advierte una clara tendencia para el 2018 del posicionamiento de la utilización térmica como la gestión más viable a esta problemática, desde el punto de vista ambiental, económico y práctico, con un 20% más de uso que la otra alternativa mencionada.

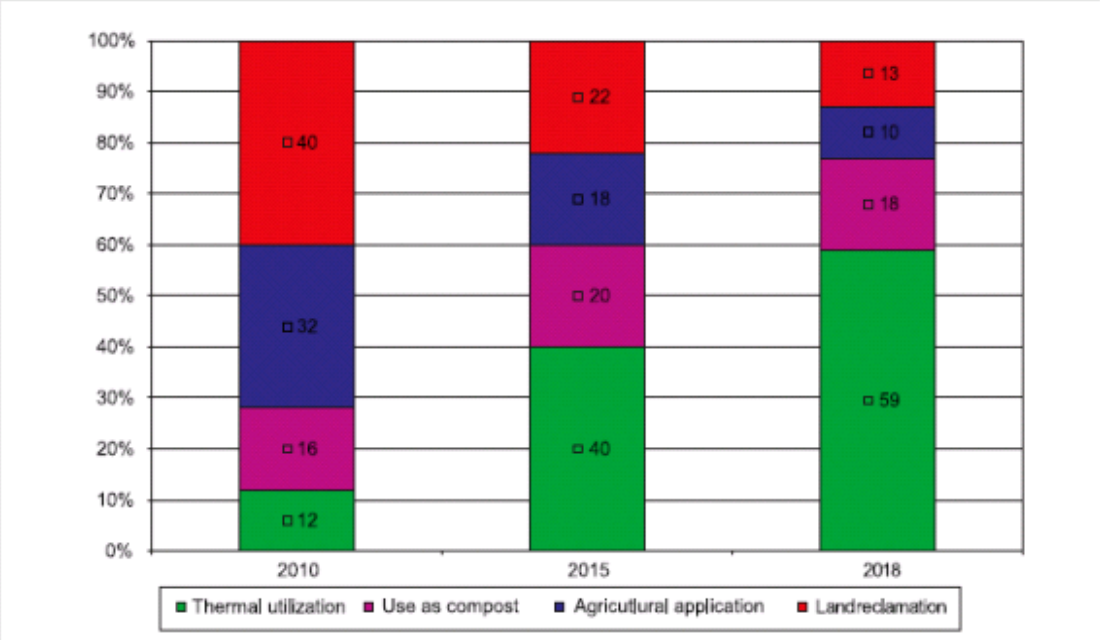

Figura 2.2 Cambios en los modos de utilización de los biosólidos en la Unión Europea

Fuente: Tomado de Schowanek *et al*., 2004. A risk-based methodology for deriving quality standards for organic contaminants in sewage sludge for use in agriculture.

2.4. Método de la contabilidad emergética

Para hablar de emergía, es necesario tener claro dos conceptos: *calidad energética y transformicidad*

2.4.1. Calidad de la energía y transformicidad:

Odum observó que todos los procesos de auto-organización de sistemas (ej: ecosistemas) están regidos por la segunda ley de la termodinámica, pies la energía que pasa de un nivel inferior a otro superior de la auto-organización es menor en cada

escalón, dado que no existe una eficiencia del cien por ciento en el proceso de transformación; pero la energía necesaria para la construcción de niveles más altos de la auto-organización es cada vez mayor conforme el sistema se hace más complejo, es decir, conforme avanza en la cadena de organización. De esta manera, la energía se concentra a medida de que se avanza en los niveles de auto-organización como se muestra en la Figura 2.3.

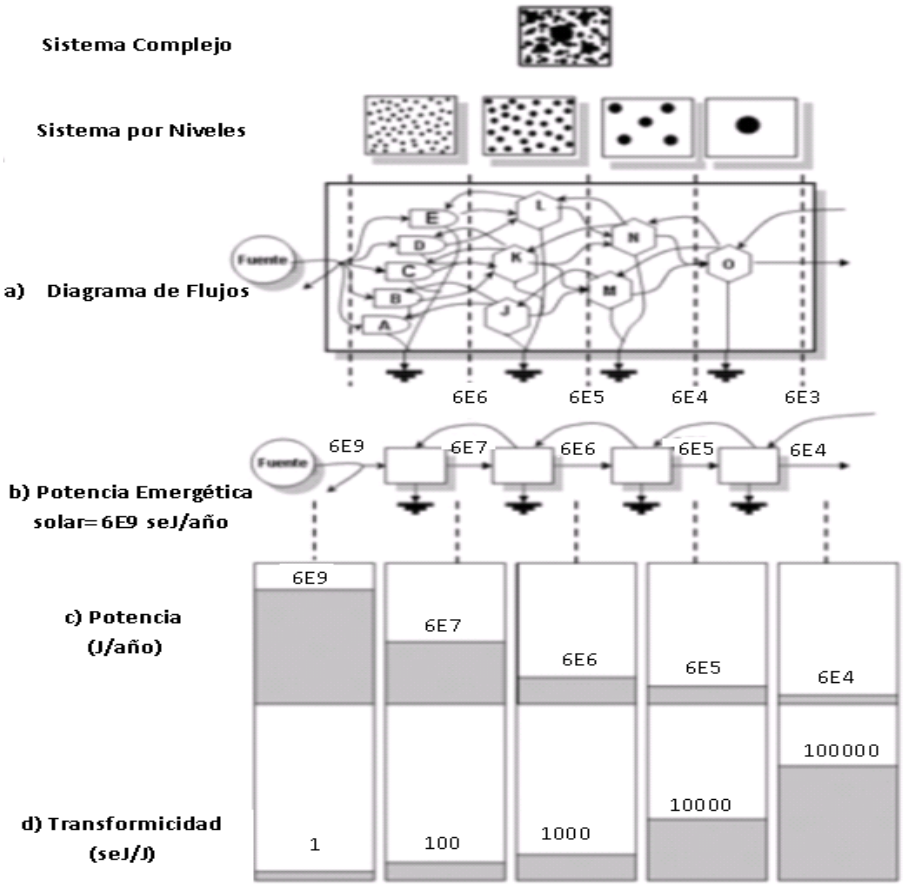

Figura 2.3 Diagrama energético de la jerarquía en la transformación de la energía.
Fuente: Tomado de Rydberg & Haden, 2006 Emergy evaluations of Denmark and Danish agriculture: Assessing the influence of changing resource availability on the organization of agriculture and society.

"Esta observación implica que 1 joule de energía solar, 1 joule de carbón o 1 joule de electricidad, aunque representan la misma ***cantidad*** de energía (1 joule), no representan la misma ***calidad***, en el sentido del potencial que tienen estos distintos tipos de fuentes energéticas para actuar sobre el conjunto del sistema, es decir, en la necesidad que el sistema tiene de recibir mayores o menores cantidades de energía menos concentrada para generar cada una de ellas" (Lomas, Donato, & Ulgiati, 2007).

Se concluye entonces que existe una *jerarquía de energías* según su calidad o potencial para influir en el sistema, que va desde fuentes de energía poco concentradas (como el sol) hasta aquellas muy concentradas (como el petróleo) (Odum & Odum, 2003; Sciubba & Ulgiati, 2005)
Es primordial hacer la aclaración sobre la selección de la energía solar como la energía de referencia, pues en el análisis emergético se supone que ésta es la principal entrada de energía poco concentrada a la ecósfera (en la tierra la fuente más abundante de energía es la luz solar, pero debido a que fluye en el tiempo y espacio, tiene una baja calidad en comparación a otras formas de energía de la tierra derivadas desde ésta). Por tanto, la transformicidad tendría unidades de seJ/unidad de energía (joules equivalentes solares/unidad de energía).

2.4.2. Emergía

Una vez definidos los conceptos cantidad, calidad energética y transformicidad, se procede a definir el concepto de emergía. La eficiencia ambiental y económica de un proceso industrial puede ser evaluada por una variedad de técnicas, como el análisis del ciclo de vida, análisis exergético; entre los más usados (Odum & Odum, 2003). *El método del análisis emergético es un método de contabilidad ambiental basado en energía, que expresa todas las entradas del proceso (energía, recursos naturales, servicios) y salidas (productos o servicios) en equivalentes solares*. Es así como la emergía se define como *la energía solar usada directa o indirectamente para generar un producto o servicio* (Odum & Odum, 2003; Vassallo, & Fabiano, 2009) Es decir, es la cantidad de energía solar total que se invirtió o que es necesaria para generar ese bien o producto. Las unidades de la emergía son los joules equivalentes solares (seJ). Es así como la unidad de energía solar, es la medida que unifica el consumo de materiales, recursos energéticos y sociales que se invirtieron para la obtención del producto o servicio.

Es por todo lo anterior que la emergía traduce “memoria energética”, pues se trata de calcular el costo en términos energéticos solares del conjunto de materiales y recursos usados en generar determinado producto o servicio (memoria de cuanto sol se invierte para la creación de ese producto o servicio).

Se puede decir entonces, que el valor emergético de un producto no es la energía que contiene el producto, sino la cantidad de energía que ha sido usada en la creación del producto (Lomas *et al*., 2007)

Como conclusión, el análisis emergético es una técnica de evaluación cuantitativa que determina la cantidad de emergía directa o indirecta de una clase que ha sido usada durante cierto proceso para generar recursos, servicios y productos de diferentes calidades) (Odum, 1996). Se puede considerar un sistema de contabilidad y gestión ambiental; es decir, este método permite estimar el valor de los distintos componentes del sistema (contabilidad) y de acuerdo al propio método, va a definir unas condiciones

de sostenibilidad, proporcionando una serie de ***índices*** para evaluar esta última y realizar la toma de decisiones ambientales (gestión).

2.4.3. Álgebra emergética

Ahora bien, una de las principales limitantes es transformar todas las calidades diferentes de energía o materia a la calidad de energía de referencia (por definición de emergía) y, al mismo tiempo, se requiere saber qué posición en la jerarquía ocupa cada elemento involucrado en el proceso. Para ello se hace uso de la ***transformicidad***, la que se definió anteriormente (*cantidad de energía solar necesaria para generar una unidad de energía o materia de mayor calidad o, en otras palabras, es la emergía requerida para generar una unidad de producto*); ésta va a permitir transformar los diferentes tipos de energía o materias usadas a una calidad de energía solar (seJ); es decir, este factor de transformicidad se usaría como un factor de equivalencia (UEV), que también indicaría a qué nivel de la jerarquía de potencial uso se encuentra el componente evaluado.

En términos algebraicos, se tiene que:

$$E_i = T_{ri} \times E_{xi} \qquad \text{Ec 2.1}$$

La cual:
$E_i(seJ) = Emergía\ del\ producto$
$T_{ri}(^{seJ}/_{Unidad\ de\ energía}) = Transformicidad$
$E_{xi}\ (unidad\ de\ energía) = Energía$
De manera similar para el caso de la materia

$$E_i = T_{ri} \times M_{xi} \qquad \text{Ec 2.2}$$

$E_i(sej) = Emergía\ del\ producto$
$T_{ri}(sej/unidad) = Transformicidad\ especifica$
$M_{xi}\ (unidad\ de\ masa) = masa$

Así mismo la transformicidad se puede calcular como:

$$T_r = \frac{E_i}{E_{xi}} \text{ ó } T_r = \frac{E_i}{M_{xi}} \qquad \text{Ec 2.3}$$

En el caso de hablar de energía o materia, respectivamente. Esta transformicidad es expresada como joules de energía solar por joule, Kg o $ (kilogramo o valor monetario) de producto (seJ/J, seJ/kg, seJ/$) para flujos energéticos, másicos o monetarios respectivamente.

De la Ec 2.3 se puede inferir que la transformicidad es el valor inverso de la eficiencia energética del sistema. Una baja transformicidad significa que menos emergía es necesaria para generar el producto o servicio.

2.4.4. Uso de transformicidades ya calculadas

Calcular de nuevo los factores de equivalencia o de transformicidad es algo complicado, que esta fuera del alcance de este estudio, pues se requiere un nivel de detalle de información con el que no se cuenta. Por eso, la mayoría de los investigadores que hacen uso de la emergía, toman estos factores de estudios anteriores donde especifiquen la elaboración concreta y los constituyentes a los que hace referencia. Empíricamente se ha comprobado que la magnitud de los factores de transformicidad no varía significativamente cuando se trata de sistemas similares (Lomas *et al*., 2007). Más adelante se explica de manera más detallada del porqué no se calculan los factores de transformicidad requeridos. Odum & Odum (2003) recomiendan usar transformicidades razonables ya calculadas que se encuentran en el apéndice C del libro "Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making" (Odum, 1996), siempre y cuando se hable de sistemas similares.

Por esta razón, en esta investigación se tomaron factores de transformicidad de otros estudios con características similares a los sistemas trabajados, pudiendo incurrirse en un error poco significativo comparado con los errores en los que se podrían incidir si estos se calculan a partir de la escaza información con la que se cuenta. Además, se cuenta con la ventaja de que la comunidad de investigadores de emergía hacen explícitos sus cálculos, con lo cual cualquiera puede ver qué componentes tiene otro estudio y cuan diferente o semejante es al sistema de este estudio. Adicionalmente, se comprueba empíricamente que los factores de equivalencia tienen magnitudes muy similares para sistemas muy similares, como se dijo anteriormente. Como consecuencia, en este estudio se especifica a que sistema se hace referencia cuando se habla de un determinado factor de equivalencia o transformicidad.

La comunidad de emergéticos han venido realizando bases de datos (librerías) en las que se recopilan estos factores de equivalencia para diferentes sistemas (los cuales se han corroborado seguidos). Las dos bases de datos principales se encuentran en la Universidad de Florida (EE.UU), con la *International Society for the Advancement of Emergy Research* (Sociedad Internacional Dedicada al Avance de la Investigación en Emergía), y en la Universidad de Campinas (Brasil); esta última dirigida por el doctor Enrique Ortega. Estas dos comunidades emergéticas han venido desarrollando un proyecto en el que se hace una recopilación de las principales transformicidades y emergías específicas agrupadas por temas, junto con los cálculos que derivan en el valor final. Este proyecto se está publicando en forma de manuales y se puede descargar en la red a través de las siguientes direcciones:

(“http://www.unicamp.br/fea/ortega/curso/transformid.htm,”n.d.)
(“http://www.emergysystems.org/folios.php,” n.d.)
Aparte de ello, la transformicidad se puede definir como una propiedad que depende del tipo de energía, por lo que su valor para sistemas similares no es muy variable.

Aquellas transformicidades que fueron calculadas antes del año 2000 deben ser corregidas por un factor de 1.68, dado que la energía global (energía solar, calor de la tierra e impulso de las mareas) que dirige todos los procesos globales fue recalculada y se obtuvo un valor más alto del que se asumía como base de cálculo en la bibliografia, siendo la razón entre el nuevo y el antiguo valor el factor de corrección ($15.83 \times 10^{24}/9 \times 10^{24} = 1.68$ (Odum, Brown & Brandt-Williams, 2000).

2.4.5. Insumos del sistema:

Al hacer una valoración desde la perspectiva energética, se busca evaluar toda la energía involucrada en la generación de un producto a partir de la energía pasada que participó en sus sucesivos procesos de transformación, así el valor energético estará relacionado con la cantidad de energía que fue necesaria usar; estas formas de energía son***: fuentes renovables del sistema*** (servicios ambientales), ***fuentes no renovables del sistema*** (aportes de materiales) y ***recursos comprados o importados*** al sistema (inversión de dinero en insumos como lo es la labor humana) (Soibelzon, 2007); de esta manera se involucran los aspectos sociales, ambientales y económicos mediante flujos energéticos y másicos de los mismos, y estos tipos diferentes de energía se expresan en la misma unidad, mediante el factor de transformicidad para poderlos operar (Brown *et al.*, 2012).

Se puede inferir de lo anterior que el análisis emergético es un método adecuado para la toma de decisiones ambientales, porque no solo cuenta con los flujos de energía de un sistema, sino también reconoce la calidad de estos flujos de energía, explicando de esta manera la distribución jerárquica de la energía en dichos sistemas (Arias & Brown, 2009).

2.4.6. Símbolos emergéticos.

Para llevar a cabo el modelado de los sistemas emergéticos, se emplea un lenguaje propio, denominado lenguaje energético con toda una serie de símbolos para los distintos componentes de un sistema. Mediante estos símbolos se construyen los denominados diagramas de flujo. (Álvarez, 1993; Lomas *et al*., 2007; Luis & Huertas, 2009; Manyà *et al.*, 2005).

2.4.7. Diagramas de flujo

Los diagramas de flujo se realizan empleando los símbolos del lenguaje emergético. Un diagrama de flujo no es más que un modelo conceptual de la realidad, que constituye el paso fundamental inicial de la síntesis emergética, así como de otros análisis de sistemas (Odum *et al.*, 2000). De la precisión de dicho modelo van a depender los resultados posteriores. Puede ser menos o más detallados, dependiendo del objetivo y tipo de socioecosistema abordado. A pesar que constituye una simplificación de la realidad, permite abordar sistemas complejos, establecer sus componentes principales y determinar sus factores de control y líneas directrices (Sklar, Constanza, & Day, 1990).

El modelado conceptual a través de los símbolos emergéticos es una herramienta muy poderosa a la hora de abordar cualquier estudio, ya que clarifica los objetivos, organiza y agrupa los datos disponibles y pone de manifiesto vacíos de información. Además, obliga al investigador a hacer explícitos los componentes de un determinado problema, así como a reflexionar sobre la naturaleza de los mismos y su relación con otros, en términos de flujos de materia, energía e información, pudiendo incluso derivar en la producción directa de simulaciones o de índices para la comparación entre sistemas (Lapa *et al.*, 2007; Odum & Odum, 2003).

2.4.8. Uso de colores recomendados

La asociación de emergístas[7] recomienda el uso de la siguiente convención de colores utilizados para definir los diferentes tipos de flujos energéticos:

- Amarillo: Energía solar y flujos de calor.
- Azul: Materiales que circulan de la biosfera, tales como agua, aire, nutrientes
- Café: Componentes geológicos, los combustibles y la minería.
- Verde: Áreas medioambientales y productores.
- Rojo: Consumidores (animales y económicos), la población, la industria, las ciudades
- Púrpura: Flujo de dinero

2.4.9. Índices emergéticos

Como se trató en apartados anteriores, el análisis emergético separa las entradas de fuentes renovables de las no renovables y de las entradas importadas. Estas distinciones hacen posible definir los indicadores emergéticos, que proveen las herramientas para la toma de decisiones de sostenibilidad, especialmente cuando se tratan diferentes

[7] Véase. http://www.emergysystems.org/lectures.php

alternativas (Brown *et al.*, 2012; Castellini, Bastianoni, Granai, Bosco, & Brunetti, 2006; Cohen *et al.*, 2006). Todos estos indicadores que se describirán a continuación cubren todos los aspectos de la sostenibilidad ambiental (Castellini *et al*., 2006).

a) ELR (Enviromental Loading Ratio): Es el índice de carga ambiental, hace referencia a la relación que hay entre las entradas de los recursos no renovables al sistema más los recursos importados sobre los recursos renovables

$$ELR = \frac{NR + F}{R} \qquad \text{Ec 2.4}$$

Los valores bajos de ELR (2), indican que los procesos tienen un bajo impacto ambiental o cuentan con un área muy grande para diluir el impacto ambiental, cuando ELR›10 hay una alta carga ambiental y cuando 3‹ELR›10 el impacto es considerado moderado. Este índice es alto para sistemas con altas entradas no renovables o con altas emisiones al ambiente (Cao & Feng, 2007) y aquellos procesos muy tecnológicos.

b) EYR (Emergy Yield Ratio): Es el índice de rendimiento emergético; indica la relación que hay entre la emergía total del sistema sobre los recursos importados

$$EYR = \frac{R + NR + F}{F} \qquad \text{Ec 2.5}$$

Este índice es usado para estimar la dependencia que tiene el proceso sobre los recursos importados o comprados y para mostrar la contribución del capital natural local en la economía de la región o el proceso.

Bajos valores de EYR indican un bajo beneficio económico y una competencia de mercado débil; por el contrario, altos valores de EYR indican la fuerte competencia que tiene el producto desarrollado y un alto beneficio económico (Zhou *et al.*, 2010). Es decir, cuanto mayor sea este índice, mayor es la contribución de los recursos locales (renovables y no renovables) al sistema (Castellini *et al*., 2006). Este índice también muestra que tan eficientemente el sistema usa los recursos locales que tiene disponible (Castellini *et al.*, 2006). Simultáneamente revela la capacidad de un proceso para explotar los recursos locales (de fuentes renovables y no renovables) mediante la inversión económica de recursos provenientes del exterior (Zhang, Deng, Wu, & Jiang, 2010).

EYR‹5 indica que en el proceso se utilizó una gran cantidad de recursos energéticos secundarios; materias primas como cemento, acero entre otros. EYR›5 indica la utilización de recursos energéticos primarios y EYR‹2 indican que no hay

contribución significativa de recursos locales y están asociados a procesos casi completamente manufacturados (Brown *et al*., 2012)

Cuanto más alto sea el índice de producción emergético, más energía está proporcionando un proceso dado al sistema frente a la que retira (Odum & Odum, 2003).

c) ESI (Emergy Sustainable Indices): Es el índice de sostenibilidad; indica la relación que hay entre el índice de rendimiento emergético y el índice de carga ambiental.

$$ESI = \frac{EYR}{ELR} \qquad \text{Ec 2.6}$$

Este índice refleja la capacidad que tiene un sistema para suministrar productos o servicios con un mínimo estrés ambiental y un máximo beneficio económico *(Zhang et al.*, 2011).

(Cao & Feng, 2007). Cuando ESI ‹1 el proceso no es sostenible a largo plazo, cuando 1›ESI›5 se presenta una contribución sostenible a la economía durante periodos a mediano plazo, con ESI›5 el proceso puede ser considerado sostenible a largo plazo. Pero es incorrecto pensar que entre mayor sea este índice, mucho mayor es la sostenibilidad del proceso, pues a ESI›10 el proceso es considerado subdesarrollado (Cao & Feng, 2007).

d) EIR (Emergy Investment Ratio): Es el índice de inversión energética; es la relación que hay entre la entrada de los recursos importados al sistema sobre la suma de los recursos renovables y no renovables.

$$EIR = \frac{F}{R + NR} \qquad \text{Ec 2.7}$$

Cuanto menor sea este índice, más bajo es el costo económico del proceso, así que la alternativa que presente un menor índice tiende a ser más competitiva y a prosperar en el mercado. Generalmente cuanto mayor sea la relación, mayor es el nivel de desarrollo económico del sistema (Zhang, Yang, & Chen, 2007).

e) T (Emergy Per Unite): Indica la transformicidad del producto o servicio final; es la relación que hay entre la emergía sobre la energía total del producto o servicio producido.

$$T = \frac{R + NR + F}{E} \qquad \text{Ec 2.8}$$

Cuando se comparan dos alternativas, una baja transformicidad indica una alta eficiencia en el proceso, pues se obtiene más producto con una cantidad dada de emergía incorporada al proceso, en otros términos se requiere menor cantidad de emergía para generar el producto(Lu, Bai, Ren, & Campbell, 2010).

f) R (% Renovabilidad Ratio): Es la relación que hay entre las entradas de las fuentes renovables al sistema sobre la emergía total.

$$\%R = \frac{R}{(R + NR + F)} \times 100 \qquad \text{Ec 2.9}$$

El factor de renovabilidad debe ser introducido dentro del análisis emergético cuando se quiera hacer una evaluación de sostenibilidad (Agostinho *et al.*, 2008). Simplemente indica el porcentaje de emergía renovable usada por el sistema. Los sistemas con un alto porcentaje de emergía renovable tienen mayor probabilidad de ser mas sostenibles y prevalecer (tienen más capacidad de sobrevivir a un estrés económico, que aquellos que usan una gran cantidad de emergía no renovable) (Cohen *et al.*, 2006; Rydberg & Haden, 2006).

g) SEC (Soil Emergy Cost): Indica el costo emergético del suelo; es la relación que hay entre las entradas no renovables al sistema sobre la emergía total.

$$SEC = \frac{NR}{(NR + R + F)} \qquad \text{Ec 2.10}$$

Este índice provee la relación costo-beneficio (suelo-agricultura) para las prácticas de agricultura. Es así como SEC compara los rendimientos agrícolas contra la pérdida de emergía asociada al suelo erosionado; es decir, la cantidad de pérdida de suelo por unidad de emergía. El valor de este índice debe ser menor que la unidad (L. X. Zhang, Song, & Chen, 2012).

h) EER (Emergy Exchange Ratio): Es el índice de la tasa de cambio energético; es calculado dividiendo el total de la emergía del producto por la emergía recibida de la venta.

$$EER = \frac{NR + R + F}{(Precio\ comercial\ del\ producto \times emergy\ money\ ratio)} \qquad \text{Ec 2.11}$$

El “Emergy Money Ratio”, conocido como relación emergía-dinero o canje emergético, es la cantidad de emergía que se puede comprar en un determinado país por una unidad de dinero (un dólar) en un año específico. Países más

desarrollados suelen tener un valor más bajo de este índice, indicando una mayor circulación de dinero. Los países menos desarrollados tienen valores más elevados de este índice, ya que en su economía hay una mayor contribución de recursos ambientales por los que no se paga (Ulgiati, Brown, Bastianoni, & Marchettini, 1995). Más adelante se explica con detalle el cálculo de éste.

Es así como este índice proporciona una medida de quien gana o pierde en el comercio económico con relación al consumidor y productor (Cohen *et al.*, 2006). Un EER ›1 indica que se suplió más emergía al consumidor respecto a la que fue recibida en el intercambio; es decir, el productor recibió menos emergía de la que fue utilizada para producir el bien. Si EER‹1 indica que el productor obtuvo ganancias; recibió más emergía de la que fue utilizada. Si EER = 1 se obtuvo exactamente la misma cantidad de emergía utilizada al momento de la venta (Agostinho *et al.,* 2008).

2.5. Emergía y sostenibilidad

La palabra sostenibilidad es un concepto polémico, pues se ha definido de maneras diferentes por muchas disciplinas. Sin embrago a partir de la época de los años 70 la palabra es utilizada para referirse a un manejo apropiado de los recursos naturales, de tal manera de permitir a las próximas generaciones el acceso a los recursos que se utilizan o no en la actualidad; esta definición fue la ilustración del Reporte de la Comisión Brundtland.

Pero en 1987 Redclift, de acuerdo a su formación, desarrolla la idea que se requiere de un análisis de la interrelación del desarrollo y el medio ambiente. Es decir, el autor ve la necesidad de relacionar en el concepto de sostenibilidad el aspecto económico; que se evidencia en el desarrollo de un país y el aspecto ambiental.

De esta manera, Redclift define sostenibilidad como “el desarrollo sostenible, si no ha de ser despojado de contenido analítico, significa algo más que la concertación del compromiso entre el ambiente natural y la búsqueda del crecimiento económico. Esto significa una definición del desarrollo que reconozca que los límites de la sostenibilidad tienen origen tanto estructurales (económicos) como naturales”

Debido a que la economía es un sistema abierto que disipa energía y materiales para mantenerse o crecer, su sostenibilidad depende de la disponibilidad de energías y materiales que consume (Lomas *et al*., 2007)

Si la sociedad genera estructuras que requieren grandes flujos de energía provenientes de recursos naturales y grandes almacenamientos de energía fósil, y las concentraciones de estos recursos son consumidos y agotados, entonces la sociedad deberá prescindir de estas estructuras o enfrentará forzosamente una declinación (Odum, 2001). De esta manera, la sostenibilidad o insostenibilidad de las sociedades modernas estará dada por

cuánto dependen de las estructuras consumidoras de recursos naturales no renovables. *El patrón de* sostenibilidad *en términos generales, estará dado por aquellas sociedades que funcionen bajo un consumo de energías y materiales renovables.*

En otras palabras, la sostenibilidad de una sociedad o de un proyecto depende principalmente de los tipos de recursos o de energías que intervienen en los mismos; siendo sostenible la dependencia de éstos por los recursos renovables y no por los que no son renovables.

Por lo tanto, un sistema es sostenible en la medida que las fuentes de energía que le aportan los flujos necesarios para su permanencia perduren a través del tiempo (fuentes renovables), o bien, un sistema es sostenible si es capaz de adaptarse a las fuentes de energía disponibles y a remplazar dichas fuentes de energía por otras en caso de que las fuentes originales de energía dejen de estar disponibles (Lomas *et al*., 2007) Se puede decir entonces que la sostenibilidad es intrínseca a la relación que hay entre la tasa de consumo de los recursos de la fuente respecto a la tasa con que la fuente genera el recursos; por ejemplo, la extracción de recursos minerales tiende a ser insostenible, ya que es una actividad que se basa en productos no renovables. Sin embargo, la sostenibilidad de dicha actividad estará determinada por la disponibilidad de la energía necesaria para realizar los procesos de extracción, transformación y reciclaje del mineral, además del aumento de la tasa de extracción del mineral.

Es así como la sostenibilidad de una economía, en términos energéticos, es una función de la dependencia de esta economía de energía renovable, el grado de cuanto depende la economía de la emergía importada y la sobrecarga que la actividad económica genera en el ambiente (Lomas *et al*., 2007).

Se puede concluir entonces que la sostenibilidad es la compatibilidad entre el aspecto económico (máximo rendimiento) y el ambiental. Por tanto, la mejor relación es tener el mayor rendimiento con la menor carga medioambiental (Brown *et al*., 2012).
Teniendo en cuenta que a largo plazo sólo sistemas con un alto porcentaje de emergía renovable capturada son sostenibles.

En el Anexo 2.1 se presenta los conceptos básicos del método de la contabilidad emergética (conceptos, objetivos, características y ventajas y desventajas del método)

En el Anexo 2.2 se presentan las diferencias del método del Análisis Emergético respecto a otros métodos de valoración de impactos ambientales y sostenibilidad (análisis del ciclo de vida, análisis exergético) y se explica detalladamente como la emergía es función de la energía y no de la exergía, punto de controversia entre emergístas y exergístas.

3. Estado del arte

En esta sección se describe de manera general, los estudios que se han realizado hasta la fecha de la aplicación del Método del Análisis Emergético a los sistemas objeto de interés de este estudio (sistema de tratamiento de aguas residuales, sistema agrícola y sistema de tratamientos térmicos de biomasa).

Se enfatiza en que los sistemas desarrollados a continuación, en realidad no especifican lo realizado en este estudio; es decir, hasta la fecha no se encontró evidencia en la búsqueda realizada que se hayan llevado a cabo investigaciones que de manera independiente analicen la sostenibilidad de aprovechamiento a los biosólidos generados en una PTAR; es decir, no se encontraron estudios en los que hagan análisis emergéticos del aprovechamiento de biosólidos para ningún sistema (ninguna aplicación), ni mucho menos en donde se analice la *sostenibilidad* de un proceso de recuperación térmica mediante gasificación independiente de la biomasa utilizada, al igual del efecto de la fertilización de suelos para la mejora de la productividad en pastos.

En la investigación se hizo una apropiación de lo reportado en la bibliografia sobre la aplicación de esta metodología emergética a los sistemas de interés (sistema agrícola y térmico), evidenciándose como el análisis emergético ha sido muy poco explorado en sistemas térmicos, siendo más expandido en sistemas agrícolas (no queriendo decir que sean significativos); en los estudios referidos a estos sistemas térmicos no se aborda a la utilización de los biosólidos como fuente de materia y energía. Es de resaltar el estudio de Zhang, *et al*., (2010), pues sirvió de base para esta investigación, ya que permitió evidenciar como el tratamiento de las aguas residuales queda inconcluso cuando no se hace una valoración y aprovechamiento de los biosólidos generados en el mismo y se toma como un sistema aislado. Por esta razón, en el estado del arte se incluyó el sistema de aguas residuales, con el fin de demostrar el vacío del proceso de tratamiento cuando los biosólidos se dejan a la deriva; a la vez permite justificar la necesidad de evaluar alternativas de aprovechamiento sostenibles para gestionar los mismos.

3.1. Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales

Como se expresó anteriormente, la revisión del estado del arte de la aplicación del análisis emergético a un sistema de tratamiento de aguas residuales, sirvió para identificar las características de sostenibilidad o no de los elementos que participan en los procesos que dan origen a los biosólidos (objeto de este estudio), con el fin de continuar con su análisis de disposición y aprovechamiento de manera sostenible. Este análisis de aprovechamiento es una etapa del proceso del tratamiento de aguas residuales que aún no ha sido adicionado y que tiene que ser acoplado.

Los estudios de la aplicación del método del análisis emergético a sistemas de tratamiento de aguas residuales se centran principalmente en el proceso de tratamiento hasta la generación de los biosólidos, y muy pocos trabajos se concentran en el funcionamiento ***completo*** de una PTAR; solo un estudio (Zhou et al., 2010) aborda la evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales, el impacto del agua tratada a la fuente receptora y la reutilización de los biosólidos para compostaje.

La reutilización y/o manejo de las aguas residuales es una oportunidad para acortar el ciclo hidrológico hasta que el agua se aproveche de nuevo y pueda ser utilizada de manera eficiente otorgando beneficios ambientales, económicos, sociales y políticos (Janosova, Miklankova, Hlavinek, & Wintgens, 2006), pero esto necesariamente tiene que ser evaluado mediante la toma de decisiones ambientales, es por ello que en los últimos años se han venido desarrollando varios métodos o fusiones de algunos de ellos, que han sido aplicados para evaluar la eficiencia de los sistemas de tratamiento de aguas residuales; los métodos más utilizados han sido: **El Método del Análisis de Emergético** (Bjo & Geber, 2001; Geber & Bjo, 2002; Jiang, Zhou, Chen, & Chen, 2008; Siracusa & La Rosa, 2006; Zhou *et al*., 2009), **El Método del Análisis Exegético**, **El Método de Evaluación del Ciclo de Vida (LCA)** (Anthony, 1995; Ocaña & Víctor, 2008)**, Índices del Proceso Sostenible (SPI)** (Petersen & Werther, 2005), **fusión de varios métodos** (**LCA y Método del Análisis Emergético**) (Wang, 1997), **Evaluación Económica y Análisis Energético** y/o otra fusión de métodos (Bargigli, 2004).

Ninguno de estos métodos, excepto el método del análisis emergético incluyen la utilización de recursos indirectos (como la labor humana), ni una evaluación de los impactos ambientales causados por la generación de los recursos utilizados dentro del sistema o proceso; es decir, resulta difícil llevar a cabo un análisis de sostenibilidad bajo estos métodos, debido a que no integran los aspectos ambientales, económicos y energéticos de una manera conjunta e interrelacionada. Los análisis que no consideran los recursos humanos, los recursos renovables (medioambientales) y las diferencias de la calidad entre los distintitos tipos de recursos medioambientales, no renovables e importados de acuerdo a la escala espacio-temporal, difícilmente podrán valorar de manera correcta los impactos ambientales a diferentes escalas espacio-temporales. Por tanto, estos métodos no son suficientes a la hora de discutir sobre una sostenibilidad ecológica de un proceso (Bjo & Geber, 2001), tomando como base la definición de

sostenibilidad dada en el capitulo anterior. El método que más se aproxima a este análisis de sostenibilidad, es el método del análisis exergético (como se mostró en capítulos anteriores), pues clasifica de manera implícita los recursos renovables, no renovables e importados requeridos para la realización de un determinado proceso y el cálculo del índice de sostenibilidad se encuentra en función de los mismos, por ende comparte el mismo el concepto de sostenibilidad que el método del análisis energético: "la sostenibilidad de una sociedad o de un proyecto depende principalmente de los tipos de recursos o de energías que intervienen en los mismos; siendo sostenible la dependencia de estos de los recursos renovables y no de los que no son renovables".

Por tanto, la eficiencia del proceso en una PTAR tiene que ser evaluado desde una perspectiva sistémica, que tiene como objetivo la contabilización de todos los costos directos e indirectos relacionados tanto con las contribuciones humanas como con las naturales para llevar a cabo dicho proceso (Vasallo, *et al*.,2009). Es entonces el método del análisis emergético, una herramienta eficiente para evaluar la sostenibilidad de una PTAR (Odum, 1996); es una metodología que permite incorporar los servicios medioambientales (descomposición microbiana, dilución, cuerpos receptores, entre otros) dentro del análisis de un sistema completo; esto se debe a que la emergía considera todos los flujos directos e indirectos necesarios para alcanzar un cierto nivel de producción o mantener un servicio (Odum & Odum, 2003).

Este método es una evaluación integrada de los sistemas económicos, ecológicos, técnicos y energéticos, y ya ha sido exitosamente aplicado a la valoración de sistemas a diferentes escalas (Brown et al., 2012), entre los que se incluyen: evaluación de la sostenibilidad regional (Lei & Wang, 2008), valoración de la restauración de los ecosistemas (Conesa et al., 1998; Lu, Campbell, Li, & Ren, 2006), evaluación de la energía solar (Vassallo et al., 2009) y evaluación de la tecnología de las aguas residuales (Bjo & Geber, 2001; Siracusa & La Rosa, 2006), principalmente con el fin de utilizarlo como herramienta para la toma de decisiones ambientales.

El análisis emergético ha sido poco explorado en los sistemas de tratamiento de aguas residuales, esto se evidencia en los pocos estudios realizados referenciados en la bibliografía; posiblemente una de las causas reside en el hecho que la razón de ser de una PTAR es la misma independientemente del tipo de tratamiento que realice; es decir, por lo general todos los tipos de PTAR requieren de la misma clase de entradas de fuentes renovables, no renovables e importadas, y la calidad del producto generado (biosólidos) siempre se va a encontrar en el intervalo estándar establecido por la EPA, y por tanto, la diferencia en la cantidad de los insumos en el proceso, sea cual sea el tipo de tratamiento, va a ser despreciable. A continuación se describen los estudios que se han realizado al respecto

- En el estudio realizado por Bjo & Geber (2001), el método del análisis emergético se lleva a cabo para evaluar la generación de electricidad a partir de la digestión de los lodos generados en el tratamiento de las aguas residuales en una ciudad sueca,

comparando los diferentes tipos de recursos utilizados para la operación de una PTAR. Dicha PTAR consta de un tratamiento primario (tratamiento mecánico o proceso de presedimentacion), tratamiento secundario (estabilización de la materia orgánica) y la digestión anaerobia de los lodos generados durante el proceso (sólo una fracción es utilizada para la producción de biogás).

En esta investigación se discute la necesidad que se tiene de disminuir los recursos importados (F) para el funcionamiento eficiente de una PTAR, puesto que la eficiencia de una PTAR (y de cualquier otro proceso) se refleja en la capacidad que tiene el sistema para explotar los recursos renovables (N); a mayores valores de la relación R/F (índice de emergía renovable capturada) más sostenible es el proceso desde el punto de vista emergético. El estudio también incluye una evaluación de la cantidad de emergía asociada con la producción de las aguas residuales; la base del análisis sugiere que una gran cantidad de la emergía que está contenida en las aguas residuales es proporcional a la cantidad de recursos empleados para el tratamiento de las mismas y a los grandes efectos que tienen éstas sobre los ecosistemas circundantes donde se descargan las aguas residuales no tratadas. Simultáneamente, el estudio arroja que la cantidad de recursos naturales renovables son insignificantes comparándolo con los recursos importados para la operación de una PTAR, lo que se traduce en que no es rentable digerir los lodos producidos sólo con el fin de producir energía, es más eficaz comprar la energía a la red que la distribuye en la ciudad, de esta manera una PTAR sólo se justifica por la disminución de la carga ambiental al medio receptor, mas no por el rendimiento económico que genera su producto (lodos para la generación de electricidad). Es de resaltar que en el mismo se calcularon nuevas transformicidades, dado que en la base de datos con la que se cuenta no se encontraron datos adecuados disponibles.

- De igual manera Siracusa & La Rosa (2006), en el proyecto que presentan, aplican el método de la contabilidad emergética para valorar la viabilidad de crear un humedal para mejorar el rendimiento del proceso de purificación del agua residual en una PTAR convencional ya existente, ubicada en Sicilia; dicha planta sólo trata aguas residuales domesticas y aguas provenientes de la actividad agrícola. El sistema consta de un tamizador preliminar, un clarificador primario, dos tanques sépticos Imhoff, dos tanques de percolación, un biofiltro, un clarificador secundario y un tanque de cloración. La investigación se fundamentó en el hecho que a pesar que el agua es parte del capital humano, ésta lleva consigo valores emergéticos y monetarios como consecuencia del procesamiento que requiere para su purificación, de esta manera los autores calculan este valor emergético adicional y determinan así la viabilidad emergética de la construcción o no de un humedal a una PTAR ya existente, con base a la relación costo beneficio. El estudio arroja que la construcción del humedal a la PTAR no sólo conlleva a ahorros monetarios ya que reduce el consumo de electricidad, sino que también reduce la presión sobre el ambiente local, debido a que hay un aumento de la biodiversidad que sirve de base para muchos servicios ecosistémicos en los humedales y paisajes circundantes como son: la regulación biótica, la polinización, entre otros.

- Vassallo *et al.* (2009) realizan una evaluación preliminar de los costos medioambientales que conlleva el tratamiento de las aguas residuales en una PTAR ubicada en las costas de Liguria (Mediterraneo). Estos costos medioambientales se traducen en la necesidad de contabilizar dentro el análisis emergético los costos adicionales de la presión que se ejerce sobre el sistema natural receptor (costa de Liguria) cuando estas aguas tratadas son vertidas allí, porque a pesar de que son aguas tratadas están muy lejos de ser aguas purificadas libres de toda carga orgánica; es decir, la composición residual del agua descargada sigue conteniendo niveles significativos de materia orgánica que la naturaleza tiene que absorber.

En este orden de ideas, este estudio tiene como finalidad evaluar la eficiencia del proceso en términos de la emergía requerida por unidad de carga orgánica tratada analizando sólo las tres etapas de un proceso de tratamiento convencional (tratamiento primario, segundario, terciario y estabilización de los lodos mediante digestión anaerobia antes de darles su disposición final) y evaluar el trabajo adicional que tiene que hacer la naturaleza (fuente receptora) para completar el tratamiento de mineralización de la materia orgánica después que el afluente es liberado de la planta.

En esta investigación se logra un gran avance de la aplicación de esta metodología a las PTAR debido a que los autores incluyen dentro de los servicios ambientales el cálculo del consumo de oxígeno utilizado para la descomposición bacteriana durante la fase de descomposición aerobia, en estudios previos (Bjo & Geber, 2001; Geber & Bjo, 2002; Jiang, Chen, Zhou, Tao, Li, Yang & Chen, 2007; Siracusa & La Rosa, 2006) no se considera este ítem a la hora de realizar una valoración emergética a una PTAR. Se concluye que la mayor contribución emergética en el proceso se debe al flujo de entrada de las aguas residuales que llegan a la planta, el tratamiento de las aguas residuales es un proceso costoso emergéticamente que requiere grandes cantidades de recursos no renovables, pero estas cantidades continúan siendo bajas si se comparan con el contenido emergético de las aguas que se tratan, el consumo de oxígeno es el mayor aporte de recursos renovables de toda la emergía total y los materiales de construcción es el mayor aporte de los recursos importados no renovables.

- Geber & Bjo (2002) comparan y evalúan la sostenibilidad ecológica de tres sistemas de tratamiento de aguas residuales; un sistema de tratamiento de aguas residuales convencional (tres fases), un sistema de tratamiento mecánico y un sistema de tratamiento químico convencional complementado con la construcción de un humedal artificial y un sistema de tratamiento en un humedal natural, cuyo principal objetivo es ilustrar la relación entre la demanda de espacio, tiempo y la compra de insumos para los diferentes sistemas de tratamiento. En este estudio, la hipótesis es que la cantidad de emergía total usada en el proceso puede no diferir entre los tres sistemas de tratamiento, respecto a la relación entre la emergía renovable (medioambiental) y la emergía importada (no renovable), esto implica que existe una relación fija entre las sustituciones que forman los límites físicos, biológicos y tecnológicos de todas las actividades humanas.

Para poner a prueba esta hipótesis, se analiza la relación o proporcionalidad que existe entre los recursos renovables o servicios ecosistémicos y los recursos no renovables importados en los diferentes escenarios; llegándose a la conclusión que la emergía total por persona equivalente es similar en los tres sistemas de tratamiento de aguas residuales, y además no existe ningún equilibrio o proporcionalidad emergética entre el uso de recursos renovables y los recursos no renovables importados, pues un incremento en el uso de recursos renovables no dio lugar a una disminución de los recursos no renovables importados en términos de emergía por persona equivalente.

De esta manera, se evidencia como los estudios anteriormente mencionados han ignorado por completo el rendimiento global del proceso de tratamiento de aguas residuales, entendiendo como rendimiento global la valoración de un sistema completo de tratamiento de aguas residuales que incluye el sistema de tratamiento y la disposición que se le dan a los biosólidos generados en dicho proceso. A pesar que estos estudios fueron un buen comienzo para introducir el concepto de análisis emergético a la valoración de una PTAR, es necesario comenzar a hacer énfasis en las contribuciones del ecosistema natural al sistema de tratamiento de aguas residuales, la disposición de los subproductos generados y un control de los impactos ambientales y económicos generado por las emisiones del proceso (Zhou *et al*., 2010).

- En contraste, se cuenta con la investigación de Zhang *et al.* (2010), cuyo principal objetivo es la construcción del concepto "ecosistema de tratamiento de aguas residuales" que integra un sistema de tratamiento de aguas residuales y un sistema de disposición de los productos generados en dicho tratamiento; es decir, los autores pretenden colocar en un solo ecosistema simple la relación entre un subsistema de tratamiento de aguas residuales, un subsistema de disposición de las aguas tratadas y un subsistema de disposición de los lodos (compostaje) y evaluar la sostenibilidad de este ecosistema total mediante el método del análisis emergético. Simultáneamente se cuantificaron los impactos por las emisiones en términos de emergía y fueron integrados dentro de los indicadores emergéticos tradicionales (que no incluían los impactos ocasionados por dichas emisiones y la contribución emergética de los residuos generados en el proceso.

Los resultados indican que cuando en un sistema de tratamiento de aguas residuales se reutilizan tanto los residuos generados (biosólidos) como el agua tratada, se presentan una menor presión ambiental respecto a otro sistema donde no se hace ningún reuso; sin embargo, el desempeño económico en este primer caso se ve debilitado, pero a pesar de ello su sostenibilidad es en gran medida mayor que la del segundo escenario, por tanto el sistema de tratamiento de aguas residuales con reuso de agua y residuos debe optimizarse para mejorar su beneficio económico.

- (Chen, Chen, Zhou, Zhou, & Chen(2009) llevan a cabo un estudio comparativo entre las PTAR convencionales y la construcción de humedales (sistemas de tratamiento de aguas residuales artificiales). Se concluye que el sistema de humedales para el tratamiento de las aguas residuales presenta menos requerimientos energéticos y menos

costos económicos para la construcción, funcionamiento y mantenimiento respecto a una PTAR convencional, aparte de ello ejerce una menor presión sobre el ambiente a pesar que presenta una baja eficiencia de la remoción de los residuos, lo que implica que el sistema de humedales posee más ventajas frente a los sistemas de tratamiento de aguas residuales convencionales. Esto no significa que este sistema de humedales sea el sistema óptimo, pues esta decisión depende de múltiples factores como los flujos, calidad del agua, condiciones de terreno y capital disponible, siendo aptos sólo para ciudades o pueblos pequeños donde los terrenos son más baratos y las aguas residuales generalmente provienen principalmente de la actividad agrícola en comparación con las domesticas e industriales que tienen mayor cantidad de contaminantes.

3.2. Aprovechamiento de biosólidos para uso agrícola

Hasta la fecha no hay ningún estudio referenciado en el que se apliquen el método del análisis emergético a la valoración de la disposición o aprovechamiento de los lodos como fertilizantes de suelos silvopastoriles; aunque hay estudios en donde se evalúa la sostenibilidad del uso de fertilizantes en suelos, es imposible igualarlo a la alternativa seleccionada; pues la dinámica del sistema es completamente diferente, dado que los lodos, a diferencia de los fertilizantes químicos o agroecológicos, contienen (así sea en concentraciones mínimas, establecidas por la EPA) trazas de metales pesados que restringen su aplicación bajo unas condiciones estándares, lo que conlleva a un comportamiento diferente del ecosistema estudiado. Lo más próximo a esto que se encuentra referenciado en bibliografía se centra especialmente en los sistemas de pastoreo, en el uso de fertilizantes químicos y naturales (siendo mucho más sostenibles los naturales), en la restauración de suelos y en la degradación de los mismos a causa de las actividades económicas. A continuación se incluyen algunos estudios.

- Dado que una de las principales actividades económicas en Argentina subyace en la exportación de carne ganadera, este sector requiere aumentar su productividad y mejorar la calidad del producto, por lo que Rótolo, Ridberg, Lieblein & Francis (2007) evaluaron la sostenibilidad a largo plazo de dos sistemas de pastoreo mediante los índices de sostenibilidad, centrándose en todas las entradas energéticas al sistema y en el valor energético de los productos. En este caso, una adecuada gestión debe apropiar alternativas que conduzcan a la preservación del suelo y al pasto como recurso producido

El primer sistema es pasto natural (pasto que no se ha sembrado) y el segundo sistema es pasto sembrado. Se concluye que las precipitaciones son la principal contribución emergética para los dos sistemas. Para el pasto natural, el 85% de todas las entradas son fuentes renovables y un 4% son fuentes importadas relacionadas a las bajas cantidades de fertilizantes que se aplican, en contraste con el pasto sembrado que contiene un 41% de recursos importados asociados con la mano de obra, mayor cantidad

de fertilizantes, combustibles, entre otros. De esta manera, los índices arrojan que ambos subsistemas son sostenibles a largo plazo, siendo más sostenible el pastoreo natural porque no solo tiene una baja dependencia de los recursos importados, sino porque presenta bajas perdidas de suelo por erosión. En cambio, el sistema de pasto sembrado puede llegar a ser vulnerable en un futuro con impactos negativos al ambiente por la alta dependencia de recursos importados.

- Agostinho *et al*., (2008) asocian el análisis emergético con la herramienta del sistema de información geográfica (SIG), con el objetivo de comparar dos modelos de producción en una granja; el primer modelo es de producción química (fertilizantes químicos y sintéticos) y el segundo es de producción ecológica (fertilizantes naturales como compost). El SIG permite calcular de manera precisa las pérdidas del suelo ocasionado por el sistema de siembra, pérdida que es la principal contribución de fuentes no renovables en un sistema agroecológico; al mismo tiempo, permite estimar la cantidad de aguas infiltradas o percoladas en el suelo, ya que influye bastante en la productividad de los sembrados.

En este estudio se presenta algo muy interesante, ya que a todos los tipos de fuentes (renovables, no renovables e importadas) se le asocia un porcentaje de renovabilidad, ya que un recurso renovable (R) no es 100% renovable; lo mismo ocurre con los otros dos tipos de fuentes que poseen algún porcentaje de renovabilidad (es decir, no son 100% no renovables ni 100% importadas); esta característica hace que estos recursos sean más sostenibles. Simultáneamente desarrollan un diagrama emergético ternario (Giannetti, Barrella, & Almeida, 2006) para facilitar la toma de decisiones ambientales con base a la emergía y que se desarrolló en la presente investigación.

Los resultados arrojan que el modelo agroecológico es mucho más sostenible en comparación con el modelo químico, pues presenta una alta eficiencia de transformación de la energía (baja transformicidad), baja dependencia de recursos económicos (11%), alta sostenibilidad, con un factor de renovabilidad del 60%, y baja carga ambiental, por lo que presenta un mayor índice de sostenibilidad (alto rendimiento económico, baja carga ambiental).

- En este orden de ideas, se continúa con la evaluación de la sostenibilidad de dos actividades agrícolas: el pastoreo y el cultivo de suelos. (Zhang *et al.* (2007) centran su estudio básicamente en la identificación de la eficiencia de producción de los dos sistemas y de la sostenibilidad ambiental asociada principalmente a la degradación o pérdida de productividad del suelo por dichas actividades, mediante la utilización de los índices convencionales explicados en capítulos anteriores y nuevos indicadores propuestos, siendo el principal el Costo Emergético del Suelo (SEC) (índice aplicado sólo para sistemas agrícolas), definido como la emergía asociada a la pérdida de suelo (fuente no renovable) dividido por la emergía total.

Se concluye entonces que la práctica de siembra de cultivos exhibe una mayor tasa de pérdida de suelo que el sistema de pastoreo, dado que la actividad pastoril presenta menos intensidad de extracción, pues las tierras de pastoreo no tienen una actividad continua con el fin de que se rehabiliten periódicamente.

- Como consecuencia de la alta densidad poblacional en China, hay serios problemas de degradación de suelos; la medida de mitigación que se tomó fue la agroforestación, que consiste en sembrar cuatro diferentes especies forestales que le provea nutrientes al suelo. Para evaluar los beneficios ecológicos y económicos de este modo de restauración, Lu *et al*., (2006) hallaron cuatro nuevos índices diferentes a los tradicionales: índice de restauración emergética (ERR), formulado para mostrar la eficiencia de la restauración de suelos mediante la agroforestación; producto económico ecológico (EEP), definido para considerar el cambio de la emergía interna asociado al capital natural y el rendimiento emergético de los productos generados después de la recuperación del suelo; beneficio emergético (EBR), formulado para mostrar el cambio de la emergía neta de los productos de salida y el capital natural como función de una unidad adicional de recursos importados y el beneficio emergético después del cambio (EBE), enseña la emergía que se puede comprar con el dinero recibido por el producto generado en el sistema.

El índice de sostenibilidad del sistema de agroreforestación fue de 16, demostrando que el sistema produce grandes beneficios ecológicos y económicos, y por lo tanto esta alternativa es muy apropiada para la recuperación de suelos degradados.

(Xie, Ping, Li, Gao, Dong, Fei, Wu, & Guang, (2010) aplican métodos de modelamiento junto con el análisis emergético para comprender la variación del capital natural y de los servicios ecosistémicos en respuesta de las actividades económicas. Es así como se ejecutó una simulación de 35 años (1990-2025) para un sistema de pastizales con ganadería intensiva, en el que el capital natural está asociado con el contenido de materia orgánica, nutrientes, depósitos de agua, absorción de dióxido de carbono (CO_2) y liberación de oxigeno (O_2), y los servicios ecosistémicos con el suministro de productos para alimentación humana, animal y conservación del suelo.

El modelamiento arroja que el límite máximo para la ejecución de actividades ganaderas en los pastizales se alcanza en el año de 1994; es decir, el capital natural y los servicios medioambientales de este sistema se empezaron a reducir sustancialmente en este año, ocasionado por la ganadería intensiva, y por tanto esta práctica no es sostenible porque excede la capacidad de renovabilidad del sistema.

3.3. Tratamientos térmicos como método de recuperación de la energía de los biosólidos

La alternativa seleccionada (referenciada en la bibliografía como la–adecuada desde el punto de vista ambiental y económico) se refiere al aprovechamiento de los lodos para recuperación energética (producción de energía eléctrica y térmica) mediante gasificación por lecho fluidizado. Emergéticamente no se ha valorado la sostenibilidad de este proceso, sólo se ha realizado un estudio en el que utilizan biomasa para la producción de energía eléctrica mediante incineración; aunque el producto final es el mismo, los procesos son totalmente disímiles, pues los insumos (fuentes renovables, no renovables e importadas) varían significativamente, al igual que las emisiones de compuestos contaminantes a la atmósfera (siendo más significativo en el proceso de incineración y mínima en el de gasificación) y la cantidad y calidad de generación de residuos difieren sustancialmente, lo que conlleva a un análisis de sostenibilidad diferente.

De ahí en adelante se presentan ilustraciones de plantas de cogeneración de calor y electricidad, siendo muy poco expandido, pues es muy similar a la valoración emergética de una PTAR donde la diferencia de la cantidad de los insumos en el proceso, sea cual sea el tipo de tratamiento, va a ser despreciable, arrojando un mismo índice de sostenibilidad.

- El estudio de (Sha & Hurme (2012) es lo más análogo (proceso de generación de electricidad) a la alternativa de disposición de los lodos seleccionada (recuperación de energía o generación de electricidad mediante un proceso de gasificación por lecho fluidizado).

Se presenta una comparación emergética de un proceso de cogeneración de calor y electricidad a partir de biomasa (que no son biosólidos) como recurso renovable y de carbón como recurso no renovable. Se muestra como la utilización de biomasa para dicho fin es 3.3 veces emergéticamente más eficiente que la utilización de carbón. El índice de sostenibilidad muestra una tendencia similar, pues para l biomasa es 15 veces mayor que el proceso de cogeneración con carbón. De esta manera se reitera lo que se ha discutido en capítulos anteriores: la sostenibilidad de un proceso está en función del porcentaje de recursos renovables utilizados en el mismo, siendo más sostenible aquel proceso que tiene una mayor cantidad de estos recursos. Las entradas que aportan más emergía al proceso son: combustible, transporte y oxígeno; aproximadamente entre un 80 y 90% para cada proceso, siendo la menor entrada emergética el recurso humano para ambas alternativas.

- Lo anterior es corroborado por Peng, Lu, Wu, Campbell, Zhao, Zou, Chen & (2008); en un estudio similar (planta combinada para la cogeneración de calor y electricidad) resaltan como las plantas que utilizan carbón como materia prima presentan una baja

eficiencia energética, una alta carga ambiental y una baja sostenibilidad, en comparación con los sistemas basados en energías renovables.

- Simultáneamente Zhang & Long (2010) hacen una compilación de la sostenibilidad de diferentes aplicaciones o usos que se les puede dar a la biomasa como recurso renovable. Ambos arrojan que el índice de rendimiento emergético (EYR) es mucho más bajo en comparación con los procesos de extracción de combustibles fósiles, debido a que estos métodos necesitan continuamente la adquisición de nuevas. Así mismo, las transformicidades de estas dos prácticas son más bajas respecto al proceso de producción de bioetanol y biodiesel, significando que estos dos últimos demandan grandes cantidades de recursos ambientales respecto a los primeros.

Finalmente, se analiza la producción de electricidad por vía térmica (utilizando como materia prima carbón vegetal) y fotovoltaica, donde el índice de rendimiento energético (EYR) es mayor para el primer proceso que para el segundo, contribuyendo a un mayor beneficio económico en el proceso térmico dado que hay una mayor explotación de los recursos renovables (Brown *et al.,* 2012) respecto al proceso fotovoltaico.

4. Metodología

Con el fin de lograr el objetivo propuesto “Evaluar la actual disposición de lodos generados en una PTAR en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá mediante el método del análisis emergético (ambiental, energético y económico), comparando la alternativa actual de disposición y otra opción referenciada como adecuada en la literatura” se presenta de manera detallada la metodología que se usó a partir de la apropiación que se hace de la empleada en otros trabajos similares.

Esta metodología sirve de guía no sólo para evaluar y comparar dos alternativas de disposición final de los biosólidos estabilizados producidos en una PTAR, sino también para hacerlo con otras opciones prometedoras que no han sido implementadas o aplicarla en otros sistemas de interés. Para la construcción de la metodología presentada en este capítulo se toman como base los trabajos de Odum (1996) y Lomas et al. (2007).

4.1. Evaluación de la aplicación del método del análisis emergético a una PTAR mediante revisión bibliográfica.

Esta investigación está dirigida a analizar mediante el método emergético la mejor disposición (entre dos alternativas) de los biosólidos producidos en una PTAR, más no a aplicar el método para evaluar la sostenibilidad de una PTAR completa. En primera instancia, se identifica el tipo de PTAR y las características de las aguas que en ésta se tratan y que originan los biosólidos; pues de éstas depende la calidad de los mismos y por ende su adecuada disposición. El primer objetivo de esta investigación es el de identificar las características de los biosólidos a tratar. Simultáneamente; dado que esta investigación es pionera en el desarrollo y aplicación del método del análisis emergético en Colombia y no hay referencia alguna en la literatura de la utilización de esta metodología para evaluar la sostenibilidad de las dos alternativas de disposición planteadas, esta primera actividad permite conocer y aclarar los principios básicos del método desarrollado mediante la aplicación del mismo a una PTAR.

- Dado que esta investigación se centra en el aprovechamiento de los biosólidos generados en una PTAR del area Metropolitana del Valle de Aburrá, se selecciona la

única PTAR secundaria, donde se tratan las aguas residuales domesticas e industriales del sur del area Metropolitana.

- Una vez seleccionada la PTAR y conocido su proceso de operación para la obtención de los biosólidos, a partir de estudios ya realizados (Bjo & Geber, 2001; Vassallo et al., 2009; Zhang *et al*., 2010; Zhou *et al*., 2009) de la aplicación de este método para la evaluación de la sostenibilidad de una PTAR cuyo producto final es la generación de biosólidos, se apropió el método para la planta previamente seleccionada, determinando las fuentes renovables, no renovables y la fuentes importadas que se requieren en cada etapa del proceso para la generación de los biosólidos. El resultado de esta apropiación, es el diagrama emergético para dicha planta, que permite entender la interacción entre las entradas anteriormente mencionadas, mas no se calculan las entradas ni índices emergéticos dado que no es el objetivo de esta investigación; por tanto, los índices emergéticos son tomados de la bibliografía, bajo la consideración de que el principio básico de una PTAR es el mismo independientemente del tipo de tratamiento que realice, pues todos los tipos de PTAR requieren de la misma clase de entradas de fuentes renovables, no renovables e importadas, y tienen aproximadamente la misma proporción entre sí, y por lo tanto la diferencia en la cantidad de los insumos en el proceso, sea cual sea el tipo de tratamiento, va a ser despreciable (Bjo & Geber, 2001; Geber & Bjo, 2002; Siracusa & La Rosa, 2006; Vassallo et al., 2009; Zhang *et al.*, 2010).
  Esta valoración de la aplicación del análisis emergético a la PTAR y los resultados de la investigación permiten la extensión de la aplicación del método para la valoración del aprovechamiento de los biosólidos que se generan.

- Aunque esta actividad no está contemplada en este primer objetivo, se aprovecha el resultado anterior para justificar mediante la comparación energética, exergética y energética, la razón de ser y principio básico de una PTAR y extenderla al análisis de la disposición de los biosólidos, pues se está dejando incompleto el tratamiento de las aguas al no contemplar el tratamiento de los biosólidos generados en la PTAR. Así pues, con ese ítem se logra apropiar el concepto de energía, exergía y emergía.

- Los datos energéticos son tomados de la PTAR seleccionada, y los datos emergéticos son referenciados de los estudios ya mencionados, dado que la PTAR referenciada en la bibliografía es el mismo tipo de PTAR que fue seleccionada en este estudio; además, todas las PTAR municipales que funcionan bajo el marco regulatorio europeo convergen en el mismo principio básico de funcionamiento, independientemente de la diferencia de los valores energéticos (y por tanto exergéticos), y que se evidencia mediante el método emergético. Así mismo, se trata de buscar acoplar el tratamiento de los biosólidos al de las aguas en la PTAR, pues al fin y al cabo los biosólidos son productos de la planta que los genera.

4.2. Desarrollo de la metodología emergética

El cálculo de los índices emergéticos es fundamental para alcanzar el segundo objetivo específico, luego estos se usan como criterio de comparación de las dos alternativas de disposición de los biosólidos en términos de sostenibilidad. Esta sección permite desarrollar el segundo objetivo especifico de esta tesis, abordando de manera sistemática y exhaustiva la metodología emergética para cada una de las alternativas estudiadas, con base a los estudios reportados sobre el tema y al proceso descriptivo presentado por Odum (1996) finaliza con el cálculo de los índices emergéticos, los cuales son utilizados para analizar la sostenibilidad de cada sistema de disposición, como se muestra a continuación. La metodología presentada es consecuencia de la adoptada en otros procesos, pues no se encontró estudio alguno sobre la aplicación del método del análisis emergético para las dos opciones a evaluar.

En primera instancia, se definen detalladamente las dos alternativas para el aprovechamiento de los biosólidos generados en una PTAR en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Como alternativa actual de disposición se tomó aquella que es practicada en este momento en la PTAR seleccionada y la disposición a comparar radica en aquel aprovechamiento que es referenciado en la bibliografía como adecuado (desde el punto de vista ambiental y económico).

4.2.1. Desarrollo de la aplicación de la metodología emergética al aprovechamiento de los biosólidos generados en una PTAR

- Se evalúo el estado en el que se desea estudiar el proceso, con base a los objetivos de la investigación, debido a que el diagrama de flujo debe referirse siempre a un sistema superior. Un estado constituye una unidad diferenciada territorial, social y económicamente, para la cual existen numerosas bases de datos tanto sobre sus componentes socioeconómicos como sobre sus componentes ambientales (Odum, 1996). Se debe delimitar la unidad con fronteras definidas (especialmente en el terreno socioeconómico, límites espacio-temporales) en la que se establecen los intercambios de ese sistema con sus alrededores ya que no se encuentra aislado. Los sistemas de estudio son delimitados con base a la información suministrada por la PTAR y las dos alternativas de aprovechamiento seleccionadas. Se define un sistema de aprovechamiento de los biosólidos para cada una de las dos alternativas seleccionadas en la etapa anterior a evaluar.

- Una vez delimitados los sistemas de estudio, se procede a la recolección, revisión y actualización de los datos ambientales y socioeconómicos para cada una de las alternativas. Estos datos se clasifican en **R** (recursos renovables), **N** (recursos no

renovables), **F** (recursos o servicios importados o comprados) (Álvarez, Lomas, Martín, Rodríguez & Montes, 2006) como se muestra en la Figura 4.1.

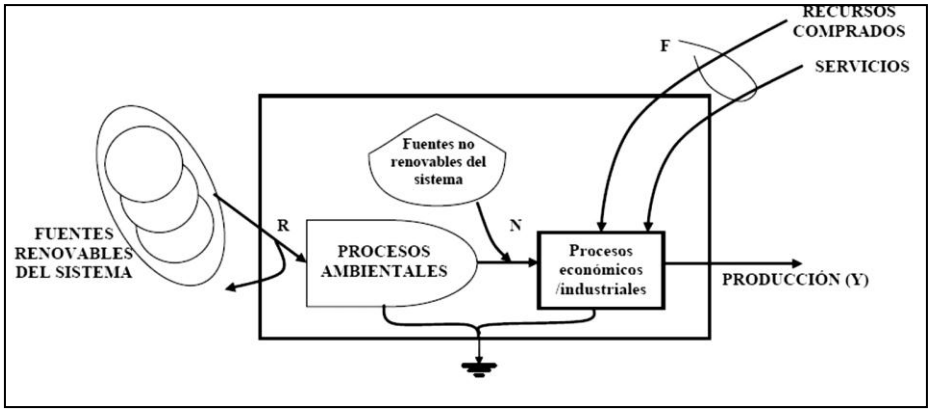

Figura 4.1 Interacción de todas las entradas (R, N, F), generan una salida ("output") del sistema Y.

Fuente: Tomado de Álvarez et al., 2006.La síntesis emergética ("emergy synthesis"). Integrando energía, ecología y economía.

- Para el actual aprovechamiento de los biosólidos, la información se toma de un estudio (Zapata, Osorio, Berrio, & Sotelo, 2011), en el que se ve la necesidad de modelar alguno de ellos (acumulación de metales pesados en el suelo como consecuencia de la aplicación de los biosólidos como fertilizantes). En el caso de la alternativa referenciada como la más correcta en la literatura, la mayoría de los datos fueron teóricos y otros se tomaron de balances de materia y energía (Ver Anexo 5.6).

- Ya definido y delimitado el sistema total y subsistemas con fronteras concretas, ahora se procede a realizar el diagrama de flujos del sistema que se tiene como objetivo para cada alternativa de disposición a evaluar. Un diagrama del sistema emergético se dibuja utilizando los símbolos del lenguaje de emergía de los sistemas ecológicos (Odum, 1996) para representar gráficamente los componentes ecológicos–energéticos, el sector económico, los recursos utilizados y la circulación de dinero a través del sistema.

- En este paso se considera que existe una dimensión perceptible o fenosistema (clima, vegetación, suelo, agua, aire, etc.) y una dimensión oculta o criptosistema; es decir, un conjunto de interrelaciones y procesos biofísicos (flujos de energía y materiales) que no se perciben directamente pero que determinan la identidad y arquitectura de ese sistema.

- A partir de un modelado ecológico del paisaje se puede hacer visible lo invisible y establecer, según el objetivo de estudio, las características definitorias del sistema. Es decir, en los diagramas emergéticos se agrupan los datos disponibles, permitiendo determinar los flujos e interacciones en el sistema, destacando los más relevantes y poniendo de manifiesto vacíos de información (interacción entre los componentes en

términos energéticos). El modelado se compone de las siguientes partes (Lomas et al., 2007).

a) Una vez establecidos los límites del sistema se definen las principales entradas y salidas de energía del mismo, y se clasificaron según su naturaleza (biogeofísca, económica, humana, etc.), de izquierda a derecha en orden de transformicidad creciente alrededor del símbolo de límites del sistema.
b) Se precisan los componentes internos del sistema y sus relaciones tanto con las entradas y salidas de materia y energía como entre ellos, teniendo cuidado de implicar todos los elementos del sistema que regulan los procesos que constituyen el funcionamiento del mismo.
c) Se incluyen los flujos de dinero correspondiente al uso económico que puedan tener algunos flujos del sistema, así como las entradas de dinero que mueven algunos de los componentes socio-económicos del mismo.
d) Se considera la degradación correspondiente a la segunda ley de la termodinámica (no existe una eficiencia del cien por ciento en el proceso de transformación de la energía).
e) Se simplifica el diagrama según los objetivos del estudio mediante una agregación de categorías al nivel de detalle que se quiera llevar a cabo.

- Con el fin de lograr el segundo objetivo específico y para que el sistema comience a ser evaluado, se prosigue con la construcción de una tabla de síntesis emergética que se genera a partir de los datos del diagrama de flujo. En ella se calculan las cantidades de emergía de los distintos componentes y sus valores monetarios emergéticos (valor macroeconómico). En la Tabla 4.1 se muestra un ejemplo de la construcción de dicha tabla (Álvarez, 1993) donde todos los bienes son convertidos en unidades de energía a excepción de aquellos datos tales como minerales y otros para los cuales existen valores de transformicidades de acuerdo a su masa.

Tabla 4.1 Componentes básicos de la síntesis emergética

Nota	Ítem	Unidades (j, kg, $)	Datos (unidades/año)	Transformicidad (seJ/unidad)	Emergía solar (seJ/año)	Valor macroeconómico Em$ ($/año)
	Recursos Renovables					
1	- Sol	J	**A**	**B**	**A*B=C**	**C/ emergía**
3	- Lluvia	J	xx.x	xx.x	Em_2	$Em_2/EM\dot{R}$
4	- Viento	kg	xx.x	xx.x	Em_3	Em_3/EMR
	Recursos No Renovables					
6	-Petróleo					
7	-Minerales					
8	-Suelo					
	Recursos Importados o Comprados					
9	- Maquinaria					
10	-Mano de obra					
11	- Combustible					
n		**J**	**xx.x**	**xx.x**	**Em_n**	**Em_n/EMR**
Salidas del Sistema						
12	**-Cosechas**	J o kg	$XX.X$	$\sum_n^1 Emi/_{xx.x}$	$\sum_n^1 Emi$	$\sum_n^1 Emi/_{PIB}$
13	**- Productos manufacturados**					
	EMERGÍA TOTAL				$\sum_n^1 Emi$	
	Total Producto		$XX.X$			
	Transformidad del Producto			$\sum_n^1 Emi/_{xx.x}$		
	EMR					
	Precio del producto o salida					

En la Tabla 4.1, se agrupan los distintos componentes del sistema, y se puede ver cómo se manejan desde fuentes de energía renovable (como el sol o la lluvia) hasta recursos no renovables (como petróleo, suelo, minerales) o componentes importados (como maquinaria, combustible, mano de obra, etc). Dicha tabla está formada por una serie de campos como se mostró anteriormente.

La primera columna “nota” se refiere al orden en que están colocados cada uno de los flujos. La segunda columna es el nombre del “ítem” o flujo que se evalúa y que figura, con la simbología correspondiente, en el diagrama de flujos; además, en esta columna se clasifica cada flujo como recurso renovable, no renovable e importado o comprado, como ya se describió en capítulos anteriores.

En la tercera columna “unidad” figuran las unidades correspondientes a cada flujo evaluado ya sea en joule, gramo o dólares, si se habla de flujos energéticos, másicos o monetarios respectivamente. La cuarta columna “datos” contiene los valores de los cálculos que se elaboran para cada flujo, para cuyo cálculo se emplearan las fórmulas señaladas en Odum (1996).

Todos estos factores tan dispares van a tener unas unidades comunes estandarizadas; es por ello que en la quinta columna “transformicidad” se situó la emergía por unidad o lo que se conoce como factor de transformicidad (transformicidad o energía específica), que transforma las cifras de la cuarta columna en las cifras de la sexta columna, que ya son referidas a emergía solar. Se emplean las transformicidades previamente calculadas y tabuladas para cada flujo en estudios anteriores. Evidentemente, existe una gran incertidumbre en el uso de transformicidades previamente calculadas en otros lugares y bajo otras condiciones para el análisis de sistemas propios. No obstante, se utilizaron las transformicidades halladas en aquellos países cuyas características ambientales, estacionales geográficas son semejantes a las de nuestro país y sean similares al sistema de estudio.

Posteriormente, en la sexta columna se calculó la “Emergía” de cada flujo para tenerlos expresados en unas unidades comunes y estandarizadas (la cantidad de energía total expresada en joules solares necesaria para crear cada uno de ellos), mediante el uso de estas transformicidades, pues la emergía de cada flujo es igual a la energía, masa o dinero por su transformicidad. De esta manera se tienen todos los flujos en unidades comparables, ya que se ha ponderado la distinta calidad de cada energía mediante el uso de transformicidades.

Finalmente, en la séptima columna se calcula el denominado “valor macroeconómico”, o cantidad de actividad económica que se mueve debido a un determinado flujo o reserva de emergía, y que se calcula dividiendo su emergía por el EMR. El EMR o relación emergía-dinero, es la emergía que se puede comprar en un determinado país por unidad de dólar en un año especifico (en el que se está realizando el estudio) y se calcula dividiendo el consumo anual de emergía de un país por el PIB del año en consideración.

Es así como, en teoría, el valor económico es el dinero que valdría comprar esa emergía en un determinado país y año, siendo útil en la toma de decisiones y permitiendo expresar los resultados en unidades más comprensibles.

La asociación mundial de emergístas aún no ha calculado el EMR para Colombia. Para los únicos países de Suramérica que está calculada esta relación emergía-dinero es para Chile, Ecuador y Brasil, por lo que para este estudio se seleccionó el EMR de Ecuador, dada la similitud que tiene respecto a Colombia en cuanto a la productividad económica y otrascaracteristicas sociales. La anterior suposición puede incurrir a errores solo en el resultado concerniente al EER. Es decir, usando el EMR para Ecuador no es un valor influyente en la comparación de la sostenibilidad de las dos alternativas valoradas, pues como se dijo anteriormente, la comparación de las dos opciones se lleva a cabo mediante el uso de los índices de sostenibilidad, y éstos no requieren del EMR para su cálculo. El cálculo de los índices comparativos se concibe con la información proporcionada hasta la sexta columna sin llegar al valor de la séptima columna.

Las últimas filas se reservan para la suma de la emergía total del sistema, que es igual al contenido emergético del producto obtenido después de utilizar los biosólidos para cada una de las alternativas de disposición final; también se disponen los cálculos relativos a la transformicidad de dicho producto, a la relación emergía-dinero y al precio al cual se vende comercialmente el producto obtenido.

Con esta tabla se tiene, por tanto, una contabilidad[8] (valor y precio estimativo del mismo) de todos los componentes del sistema ambiental analizado (Odum, 1996). Como resultado de este procedimiento se tiene un conjunto de índices y coeficientes adecuados para la formulación de políticas y toma de decisiones ambientales (Brown and Ulgiati, 2004).

Una vez obtenidos los datos emergéticos, se procede a calcular los índices emergéticos descritos detalladamente en el marco teórico, que proporcionan información sobre diversas características del sistema estudiado. Estos índices permiten establecer comparaciones entre las dos alternativas de disposición de los biosólidos evaluadas; por tanto, sirven de apoyo a la gestión y evaluación de la sostenibilidad del sistema dentro de los criterios del método (Brown et al., 2012; Cao & Feng, 2007).

[8] Los cálculos se llevaron a cabo en Microsoft Office Excel 2007

4.3. Comparación de las dos alternativas de aprovechamiento

Por último mediante la elaboración de los diagramas ternarios desarrollado por Giannetti et al., (2006), se concluye cual es la opción correcta para la gestión de los biosólidos producidos en una PTAR para darles una salida sostenible, entre las dos alternativas seleccionadas: sistema de recuperación energética de los biosólidos mediante gasificación por lecho fluidizado y sistema de aplicación de los biosólidos en suelos silvopastriles como fertilizantes.

Es así como, mediante la toma de decisiones ambientales, se selecciona aquella alternativa de disposición final que es “aceptable”; es decir, aquella disposición que es “energéticamente aprovechable”, “económicamente rentable” y “ambientalmente amigable”, teniendo los escenarios posibles siguientes: el primero es que ninguna de las dos alternativas de disposición final sea sostenible, por lo que se elige la menos insostenible: el segundo escenario es que alguna de las dos opciones es sostenible, seleccionándose como correcta aquella que arroja un índice de sostenibilidad favorable, y por último se tiene el escenario en donde los dos modos de disposición son adecuados o sostenible, por lo que se elije el mejor.

Simultáneamente, este último objetivo específico refleja si el criterio de selección para la alternativa referenciada en la bibliografía como la adecuada (para el uso final de los biosólidos) es el más apropiado o no, dado que existe la posibilidad que a pesar que dicha alternativa sea referenciada como la adecuada desde el punto de vista ambiental y económico (de manera independiente y por tanto la mas recomendada por los investigadores), emergéticamente no sea sostenible.

De esta manera, evaluando y analizando los valores de los índices anteriormente calculados para cada alternativa de disposición final de los biosólidos y comparándolos entre ellas, se corrobora si la actual alternativa de disposición final utilizada en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá es o no adecuada comparada con la alternativa referenciada en la bibliografía como la adecuada desde el punto de vista ambiental, energético y económico de manera simultánea, conjunta e interrelacionada.

El desarrollo de estos objetivos específicos conlleva a comprobar la hipótesis de este estudio: “el método del análisis emergético permite comparar dos alternativas de disposición, integrando el aspecto energético, económico, y ambiental”; es decir, a concluir si el método del análisis emergético sirve como una herramienta para valorar la sostenibilidad entre dos alternativas estudiadas.

5. Resultados y análisis

5.1. Evaluación emergética de una PTAR

Como se trató en capítulos anteriores, es necesario conocer el tipo de PTAR y las características de las aguas que en ésta se van a tratar, pues de estas depende la calidad de los biosólidos y por ende su adecuada disposición. Es así como en primera instancia se selecciona una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales secundaria donde se tratan tanto aguas residuales domesticas como industriales.

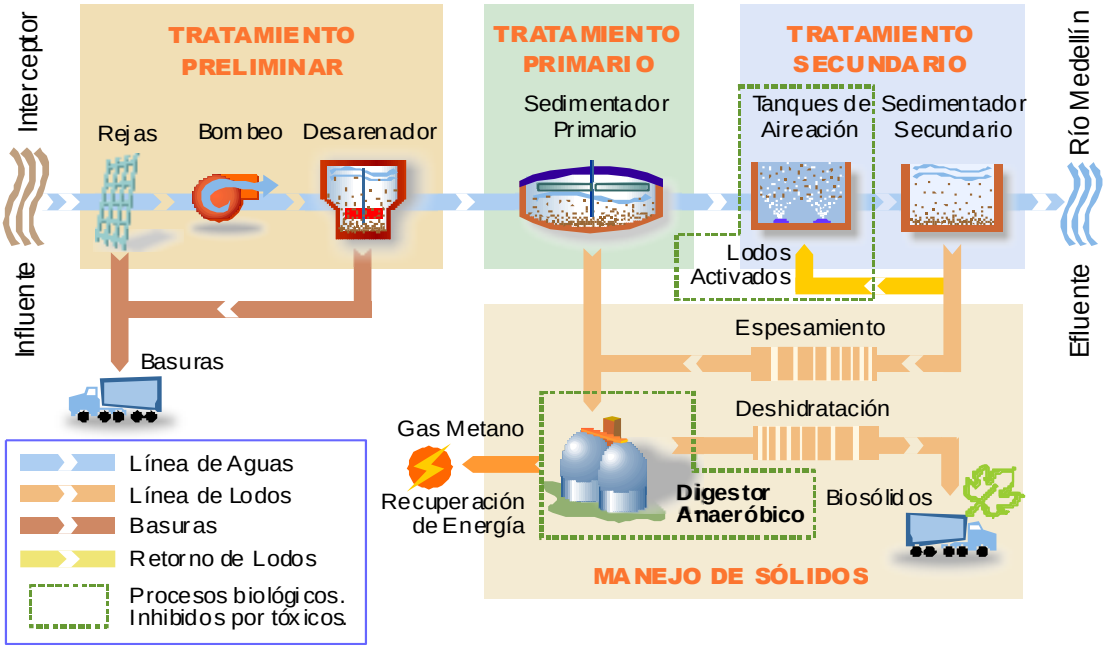

Figura 5.1 Proceso de depuración de las aguas residuales en la PTAR seleccionada

Fuente UPB, Seminario Internacional de Biocombustibles y Energías Renovables (2008)

En la Figura 5.1 se muestra el proceso que atraviesan las aguas a tratar desde la entrada del afluente hasta la salida el efluente en la PTAR seleccionada, por el cual se generan los biosólidos para luego darles una correcta disposición, objeto de estudio de esta investigación. Las aguas residuales son llevadas a la PTAR, pasan a través de rejas a un tanque desarenador, donde los materiales grandes y pesados son removidos y tratados como basuras. Una vez que las aguas son sometidas a esta primera filtración, pasan a un segundo proceso lento donde los materiales sólidos pequeños pueden asentarse; este proceso es conocido como sedimentación primaria. Estos sólidos pequeños son enviados por otra corriente del proceso al digestor anaeróbico, en donde se da la desintegración y descomposición de la materia orgánica.

Posteriormente el agua residual que pasa a través del primer proceso de clarificación es tratada en tanques de aireación con microorganismos aerobios los cuales consumen los nutrientes y materia orgánica presentes, a la vez que forman una masa creciente y activa de nuevos microorganismos. Cumplido su trabajo, una parte de los microorganismos deben ser removidos del sistema de la misma manera como se hizo con las materias sólidas, proceso conocido como sedimentación secundaria; la parte restante se recicla como lodos activados de retorno. El lodo que resulta del proceso es enviado al digestor anaerobio donde estabilizado generando a la vez gases ricos en metano, aproximadamente en un 65% de su composición. El producto que resulta de esta digestión anaerobia tiene un alto valor ya sea como nutriente y acondicionador de terrenos o para ser utilizado con fines energéticos, y es conocido como biosólido.

En este proceso específico, el biosólido es sometido a un proceso de deshidratación mecánica, con el fin de retirar la humedad para poder ser aprovechado, sin embargo previo a este proceso se le debe aplicar un polímero catiónico que capture los sólidos y facilite su deshidratación. Con estos tratamientos se alcanza a obtener un biosólido con un porcentaje de sólidos mayor al 25%. El biosólido deshidratado es almacenado en silos de almacenamiento hasta que puedan transportase por camiones a lugares aptos para su aplicación. La composición elemental de dichos biosólidos se da a continuación en la Tabla 5.1

Tabla 5.1 Análisis elemental de los biosólidos

Elemento	**Fracción**
Carbono (C)[1]	0.12
Hidrogeno molecular (H)[2]	0.056
Nitrogeno molecular (N)[2]	0.1
Azufre (S)[2]	0.001
Cloro (Cl)[2]	0.001
Metales pesados [1]	0.003
Ash[1]	0.12

[1] Datos suministrados por la PTAR seleccionada.

[2] Datos tomados de Giannetti *et al. A combined tool for environmental scientists and decision makers: ternary diagrams and emergy accounting*, (2006).

La estrategia de una PTAR es maximizar la recuperación de energía y materiales mediante el aprovechamiento de los biosólidos generados, mientras se minimiza la cantidad de emisiones y residuos generados al ambiente. Por esta razón, un sistema de tratamiento de aguas residuales no puede tomarse como un sistema aislado, sino más bien como un sistema holístico formado por un sistema de aguas residuales como tal, un sistema de disposición de las aguas tratadas y un sistema de disposición de lodos, dando como resultado un sistema de tratamiento de aguas residuales total como muestra la Figura 5.2.

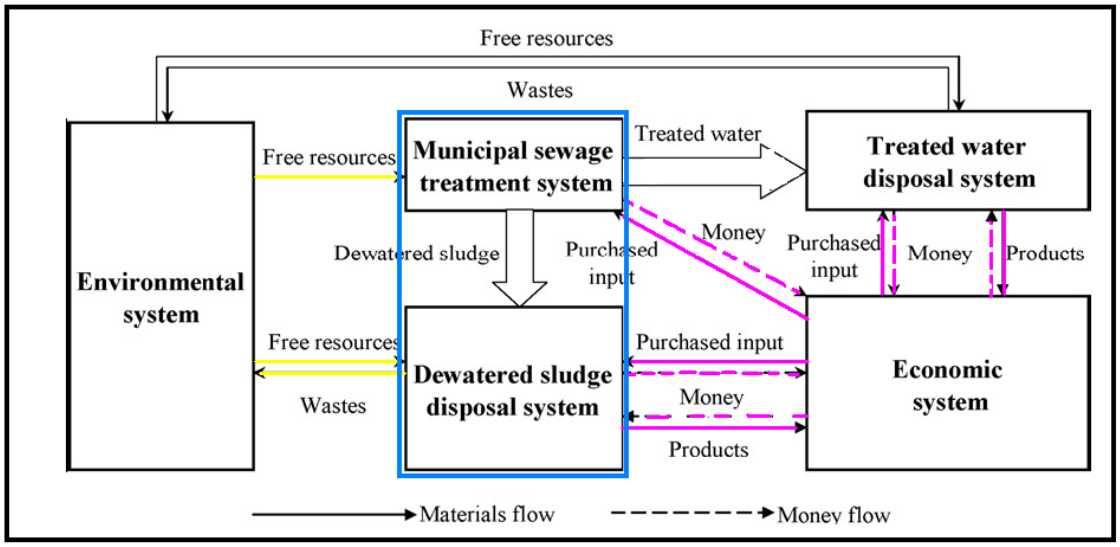

Figura 5.2 Estructura y flujos de un sistema de tratamiento de aguas residuales

Fuente: Modificado a partir de Zhang *et al. A sustainability analysis of a municipal sewage treatment ecosystem based in emergy* (2010).

En la Figura 5.2 se muestra los flujos mediante los cuales interactúan los subsistemas que constituyen el sistema total de tratamiento de aguas residuales; en dicho diagrama se evidencia que hay seis tipos de flujos; el primero y el segundo hace referencia a los recursos libres y al flujo de residuos entre el sistema ambiental y el sistema de tratamiento de aguas residuales respectivamente, dado que el sistema ambiental ofrece todos los recursos naturales renovables que requiere el sistema de tratamiento, y éste ultimo genera una serie de residuos que los devuelve al ambiente; es decir, el ambiente funciona como dador de recursos y receptor de residuos. El tercero y el cuarto se asocian con los flujos de las fuentes importadas en el proceso y la corriente fluye entre el sistema económico y el sistema de tratamiento, pues estos recursos importados demandan insumos económicos. El quinto y el sexto son los flujos de los productos del proceso de tratamiento y la corriente fluye entre el sistema económico y el sistema de tratamiento por la misma razón anterior. Es así como el sistema de tratamiento de aguas residuales proporciona el sistema de disposición de lodos y el sistema de disposición de agua tratada, siendo el primer sistema del cual se partirá para lograr el objetivo de este estudio. Sin embargo, aunque (Zhang, *et al.* (2010) mencionan un sistema de disposición de biosólidos, en realidad no existe, ya que los autores toman como sistema de disposición a la generación y compostaje del biosólido dentro de la PTAR, pero no evalúan si éste compost es sostenible cuando es aplicado a otro sistema, por tanto no se evalúa el aprovechamiento de éste como compost (en esta referencia se realiza lo mismo que hacen las PTAR convencionales cuando no hacen una valoración del producto generado); es por esta razón que se afirma la no realización de estudios hasta la fecha de la aplicación del método del análisis emergético al aprovechamiento de los biosólidos. Se puede decir entonces que la valoración de la sostenibilidad de la PTAR que desarrolla Zhang *et al.* (2010) sigue inconclusa porque no hay un acoplamiento del sistema de disposición de los biosólidos a la misma.

Una vez conocida la interacción entre los subsistemas de un sistema total de tratamiento de aguas residuales, se extrae el diagrama emergético de la Figura 5.2 . Hay que recordar que la emergía total de un proceso es igual a la suma de las emergías de todas las entradas, como se muestra en la Figura 5.2 y la ecuación 5.1.

$$Em_{star} = Em_{Entradas\ totales}$$
$$Em_{star} = w + (R_1 + R_2 + R_3) + (N_1 + N_2 + N_3) + (F_1 + F_2 + F_3) \quad \text{Ec 5.1}$$

W: Emergía de Residuos

R_i: Emergía Recursos Renovables

N_i: Emergía Recursos No Renovables

F_i: Emergía Recursos Importados

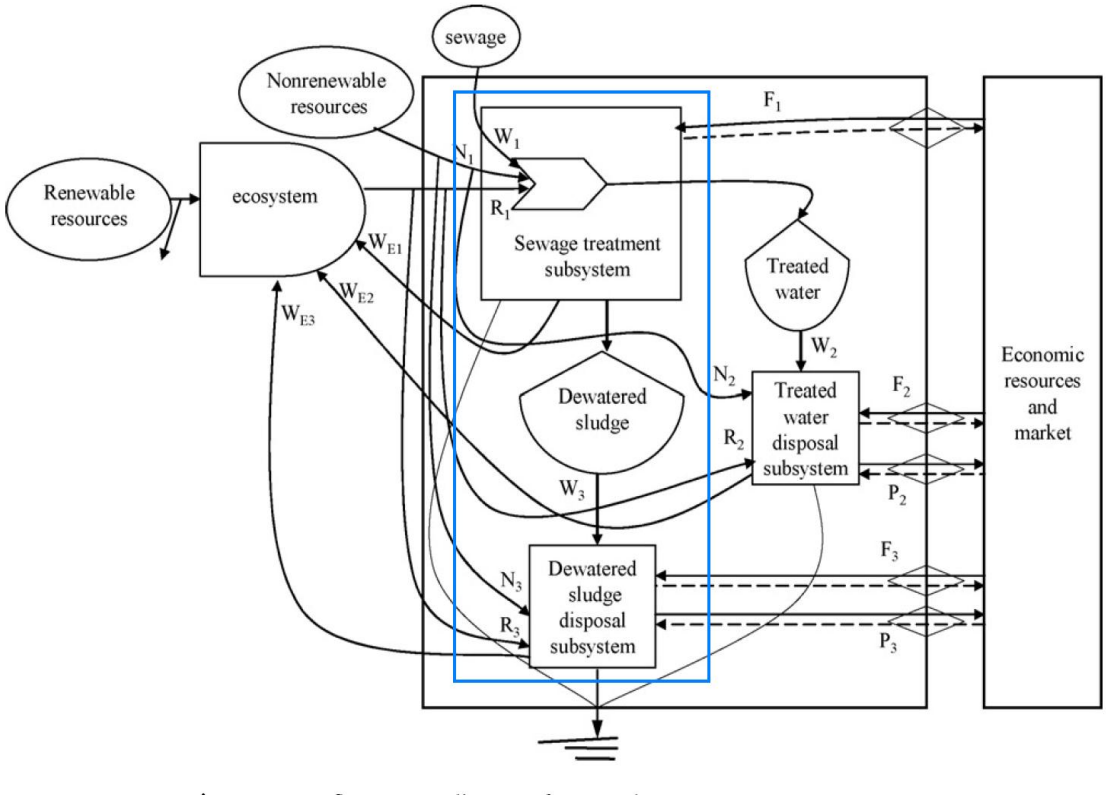

Figura 5.3 Diagrama emergético de un sistema de tratamiento de aguas residuales.
Fuente: Modificado a partir de Zhang *et al. A sustainability analysis of a municipal sewage treatment ecosystem based in emergy* (2010).

Estas entradas renovables, no renovables e importadas se contabilizan para todos los subsistemas del sistema de tratamiento de aguas residuales. Los recursos renovables (R) son el aire, la hidroelectricidad, el viento, el sol; los recursos no renovables (N) son los productos químicos y demás y los recursos importados (F) son la compra de tierras, de tecnología, electricidad, materias primas, servicios, entre otros;

simultáneamente se incluye el efecto que tiene la generación de los residuos (*W*) por cada subsistema al subsistema receptor y la emergía aportada por el agua residual a tratar. Como resultado de este proceso de depuración de aguas servidas se derivan otros dos subsistemas; el agua tratada que va al sistema de disposición del agua depurada y el lodo que va a un subsistema de disposición.

Con la concepción de partir desde lo macro hasta lo micro como se menciona anteriormente, ya conocidos los subsistemas que conforman el sistema total de tratamiendo de aguas residuales y la interacción entre ellos mediante flujos emergéticos, ahora se procede a detallar emergéticamente la PTAR de lodos activados seleccionada para este estudio a partir del proceso descrito en la Figura 5.1 para finalizar en el sistema de aprovechamiento de biosólidos.

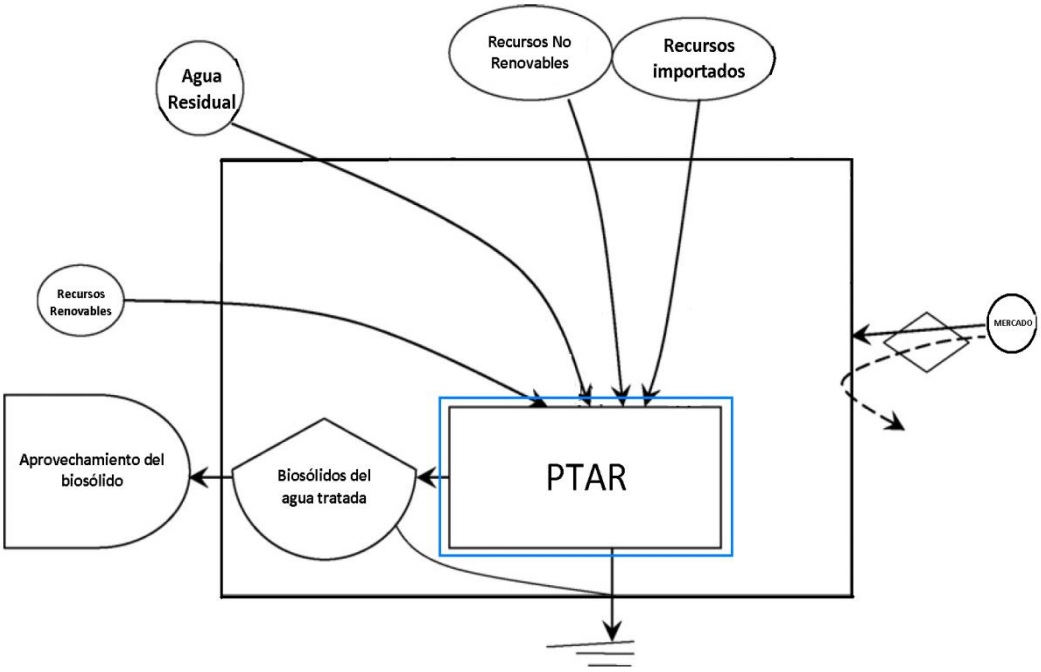

Figura 5.4 Diagrama emergético general del proceso del tratamiento de aguas residuales

Fuente: Modificado a partir de Zhang *et al. A sustainability analysis of a municipal sewage treatment ecosystem based in emergy* (2010).

En la Figura 5.5 se presenta el diagrama emergético de la PTAR de lodos activados seleccionada (apropiado de (Bjo & Geber (2001); Vassallo et al. (2009)), donde se incluyen todos los flujos que entran al sistema: recursos renovables (sol, viento, lluvia, oxígeno), recursos importados o comprados (electricidad y combustible, maquinaria y equipos, bienes y servicios, labor humana) y recursos no renovables (químicos) requeridos en diferentes proporciones (no todos) en las seis etapas del proceso. Es de anotar que los insumos como labor humana y bienes y servicios participan en todo el proceso de depuración, al igual que la transacción económica, pues ésta indica la compra o venta de bienes y servicios, es un intercambio comercial de dinero para energía, materiales o servicios prestados. Existen discrepancias sobre el tipo de fuente

de las aguas residuales; si son fuentes renovables (R), fuente no renovables (N) o fuentes importadas (F), por lo tanto en (Zhang, *et a.,* (2010) las aguas residuales no son tomadas como recursos renovales, ni no renovables, ni importados; simplemente se toma como energía de los residuos (*W*), y este nuevo factor se le adiciona a los índices emergéticos abordados en el marco teórico y que se mostrará en el desarrollo de este capítulo.

Las aguas residuales tratadas producto de la etapa de tratamiento secundario son vertidas al río receptor, los residuos sólidos (no confundirse con biosólidos) generados en el tratamiento preliminar son dispuestos finalmente en rellenos sanitarios, la generación de electricidad en la etapa de la estabilización anaerobia de los lodos suple la tercera parte de los requerimientos energéticos demandados por la PTAR y los lodos digeridos y/o estabilizados son el producto del cual se partirá para evaluar el aprovechamiento sostenible de los mismos mediante la comparación de dos alternativas de uso desarrollando la metodología emergética.

Otro aspecto primordial en el diagrama emergético radica en la retroalimentación de los siguientes flujos: la electricidad que se genera en el proceso de estabilización anaerobia de los lodos suple en gran parte los requerimientos energéticos de la misma etapa, un cierto porcentaje de los lodos activados producto del tratamiento secundario retornan nuevamente a los tanques de aireación y, por último, otro porcentaje de las aguas residuales que salen del tratamiento secundario retornan a la etapa de tratamiento preliminar. Al mismo tiempo se evidencia el hecho de que ciertos flujos no continúan completamente el proceso, una muestra de ello es que en el tratamiento primario parte de las aguas que salen de allí son llevadas directamente a la fuente receptora sin continuar con el proceso del tratamiento secundario y de lodos. Pero como se explicó en el apartado del marco teórico, los flujos de emergía que se retroalimenta en un proceso no puede contabilizarse porque se incurriría en un doble conteo; es decir, sólo se contabilizan aquellos flujos que provienen directamente de las fuentes, más no de las retroalimentaciones, pues implícitamente las fuentes de los insumos ya están contabilizando dichos reciclos; por ejemplo la retroalimentación de la electricidad generada en la etapa de estabilización anaerobia que retorna a la misma etapa no es contabilizada directamente, pero se evidencia en la disminución que la fuente de electricidad y combustible tiene que proveer a dicha etapa del proceso, es como un “ahorro de electricidad”, así mismo pasa con los otros flujos que se retroalimentan.

.

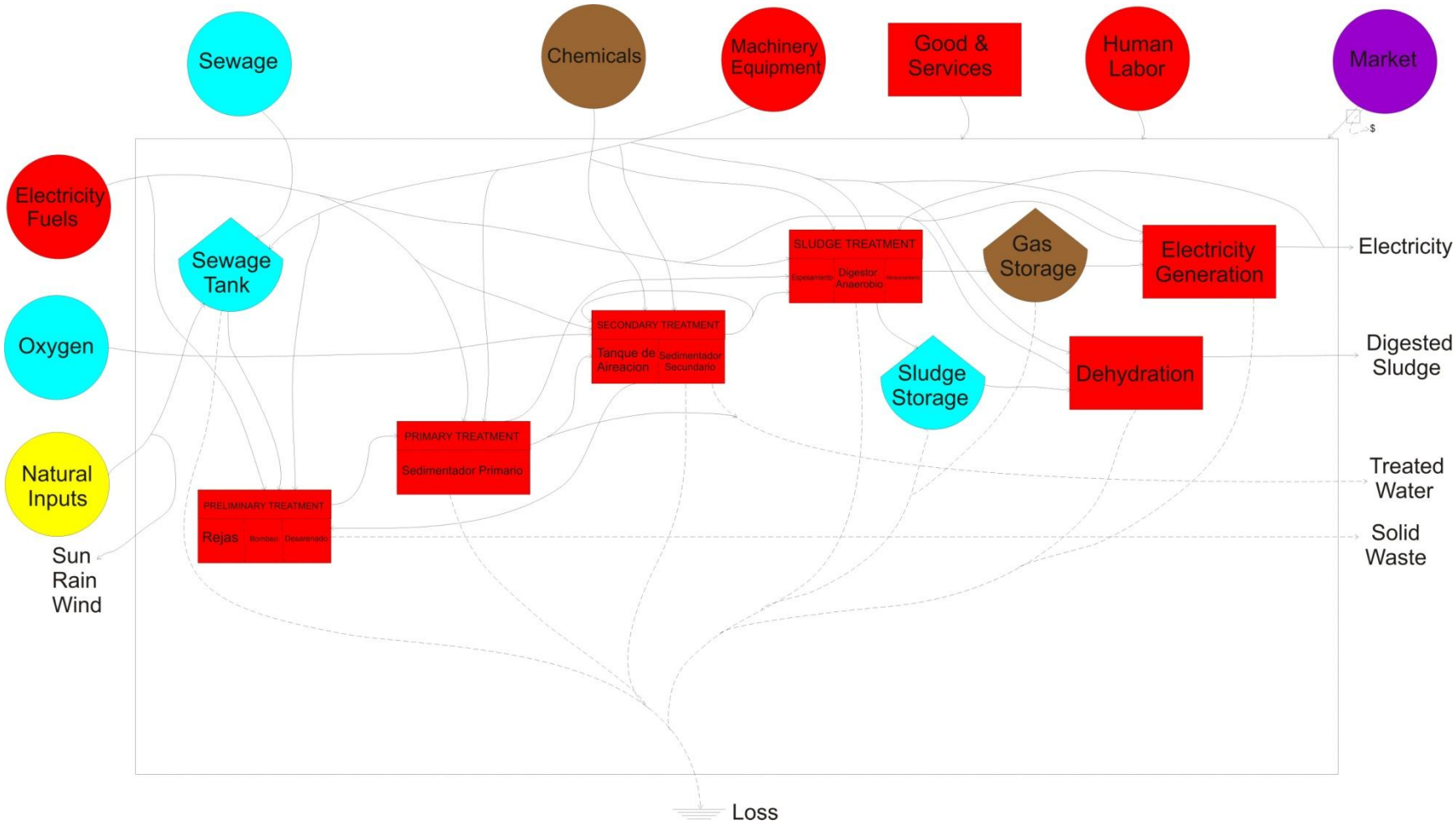

Figura 5.5. Diagrama emergético de la PTAR

De la Figura 5.5[9] es importante destacar que en los estudios anteriores (Bjo & Geber, 2001; Geber & Bjo, 2002; Jiang et al., 2007; Siracusa & La Rosa, 2006) no se ha tenido en cuenta el aporte emergético del oxígeno requerido (sin justificación alguna) para la respiración bacteriana durante la fase de descomposición aeróbica de la carga orgánica en la etapa del tratamiento secundario. Este aporte de oxígeno es significativo aparte de que constituye una fuente renovable dentro del sistema.

Del diagrama emergético para la PTAR de lodos activados se concluye que el tratamiento de aguas residuales es una actividad clave para prevenir problemas ambientales como ya se mencionó en capítulos anteriores, pero por otro lado también implica el consumo de recursos (fuentes importadas como maquinaria, gastos en funcionamiento, labor humana entre otros bienes y servicios) que tienen que considerarse a la hora de estimar la eficiencia y justificar dicho proceso; es decir, se tienen que contabilizar todos los costos directos e indirectos relacionados con los aportes naturales, humanos y económicos, en este caso para generar un servicio (tratamiento del agua residual) y no un producto como se suele hacer en el método de la contabilidad emergética. En la Tabla 5.2 se resumen las entradas del proceso de la Figura 5.5.

Tabla 5.2 Insumos del proceso de tratamiento de aguas residuales

Etapa	Fuente	Tipo de fuente
Tratamiento preliminar	Agua residual sin tratar	W
	Maquinaria y equipo	F
	Electricidad y combustible	F
Tratamiento primario	Maquinaria y equipo	F
	Electricidad y combustible	F
Tratamiento secundario	Oxígeno	R
	Maquinaria y equipo	F
	Electricidad y combustible	F
	Químicos (aglomerante)	N
Tratamiento del lodo	Maquinaria y equipo	F
	Electricidad y combustible	F
	Químicos (aglomerante)	N
Generación de electricidad	Maquinaria y equipo	F
	Electricidad y combustible	F
Deshidratación de los lodos	Maquinaria y equipo	F
	Electricidad y combustible	F

Tomando como base todas las referencias sobre la aplicación del análisis emergético a un sistema de tratamiento de aguas residuales descritas en el estado del arte (Bjo & Geber, 2001; Geber & Bjo, 2002; Siracusa & La Rosa, 2006; Vassallo et al., 2009; Zhang,

[9] Los diagramas y tablas emergéticas se elaboraron en inglés dado que la terminología técnica del método impide la traducción correcta y literal de la misma, por lo tanto se evita en incurrir en errores de traducción.

Deng, et al., 2010), se concluye que el principio básico de una PTAR es el mismo independientemente del tipo de tratamiento que realice, pues todos los tipos de PTAR requieren de la misma clase de entradas de fuentes renovables, no renovables e importadas, y tienen aproximadamente la misma proporción entre sí, y por tanto la diferencia en la cantidad de los insumos en el proceso, sea cual sea el tipo de tratamiento va a ser despreciable.

Por esta razón, dado que el objetivo de esta tesis no es cuantificar las entradas de los flujos de la Tabla 5.2, y por ende tampoco el cálculo de la sostenibilidad de una PTAR mediante los índices emergéticos, se toman las relaciones porcentuales de F, R y N de una PTAR de lodos activados, del estudio realizado por Zhang *et al*. (2010), se tiene entonces que de la emergía total que entra al sistema el 62.5% corresponde a los recursos importados (F) (aportado principalmente por la maquinaria y labor humana), el 34.4% a recursos renovables (R) (aportado sólo por el consumo de oxígeno) y el 3% a recursos no renovables (N) (aportado sólo por los insumos químicos).

Retomando el concepto de sostenibilidad tratado en apartados anteriores, ésta es función de las fuentes renovables, de las fuentes importadas, y de la sobrecarga que la actividad económica genera en el ambiente, siendo sostenible la dependencia de los sistemas por los recursos renovables y no por los que no son renovables.

Esto demuestra que emergéticamente el tratamiento de aguas residuales es muy costoso porque requiere de grandes cantidades de recursos importados, sin embargo esta cantidad es baja comparada con el alto costo emergético si se liberaran las aguas sin tratar al medio receptor, ya que disminuiría considerablemente la calidad ambiental. Es decir, el índice de sostenibilidad que relaciona la carga ambiental respecto al rendimiento emergético busca tener un equilibrio en ambos factores, mínima carga ambiental con un alto rendimiento económico (bajas entradas de recursos importados), aunque los recursos importados son altamente significativo, la minimización de la carga ambiental prevalece sobre éste.

La tabla 5.3 presenta los índices emergéticos del proceso de tratamiento de aguas residuales.

Tabla 5.3 Índices emergéticos del proceso de tratamiento de aguas residuales

PTAR de lodos activados (Estabilización anaérobia)		
Índice Emergético	**Relación**	**Valor**
EYR (Índice de Rendimiento Emergético)	Emergía + *W* /F	1.63
ELR (Índice de Carga Ambiental)	(NR+F)/R	1.80
ESI (Índice de Sostenibilidad)	EYR/ELR	0.90

Fuente: Tomado de Zhang *et al* .(2010). A sustainability analysis of a municipal sewage treatment ecosystem based on emergy .

Siendo consecuente con lo tratado en el marco teórico, para bajos índices de rendimiento emergético se tiene que el proceso tiene un bajo rendimiento económico; es decir, hay una competencia débil en el mercado, pues valores EYR≤2 indica que no hay una contribución significativa de recursos locales renovables, teniendo una gran dependencia por las fuentes importadas, reflejando que el proceso es casi completamente manufacturado con un bajo factor de renovabilidad.

Los valores muy bajos de ELR (2), indican que los procesos tienen un bajo impacto ambiental, siendo ambientalmente sostenible. Esto era de esperarse pues la finalidad de una PTAR es disminuir el impacto ambiental en las fuentes que reciben las aguas residuales tratadas.

Por otro lado, cuando ESI≤ 1 el proceso no es sostenible a largo plazo, esto desde un principio se preveía debido a la alta dependencia del proceso de los recursos importados. Por lo tanto una PTAR se justifica por la disminución en la carga ambiental aunque económicamente no sea viable, por eso se hace necesario el cobro económico a los beneficiarios del servicio para compensar esta desigualdad.

Hablando en términos energéticos, es conocido que la eficiencia de un proceso de tratamiento de aguas residuales se mide por la remoción de DQO y DBO (masa de oxígeno consumido por litro de solución), que se puede interpretar como una medida indirecta de la carga de materia orgánica, dado que el proceso de tratamiento se supone que es completamente dependiente de la oxidación aeróbia En otras palabras, la DQO y DBO son medidas de oxígeno requerido en un cuerpo de agua para el proceso de degradación de la materia orgánica

En la Ec 5.2 se muestra un ejemplo de este proceso en el que la materia orgánica se descompone (por la comunidad microbiana) mediante el oxígeno presente, produciendo agua, dióxido de carbono CO_2 y energía

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2 + Energía \qquad \text{Ec 5.2}$$

Como se muestra en la Tabla 5.4 (EPM, 2006), en la PTAR seleccionada se tratan anualmente 119.25 millones m^3 de agua residual, cuya remoción de DBO_5 y SST es de 83% y 87% respectivamente, que conlleva a una producción anual de 127.14 toneladas húmedas de biosólido.

Tabla 5.4 Resultados del proceso de tratamiento de las aguas residuales de la PTAR

Actividad		Unidad	Valor
Remoción de contaminación	DBO_5	Ton/año	31.68
		%remoción/año	83
	SST	Ton/año	81.61
		%remoción/año	87
Volumen residual de agua tratada al año		Millones m^3/año	119.25
Caudal de agua residual tratada		m^3/año	1.26
Biosólido producido		Toneladas húmedas/año	127.14
Metano (CH_4) producido		Millones m^3/año	8.22
Energía generada con la combustión del metano		Millones kWh/año	5.6

Fuente: **Tomado de Empresas Públicas de Medellín. (2006). Informe ambiental 2006.**

Ahora, en el proceso de estabilización anaerobia de los lodos se logra producir 8.22 millones /m^3 de metano al año, mediante su combustión se genera alrededor de 5.6 millones de kWh al año, y comparado con la inversión de energía anual que se requiere para llevar dicho proceso (18.9 millones kWh), se evidencia que este balance energético no es rentable; es decir, la generación de energía sólo suple aproximadamente el 30% de la demanda total de energía en el proceso.

$$E_e = E_s \qquad \text{Ec 5.3}$$

$$Cont.energético\ agua \sin tratar + gasto\ energetico\ equipos = sale$$

De este balance se deriva (Ec 5.3) que una PTAR es sostenible energéticamente por que el gasto energético que requieren los equipos para su funcionamiento y las pérdidas energéticas en el proceso son suplidas económicamente por los usuarios. Cabe anotar que la energía de salida no es cien por ciento utilizable; es decir, la cantidad de energía aprovechable siempre es menor al contenido energético como tal, pudiendo llegar a ser cero (pero su contenido energético como tal no), de allí se derivan los conceptos de exergía y energía; la cantidad de energía disponible para llegar a equilibrio mecánico, térmico y químico con los alrededores y el poder calorífico contenido en un producto respectivamente.

Hay dos aspectos importantes a considerar y uno de ellos no está contemplado dentro del análisis emergético.

a) Las altas cantidades de fuentes importadas suministradas en el proceso son bajas en comparación con los altos costos emergéticos si las aguas no se trataran y se vertieran al rio receptor, aumentando en gran medida la carga ambiental en lo que se traduce en una disminución de la calidad ambiental de la fuente receptora, pues la naturaleza tendría que hacer el trabajo de asimilar toda es carga orgánica.

Este aspecto si lo contempla el método del análisis emergético en su índice de sostenibilidad (relación de la carga ambiental y el beneficio económico).

b) En segundo lugar, se tiene que el análisis emergético cuando se utiliza para la valoración de la sostenibilidad de una PTAR, no involucra el valor monetario que los usuarios pagan mediante pagos tarifarios para que traten las aguas residuales que ellos mismos generan; es decir, los usuarios pagan el gasto energético asociado al funcionamiento de los equipos y a las pérdidas energéticas del proceso. Si esto se considerara, el costo de los insumos comprados dentro el sistema se compensaría con el pago tarifario, reflejándose en la disminución de fuentes importadas.

En términos energéticos, es evidente como la energía invertida es mucho mayor que la energía recuperada, pero es sostenible dado que los usuario pagan por el consumo y las perdidas energéticas del proceso, considerando que no toda la energía que se recupera en el proceso es cien por ciento aprovechable (exergía).

Se puede decir entonces que el tratamiento de las aguas residuales es un proceso necesario para la reducción de la carga orgánica, la cual se deriva principalmente por las actividades humanas. Pese a que la emergía usada en dicho proceso es suministrada principalmente por el consumo de fuentes no renovables y recursos importados, la emergía utilizada para el tratamiento es baja en relación con la cantidad de emergía contenida en las aguas residuales tratadas, con una relación de la emergía requerida para el proceso de depuración y la emergía contenida en las aguas residuales alrededor de 1:140 (Vassallo *et al.*, 2009), esto es debido a la transformicidad tan alta que poseen las aguas servidas (Odum, 1996), lo que indica que éstas generan un alto impacto ambiental si no son tratadas y asimiladas por el ambiente; esto hace que el tratamiento de las aguas residuales sea un proceso esencial para el mantenimiento de las buenas prácticas ambientales. Es así como este proceso sí es sostenible, pues se disminuye sustancialmente la carga ambiental, aparte de que sus altos requerimientos económicos son subsidiados por la sociedad. Aunque no está de por demás discutir la necesidad de disminuir los recursos importados (F) a fin de mejorar el desempeño económico de la PTAR.

Simultáneamente, con la remoción del 83% y 87 % de DBO_5 y SST respectivamente, se evita que estas cargas orgánicas contaminen el río Medellín (disminución de carga ambiental), con los 119.25 millones m^3 de agua tratada se tratan aproximadamente el 22% de las aguas residuales generadas en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, con las 127,14 toneladas de biosólido generado se recuperan suelos degradados y se fertilizan suelos silvopastoriles, con los 8.23 millones m^3 de metano producido se suple aproximadamente el 33% de consumo energético de la PTAR seleccionada, aparte de que se evita que el metano se escape a la atmosfera y contribuya al calentamiento global.

5.2. Análisis de la sostenibilidad del sistema de aprovechamiento de los biosólidos comparando dos alternativas de aprovechamiento

Abordada la evaluación del análisis emergético a una PTAR, se evidencia como la solución al tratamiento de las aguas residuales queda inconclusa en caso que no se gestione la disposición los biosólidos en dicho proceso; es decir, la prestación del servicio de tratamiento de aguas residuales no debe terminar en la estabilización del biosólido sino en su aprovechamiento de manera sostenible; aspecto que no sólo le compete a los usuarios beneficiarios del servicio, sino también a las entidades comprometidas (aquellas asociadas directamente con la problemática, prestadora del servicio), reguladoras, o aquellas que ejercen algún tipo de control. Ahora se procede a analizar la sostenibilidad del sistema de disposición de los biosólidos comparando dos alternativas de aprovechamiento, mediante el cálculo de los índices emergéticos de cada una. Por esta razón se aborda el sistema de aprovechamiento de los biosólidos como se muestra en la Figura 5.6.

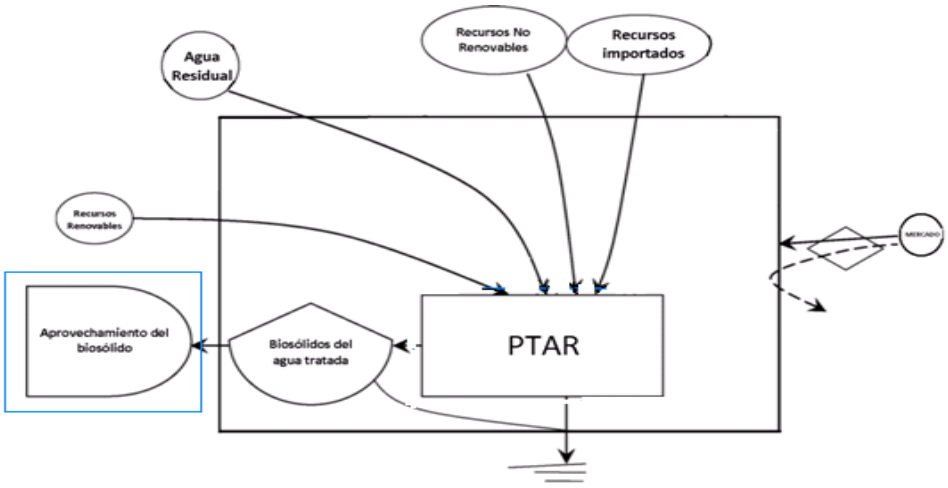

Figura 5.6 Diagrama emergético general del proceso del tratamiento de aguas residuales
Fuente: Modificado a partir de Zhang et al. A sustainability analysis of a municipal sewage treatment ecosystem based in emergy (2010).

Se eligen las dos alternativas de aprovechamiento de los biosólidos, como se detalla continuación:

5.2.1. Alternativa A: Aprovechamiento de biosólidos como fertilizantes para suelos silvopastoriles

Como alternativa actual de disposición, se tomó aquella que es practicada en este momento en la PTAR seleccionada y radica en el uso de los biosólidos como fertilizantes para suelos silvopastoriles. Los datos y las condiciones requeridas para esta aplicación se toman del estudio de Zapata *et al*. (2011), donde utilizaron los biosólidos de la PTAR seleccionada para fertilizar suelos silvopastoriles.

Los biosólidos contienen nutrientes, contaminantes orgánicos e inorgánicos y cierta cantidad de patógenos (Zapata *et al., (*2011). Los nutrientes más importantes son el nitrógeno, el fósforo y el potasio (la concentración de estos elementos es alta). En cuanto a los contaminantes inorgánicos cabe resaltar los metales pesados, los cuales juegan un papel indispensable, negativo o nulo, en los procesos vitales según las características y concentraciones en las que se encuentren en el ambiente, debido a que tienden a acumularse a lo largo de la cadena alimenticia, dado que no se degradan y son poco móviles. Por otro lodo, entre los cuatro grupos principales de microorganismos patógenos para los humanos se encuentran: bacterias, virus, protozoos y helmintos (Zapata *et al., (*2011).

Estos biosólidos se pueden clasificar con base en su contenido de patógenos en clase A y clase B. Para obtener los biosólidos clase A, el residuo debe someterse a un tratamiento más extenso que para obtener biosólidos clase B. Los biosólidos clase A son aquellos que se someten a diferentes procesos, con el objetivo de reducir la carga de patógenos por debajo de los límites que signifiquen riesgo para la salud de las personas que tienen contacto con ellos, estos biosólidos pueden ser aplicados al suelo sin ningún tipo de restricción. Los biosólidos clase B, son aquellos que a pesar de tener una reducción significativa de microorganismos patógenos, no los elimina completamente, este es el tipo de biosólidos que se tratan en el estudio (Zapata *et al., (*2011).

Pese a que estos biosólidos son de clase B pueden ser aplicados en suelos, pero se deben tener en cuenta ciertas restricciones para utilizarlos. Dichas restricciones tienen que ver con el tiempo que se debe esperar antes de sembrar los cultivos en los suelos que fueron fertilizados con éste, para que la concentración de microorganismos se reduzca hasta niveles aceptables. Este tiempo va de 1 a 38 meses y varía dependiendo del tipo de cultivo y del contacto o no de la parte comestible del alimento con el biosólido.

La razón por la que éstos biosólidos son utilizados como fertilizantes, radica en el contenido de nutrientes y materia orgánica, que son vitales para el requerimiento nutricional del pasto y mejora las propiedades estructurales del suelo respectivamente; el beneficio de este último consiste en la unión de las partículas de los suelos en agregados estables, produciendo una estructura que facilita la permeabilidad del agua y aire reduciendo así la escorrentía y los riesgos de erosión.

Es de esta manera como los biosólidos son aplicados en suelos con propiedades ándicas caracterizados por tener buena aireación y alta porosidad, sembrado con pasto kikuyo. Desde hace más de cuatro años se aplica biosólido cada 45 días, aproximadamente, como única fuente de fertilización. Para ello el lodo estabilizado que llega de la PTAR es diluido y aplicado a la parcela manualmente mediante mangueras (Figura 5.7).

Figura 5.7 Aplicación de los biosólidos a suelos silvopastriles

Fuente: Tomado de Zapata et al., 2011. Evaluación de los riesgos agronómico, ambiental y sanitario derivados de la aplicacion directa de los biosólidos para el cultivo de pastos en un agroecosistema de vocación lechera del norte de Antioquia.

Como se dijo anteriormente, los biosólidos clase B pueden ser aplicados bajo una serie de restricciones; el sitio de aplicación no debe estar cercano a fuentes de aguas superficiales o subterráneas, se debe aplicar en épocas secas y la aplicación se debe hacer aproximadamente cada 45 días.

Bajo estas condiciones se asegura que la diversidad microbiana del suelo no se ve afectada, aumentan sus micronutrientes y el incremento de metales pesados es muy bajo (cantidades despreciables) (EPA, 2003); estos últimos no contaminan ningún tipo de aguas, ni tampoco se aumenta su concentración en las muestras foliares del pasto; es decir, las concentraciones de metales pesados que se encuentran es aguas de escorrentía y subterráneas, suelo y pasto está asociado con el contenido de metales pesados que contienen naturalmente (cantidades pequeñas, que no son producto de la aplicación del biosólido, aproximadamente 0.58 (mg/kg)), y una cantidad muy baja (aproximadamente 1.8 mg/kg) de estas concentraciones es consecuencia de la aplicación del biosólido, por lo que no se toma como una bioacumulación, bajo las restricciones establecidas. Igualmente, después de la aplicación de los biosólidos no se incrementa el contenido de materia orgánica del suelo, pues predomina el fenómeno de mineralización sobre el de humificación.

Como resultado de la aplicación de los biosólidos como fertilizantes en suelos sembrados con pasto kikuyo, se tiene como producto final un pasto valorado en términos de calidad (contenido de nutrientes) y cantidad (biomasa por hectárea), siendo el producto cuantificado emergéticamente para esta disposición. Los datos y suposiciones hechas

para realizar los cálculos emergéticos para esta alternativa de disposición se abordan más adelante. Es así como emergéticamente el producto a valorar en esta aplicación es el pasto kikuyo.

5.2.2. Selección de una alternativa de aprovechamiento de los biosólidos para comparar con la alternativa de de utilización en suelos silvopastoriles

Como se ha expresado en capítulos anteriores, la alternativa de aprovechamiento a comparar se seleccionó con base a aquella referenciada en la bibliografía como la adecuada bajo los criterios ambientales y económicos; es decir, generalmente la selección de la mejor ruta de disposición, debe ser identificada principalmente por aquella que sea más segura (aceptable) desde el punto ambiental y es una ganancia si a la vez presenta rendimientos económicos (desarrollo sostenible) (Werther & Ogada, 1999).

Se hace énfasis en que todos los indicadores apuntan a que la producción de biosólidos está en constante aumento sin distinción alguna (países en vía de desarrollo y desarrollados), lo que hace necesario la búsqueda de soluciones sostenibles para su aprovechamiento. En el marco teórico se mostró cómo el aprovechamiento agrícola esta posicionado en la actualidad como la alternativa más sostenible, seguido de una fuerte tendencia por los procesos térmicos, con la visión que en unos años desplazará a la actividad agrícola, pues esta última tiene la gran limitante del agotamiento de tierras aptas para su aplicación (Werther & Ogada, 1999), siendo cada vez más competitivos los tratamientos térmicos frente a dicha alternativa de disposición, hasta el punto de verse como la única solución, dadas las crecientes limitaciones de los otros métodos (Schowanek *et al*., 2004), pues se advierte una clara tendencia para el año 2018 del posicionamiento de la utilización térmica como la gestión más viable a esta problemática, desde el punto de vista ambiental, económico y práctico, con un 20% más de uso respecto a la otra alternativa ya mencionada.

Por estas razones (dadas en el marco teórico), se decide seleccionar como alternativa a comparar el tratamiento térmico para el aprovechamiento de los biosólidos, indicada como adecuada en la bibliografía. Ahora, la cuestión es definir el tipo de tratamiento térmico de los muchos que se han impuesto en el mercado [gasificación, incineración, pirolisis, combustión, oxidación húmeda, combinación de combustión, pirólisis y gasificación (Werther & Ogada, 1999)]. El criterio de escogencia se basa en la elección de un tratamiento térmico que sea ambientalmente inofensivo y económicamente rentable, llegándose así al proceso térmico de gasificación, pues la gasificación de biosólidos se ha convertido en los dos últimos años como la tecnología más apropiada para la recuperación energética de los lodos estabilizados (Midilli, Dogru, Howarth, & Ling, 2001), aunque compite con el proceso de pirólisis (no siendo económicamente mejor) como se

demuestra a continuación. Los otros tratamientos térmicos no son considerados como tecnologías energéticas limpias (Petersen & Werther, 2005).

En términos de practicidad, la gasificación tiene la gran ventaja respecto a los otros procesos térmicos ya mencionados en que reduce sustancialmente el volumen de los residuos, además tiene la posibilidad de generar combustibles almacenables (Nipattummakul, Ahmed, Kerdsuwan, & Gupta, 2010a).

Ambientalmente, la gasificación es una de las tecnologías más viables, eficientes, efectivas y prometedoras para la conversión de los biosólidos a energía limpia con un mínimo impacto ambiental suministrando energía eléctrica y térmica (Nipattummakul, Ahmed, Kerdsuwan, & Gupta, 2010b).

Como ya se ha citado, la principal limitante de los procesos térmicos es la emisión de compuestos tóxicos a la atmósfera como dioxinas y furanos, (óxidos de nitrógenos (NO_x), monóxido de dinitrógeno (N_2O), dióxido de azufre (SO_2), ácido clorhídrico (HCl), ácido fluorhídrico (HF) y compuestos orgánicos (C_xH_y) (Fytili & Zabaniotou, 2008), metales pesados; sin embargo debido a su alta eficiencia, la gasificación es conocida como un proceso de combustión controlado, ya que reduce las emisiones de compuestos contaminantes hasta por dos órdenes de magnitud y casi en un 100% las emisiones de dióxido de carbono (CO_2). Así mismo, destruye los compuestos tóxicos como los óxidos de nitrógeno (Petersen & Werther, 2005) y las cenizas quedan prácticamente mineralizadas cuando se recirculan en el proceso para ser llevadas sin problemas ambientales a un relleno sanitario (Gross, Eder, Grziwa, Horst, & Kimmerle, 2008; Midilli, Dogru, Akay, & Howarth, 2002).

Económicamente, la gasificación continúa posicionándose como el mejor proceso térmico frente a los ya mencionados, pues estos últimos requieren un exceso de energía durante su funcionamiento, lo que implica grandes inversiones económicas, a diferencia de la gasificación que es un proceso autosostenible energéticamente, dado que la recuperación de energía térmica y la generación de energía eléctrica suple las demandas energéticas de operación; incluso el exceso de energía que se genera puede ser utilizada externamente mejorando así la rentabilidad del sistema (Gross *et al*., 2008). La eficiencia de este proceso (gasificación utilizando como agente gasificante vapor) radica en que el gas producido se puede utilizar directamente en un proceso de generación de energía sin necesidad de acondicionamientos. (Midilli et al., 2001; Petersen & Werther, 2005).

Aunque la pirolisis es otro método similar que permite la conversión de los biosólidos a energía sin incurrir en impactos ambientales (Nipattummakul *et al.,* 2010a), económicamente la gasificación no es tan viable, pues uno de los objetivos principales de ambos procesos es el de generar grandes cantidades de gas combustible con bajo contenido de alquitranes (contaminantes orgánicos) para reducir la complejidad y los costos del proceso de limpieza, siendo la gasificación el proceso más eficiente para alcanzar este objetivo, lo que se traduce en disminución de costos (Gross et al., 2008).

Así, económicamente éste proporciona un 25% más de rendimiento en términos energéticos (relación entre la energía contenida en el gas de síntesis y la contenida en el biosólido) que el proceso de pirólisis (Nipattummakul, *et al*., 2010).

Midilli *et al*., (2001) consideran que la producción de gas combustible a partir de la gasificación de los biosólidos es una de las tecnologías de bioconversión mas responsables ambientalmente, generando un alto impacto favorable en las economías mundiales mediante la creación de nuevos mercados para las empresas de energía.

La alternativa seleccionada como la adecuada es la gasificación, pues es una tecnología adecuada debido a las ventajas que tiene de convertir el lodo estabilizado en energía utilizable (económicamente rentable), reduciendo su volumen, evitando la emisión de compuestos orgánicos tóxicos y fijando los metales pesados en la matriz solida, produciendo un gas combustible limpio (Fytili & Zabaniotou, 2008).

5.2.3. Alternativa 2: Aprovechamiento del biosólido para la recuperación de energía mediante gasificación por lecho fluidizado

Una vez seleccionada la alternativa de disposición, se procede a describir el proceso de gasificación de los biosólidos mediante lecho fluidizado. Este proceso se realiza con base a las mejores condiciones de operación de la gasificación de biosólidos reportados en la bibliografía; es decir, dicho proceso fue diseñado exclusivamente para este estudio con el apoyo del Grupo de Investigación Termodinámica Aplicada y Energías Alternativas (TAYEA).

La gasificación es la conversión termoquímica de un sustrato carbonoso (biosólido) a un gas combustible y limpio utilizado para múltiples aplicaciones (generación de electricidad o como materia prima en procesos de síntesis, en presencia de un agente gasificante como aire, oxígeno, vapor de agua, entre otros (Dayton, 2002) (Giannetti et al., 2006); (Muniesa Bastida & Velo García, 2005);.

El gas producido es conocido como gas de síntesis, formado por compuestos como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), hidrógeno (H_2), metano (CH_4), pequeñas cantidades de otros hidrocarburos más pesados, agua (H_2O) y nitrógeno (N_2). Cuando se usa aire como agente gasificante se obtiene aparte del gas pequeñas partículas carbonosas, cenizas, alquitranes y aceites. Los principales compuestos que le confieren gran parte del poder calorífico al gas son el monóxido de carbono (CO) y el hidrogeno (H_2), dado que estos pueden reaccionar con oxígeno (O_2) (combustión en caldera, motor o turbina); sin embargo, el metano (CH_4) es el responsable de gran parte del contenido energético, aunque se forme en pequeñas cantidades (Muniesa Bastida & Velo García, 2005).

Los rendimientos obtenidos y las características de dichos gases de gasificación dependen, principalmente, de las condiciones de reacción (temperatura, presión, agente gasificante, tiempo de reacción), del tipo de reactor empleado (lecho fijo *updraft* y *downdraft,* lecho fluido, arrastre de gas) y de la aplicación de ~~de~~ los distintos sistemas de tratamiento de limpieza de los gases (wate-gas shit, craqueo catalítico de alquitranes) (Almeida, 2010).

A grandes rasgos, las etapas de un proceso de gasificación son: secado de los biosólidos, gasificación en el reactor de lecho fluidizado, limpieza del gas de síntesis y combustión del gas de síntesis; en este trabajo se eligió éste último para la generación de electricidad.

Tomando como base que el objetivo del proceso de gasificación es el de operar a determinadas condiciones que permitan una mayor producción de gases, una composición con elevado poder calorífico y bajo contenido de alquitranes (contaminantes orgánicos), se eligieron las siguientes condiciones de operación.

a) Tipos de gasificadores

El proceso de gasificación se puede dar en diferentes tipos de reactores de acuerdo a la clase de biomasa a utilizar y a la clase de gas de síntesis (composición) que se desea generar. La configuración del gasificador condiciona la cinética de la reacción, los rendimientos y la composición de los productos (gas de síntesis, cenizas y alquitranes (Elías, 2005~~)~~; ~~(~~Knoef, 2000). Existen gasificadores de lecho descendente o fijo en contracorriente (*updraft*), gasificadores de lecho descendente o fijo en equicorriente (*downdraft*), gasificadores de lecho fluidizado, gasificadores rotatorios y gasificación por plasma[10].

El tipo de reactor escogido para este estudio es el gasificador de lecho fluidizado (Almeida, 2010); (Muniesa Bastida & Velo García, 2005) , por las siguientes razones:

- Dado que es un lecho fluidizado, en su interior se dan condiciones de casi mezcla perfecta, esto hace que las características de las sustancias en su interior sean las mismas en todos los puntos.
- Permite la recirculación de las cenizas volantes, por lo que la conversión del contenido de carbono en la biomasa suele alcanzar valores próximos al 100%.
- La composición del gas es muy uniforme, variando muy poco con las condiciones de operación debido a las buenas condiciones de transferencia de calor y materia que proporciona el lecho fluidizado.

[10] Información en (Muniesa Bastida & Velo García (2005) (Almeida (2010)

- Al ser la temperatura muy uniforme en todo el lecho, los gases salen del gasificador a una temperatura bastante elevada, lo que permite optimizar el sistema de recuperación de calor a fin de mantener un buen rendimiento térmico global.
- El volumen de gas producido por unidad de volumen del reactor es superior al de los gasificadores de lecho fijo.

El funcionamiento del gasificador de lecho fluidizado consiste en que la biomasa (lodo estabilizado) se introduce por el lado lateral del gasificador, la temperatura uniforme de operación está entre 800-900ºC. Los agentes gasificantes se introducen por la parte inferior del reactor a altas velocidades, lo que permite mantener en suspensión las partículas de sólido formando un fluido que se comporta como un líquido mientras se producen las reacciones. Las cenizas se extraen por la parte inferior o lateral (lado opuesto de la entrada de la biomasa), mientras el gas suele arrastrar partículas sólidas sin quemar (suelen recogerse y recircularse al lecho). La Figura 5.8 muestra un esquema de un gasificador de lecho fluidizado.

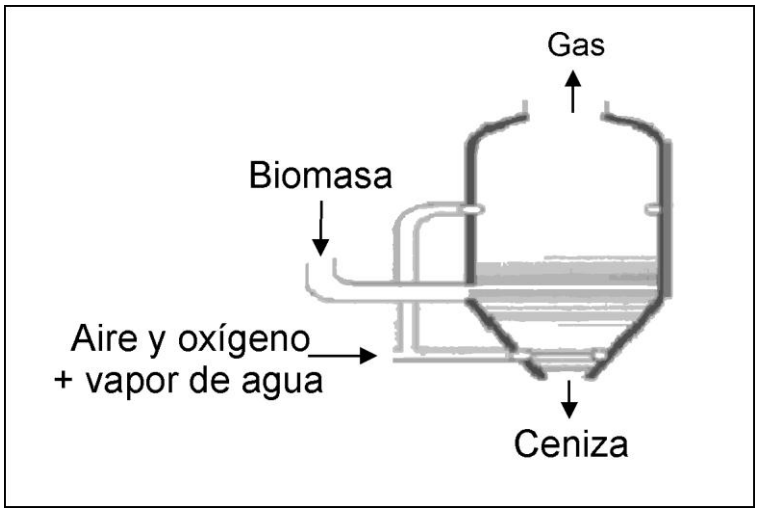

Figura 5.8 Gasificador de lecho fluidizado

Fuente: Modificado de Almeida 2010. Gasificación de lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas (EDAR)

b) Tipos de agentes Gasificantes

Los tipos de agentes gasificantes son aire, oxígeno, aire/oxígeno y vapor de agua y aire/oxigeno y catalizadores[11].

El agente gasificante seleccionado en este proceso aire/oxígeno y vapor de agua, dado que se obtiene un gas enriquecido en hidrógeno (H_2) y monóxido de carbono (CO), por lo que aumenta el contenido energético del gas; a diferencia del aire que presenta un bajo

[11] Información en Muniesa Bastida & Velo García (2005); Almeida (2010)

contenido energético, ya que se diluye con el nitrógeno (N_2) del aire, y el oxígeno (O_2) presenta un contenido energético medio, pero es muy caro ya que su generación es costosa.

c) Variables de funcionamiento

- *Temperatura:* En un proceso de gasificación de biosólidos, la temperatura de funcionamiento está entre 800 y 900ºC (Almeida, 2010). A mayores temperaturas se genera una mayor concentración de hidrogeno (H_2) y monóxido de carbono (CO) (aumenta contenido energético del gas), pero excederla incrementa la cantidad de alquitranes, Por lo tanto la temperatura seleccionada es de 800°C.
- *Ratio Equivalente (ER):* Relación másica entre el aire/oxígeno y el biosólido introducido en el reactor; puede variar entre 0.2 y 0.4. Se debe utilizar un valor suficientemente bajo como para asegurar un PCI aceptable, y lo suficientemente alto como para que el contenido de alquitranes no represente un problema, por lo que en este estudio se elige de 0.3; con este valor se asegura una producción mínima de alquitranes con un alto rendimiento energético.
- Ratio H/C: Relación entre los moles de hidrogeno y los de carbono existentes en el gasificador asociados al biosólido, humedad y vapor de agua introducida con el aire. Valores entre 1.6 y 2.3 aseguran la disminución de alquitranes con un alto contenido de hidrogeno (H_2) y monóxido de carbono (CO).

d) Acondicionamiento del gas

- *Limpieza de partículas sólidas:* Como ya se mencionó, las partículas sólidas (cenizas) que puedan haber sido arrastradas con el gas deben ser retiradas para proteger el resto de los equipos de la erosión y la corrosión, aparte de que para la cogeneración de electricidad en la turbina se necesita un gas muy limpio. Esto se consigue mediante el paso del gas por un sistema de ciclones y un filtro cerámico, lográndose reducir hasta niveles de 3 mg/Nm^3. En este proceso, estas partículas sólidas son llevadas junto con las cenizas a una disposición controlada.
- *Limpieza de alquitranes:* Hay que tomar en consideración el problema de la formación de alquitranes. La concentración de alquitranes es función del tipo de reactor utilizado, del tiempo de residencia, de la temperatura de gasificación (a menor temperatura, más alquitranes) y de la sustancia que se gasifica (a más cantidad de volátiles, más alquitranes) (Almeida, 2010). La formación de estos compuestos es indeseada debido a que representan carbonos no aprovechados para generar gas producto. Hay diferentes opciones para solucionar este problema de alquitranes[12].

[12] Información en Almeida (2010).

El principal mecanismo de limpieza utilizado es un lavador (*scrubber*) y el proceso consiste en aumentar el tamaño de las partículas para que éstas sean separadas fácilmente. Comprenden, por consiguiente, una sección de contacto gas-líquido (aceite), seguida de una sección donde las partículas húmedas son separadas mediante fuerzas inerciales. Las colisiones entre partículas de polvo y gotas liquidas se llevan a cabo según el tipo de torre lavadora y pueden ser por gravitación, choque, impulsión mecánica de las gotas liquidas, etc.

e) Recuperación energética

- *Energía térmica:* La corriente de gases generados en el gasificador tiene una temperatura entre 800 y 900ºC, posibilitando un aprovechamiento de este calor para aumentar la eficiencia energética del proceso. Por tal motivo, en este proceso se considera un recuperador de calor (fluidos gas de síntesis caliente- aire frío) que supla parte de la demanda energética del horno utilizado para el secado de los biosólidos. El calor generado en la combustión del gas de síntesis es recuperado también mediante recuperadores con el fin de cubrir la energía necesaria para el calentamiento del aire y para complementar la del secador.
- *Generación de energía eléctrica:* El gas obtenido, una vez limpio y enfriado, es un combustible que puede ser utilizado para la generación de energía eléctrica. Hay diversas alternativas para ello, como los motores a gas, las turbinas de gas o bien el ciclo combinado.El seleccionado en este proceso es la generación eléctrica a partir de una turbina de gas, debido a la simplicidad operacional, las altas eficiencias, los bajos costos y las bajas emisiones. La energía generada suple los requerimientos energéticos del agua (vapor) que entra como agente gasificante al reactor. El diagrama del proceso se presenta en la Figura 5.9.

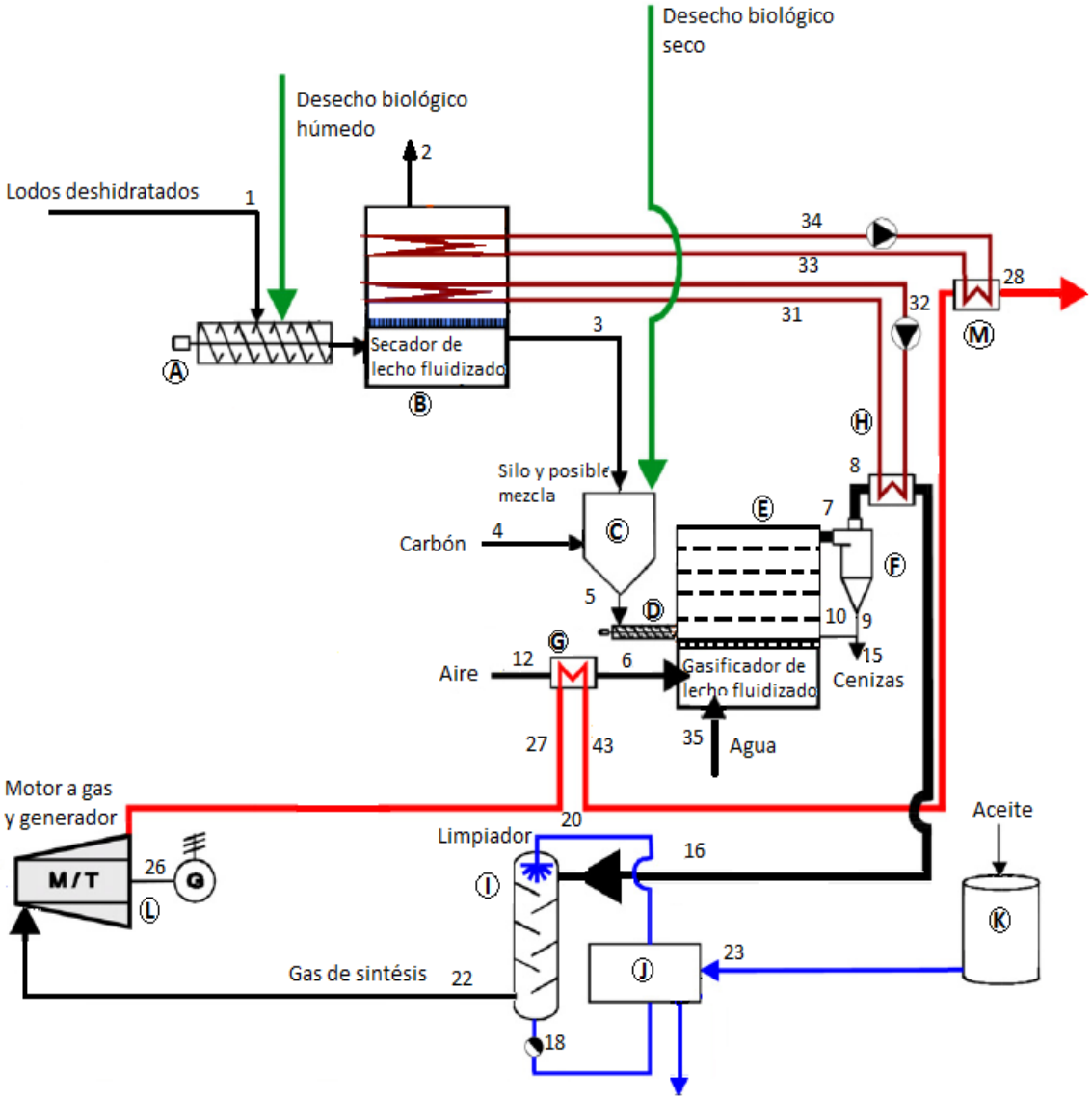

Figura 5.9 Diagrama del proceso de gasificación de los biosólidos por lecho fluidizado

Fuente: Basado en Gross et al.,2008. Energy recovery from sewage sludge by means of fluidised bed gasification.

Los biosólidos y deshidratados previamente en la PTAR, entran mediante un dosificador (tornillo sin fin) al secador de lecho fluidizado para retirar todo el contenido de humedad. Según cómo se realice este secado térmico, el producto tendrá formas diferentes. En el secador de lecho fluidizado, el producto sale en forma de pélets (gránulos pequeños) que luego fluidizarán correctamente en el gasificador; si se utiliza otro tipo de secador, el producto no serán gránulos, creándose la necesidad de usar un peletizador de biosólidos, cuya función es la de transformar ese biosólido (que esta pulverizado) en pelets. De esta manera, usando un secador de lecho fluidizado se evita la etapa de peletización.

Seguidamente pasa a un silo, en donde es mezclado con un 10% de carbono[13], con el fin de favorecer la fluidización aparte de que se logra una mejora en el poder calorífico del lodo. En el reactor de lecho fluidizado tienen lugar las reacciones térmicas (Almeida, 2010); (Muniesa Bastida & Velo García, 2005), en la parte intermedia del reactor salen las cenizas más densas y en la parte superior el gas caliente que conlleva cierta cantidad de cenizas volantes, por lo que el gas es pasado por un filtro cerámico y un sistema de ciclones que atrapan éstas cenizas (estas cenizas no se recirculan, se disponen de manera controlada), posteriormente mediante un recuperador de calor (flujo gas de síntesis caliente-aire frío); como su nombre lo dice se recupera el calor del gas de síntesis para suplir parte de la demanda energética del secador de lecho fluidizado.

El gas limpio de cenizas aún contiene alquitranes por lo que es conducido a un sistema limpiador cuyo fluido es un aceite térmico, descomponiendo los alquitranes en cenizas, metales y otros compuestos carbonosos quedando retenidos en el filtro; esta torta es recirculada al gasificador y solo se cambia dos veces al año para darles una disposición controlada. Finalmente, el gas de síntesis es combustionado en una turbina de gas, la generación de electricidad suple los requerimientos energéticos para el calentamiento del agua y la energía térmica producida para suplir las demandas energéticas del aire y parte del secador. Es así como emergéticamente el producto a valorar en esta aplicación es la generación de electricidad.

5.3. Aplicación de la metodología emergética a las dos alternativas

- ***Límites del sistema***

  Para ambas alternativas de aprovechamiento el proceso parte desde un mismo producto: los lodos estabilizados y deshidratados que entrega la PTAR seleccionada para su aprovechamiento (producto final del diagrama de la figura 5.5), dando como producto final pasto kikuyo para la primera alternativa y electricidad para la segunda. La delimitación para ambos sistemas se presenta en la Figura 5.10

[13] información en (Muniesa Bastida & Velo García, 2005) (Almeida, 2010).

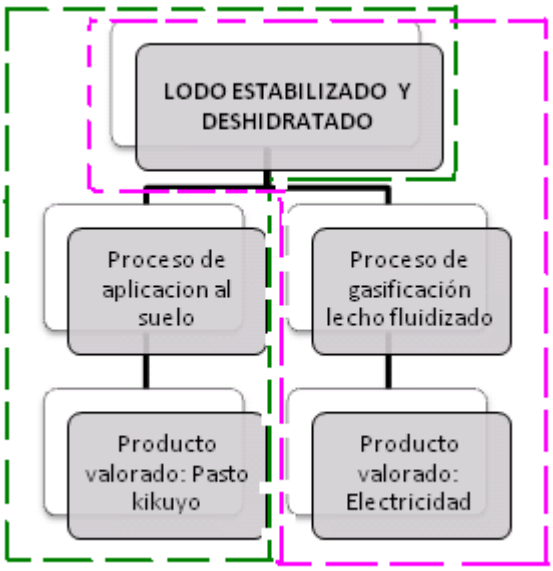

Figura 5.10 Delimitación de los sistemas de estudio

- ***Clasificación de todas las entradas***

  Como se ha tratado en capítulos anteriores, la sostenibilidad es función de la carga ambiental y de las clases de fuentes implicadas en el proceso (recursos renovables y no renovables), siendo sostenible aquel que sea altamente dependiente de los recursos renovables e insostenible el que contenga mayores recursos importados. Por tanto, la definición de renovabilidad y no renovabilidad es sumamente sensible y significativa en el método emergético.

Considerando a los recursos renovables como aquellas fuentes que no se agotan con su utilización, debido a que se regeneran a una tasa mayor que la tasa de utilización o consumo (entre los que se encuentra el agua, la biomasa y todo ser viviente), y los no renovables como aquellos que no pueden ser producidos, regenerados o reutilizados a una escala tal que pueda sostener su tasa de consumo o no se pueden regenerar en periodos geológicos cortos (como las fuentes que están en reservorios y son productos de las actividades geológicas), los biosólidos pueden considerarse como renovables (en el análisis emergético aun no se ha determinado el tipo de fuente de estos, dado que no hay estudios reportados hasta la fecha que analicen su disposición o aprovechamiento).

No obstante, ¿Hasta qué punto son renovables? Los recursos renovables pueden dejar de serlo si su tasa de utilización es tan alta que evita su renovación; por esta razón los biosólidos que fueron tomados como renovables (recurso que la PTAR provee para diferentes usos), pueden dejar de serlo, hasta el punto de tener que pagar por ellos, pues su demanda como recurso valioso es mayor que su oferta. Por esta razón los biosólidos también se tomaron como recursos importados o comprados para su aprovechamiento.

Es así como se analizaron cuatro escenarios, tomando los biosólidos como fuentes renovables e importadas para cada alternativa; pues, como se menciona, la sostenibilidad de un proceso está en función de los recursos importados y renovables, siendo variables altamente significantes dentro del análisis emergético.

Simultáneamente, en el sistema agrícola, los biosólidos se fraccionaron en sus componentes: biomasa, nutrientes (nitrógeno, fósforo y potasio), y metales pesados[14] (níquel, cromo, cadmio y plomo), debido a que analizando la influencia de estos dentro del análisis emergético, se incide en un error al tomarse como unidad pues los metales pesados aportarían a la emergía sostenibilidad en el sistema, y no se evidenciaría su influencia en la pérdida de productividad del suelo o toxicidad del mismo.

- ***Clasificación de las entradas en el sistema de aprovechamiento de biosólidos como fertilizantes de suelos***

Sin contar los biosólidos que será tomado como **R** y **F**, para la aplicación en el suelo se toma como recursos renovables (**R)** el sol, la lluvia y el aire, pues inciden directamente sobre la hectárea de suelo a analizar. Por otro lado, recursos no renovables (**NR),** en el análisis emergético se toman como la pérdida de suelo ya sea por procesos erodables, de desertificación o, en este caso, por la pérdida de productividad por acumulación de metales pesados; aunque se evidenció que no hay una acumulación significativa (Zapata *et al*., 2011); más adelante, en la etapa de cálculos se profundiza en este ítem (en ningún estudio agrícola se ha valorado emergéticamente la incidencia de la acumulación de metales pesados en el suelo). Y por ultimo los recursos importados (**F),** en el que se encuentra la electricidad asociada a la potencia eléctrica consumida por la bomba que se utiliza para bombear y aplicar el biosólido, el combustible gastado en transporte, la maquinaria relacionada con la bomba de riego, el camión de transporte, la mano de obra y, por último, los costos de la fitoremediación realizada al suelo cuando cumple su vida útil de productividad y/o alcance las concentraciones limite de metales pesados establecidos por la EPA para asumir que un suelo no es utilizable ni para fines agronómicos ni agrícolas.

Se hace necesario mezclar el biosólido con 10% de agua para mejorar sus propiedades de fluidización; este insumo no es contabilizado, pues se asume que ésta es agua lluvia almacenada en un estanque dentro de la misma hectárea con una capacidad de m^2; cantidad insignificante (Zapata *et al*., 2011) comparada con las altas precipitaciones del lugar en que se aplican los biosólido (Municipio de Entrerios, Antioquia). Es de resaltar que a los biosólidos no se les realiza ningún tipo de pretratamiento para aplicarlos al suelo.

[14] información en EPM 2011 (Zapata *et al*., 2011)

En los anexos 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5 se presentan detalladamente la clasificación de estos insumos para el sistema agrícola, tomando los biosólidos como fuentes importadas y renovables respectivamente.

- ***Clasificación de las entradas al sistema de gasificación de biosólidos***

Para el sistema de gasificación, por lo descrito en el apartado anterior entre los recursos renovables (R) se encuentra el sol, la lluvia y el aire; aunque éstos no inciden directamente en el proceso, la hectárea ocupada por la planta de gasificación está recibiendo todos estos insumos privando a la naturaleza de recibirlos, por tanto se tienen que contabilizar. Por otro lado, los recursos no renovables **N** asociados al carbón y el aceite de ignición. Finalmente los recursos importados (**F)** están relacionados a el combustible usado para transporte, la electricidad requerida para suplir el consumo de potencia de la bomba, el consumo eléctrico del compresor (aire) y de la resistencia para calentar el agua (vapor que entra como agente gasificante), la maquinaria relacionado con dos tornillos sin fin, un compresor, una bomba, la turbina, el gasificador y otros pesos despreciables (silos y ciclones, limpiador, secador de lecho fluidizado), y por último se encuentra el costo de la mano de obra, el agua utilizada como agente gasificante y el costo de disposición de los residuos (cenizas, alquitranes, aceites y metales pesados).

En el Anexo 5.1 y 5.2 se presenta detalladamente la clasificación de estos insumos para el sistema de recuperación de energía, tomando los biosólidos como fuentes importadas y renovables respectivamente.

A continuación se presenta el diagrama emergético que plasma la interacción de todas las fuentes de entrada en el sistema, acorde a lo que se ha venido explicando para cada alternativa de disposición. En la Figura 5.11 se detalla emergéticamente el proceso de gasificación, y en la Figura 5.121 se detalla para el proceso de aplicación del biosólido en suelos agrícolas, donde simplemente el biosólido es dividido en biomasa, metales pesados y nutrientes, posteriormente es mezclado con agua para mejorar la en el suelo.

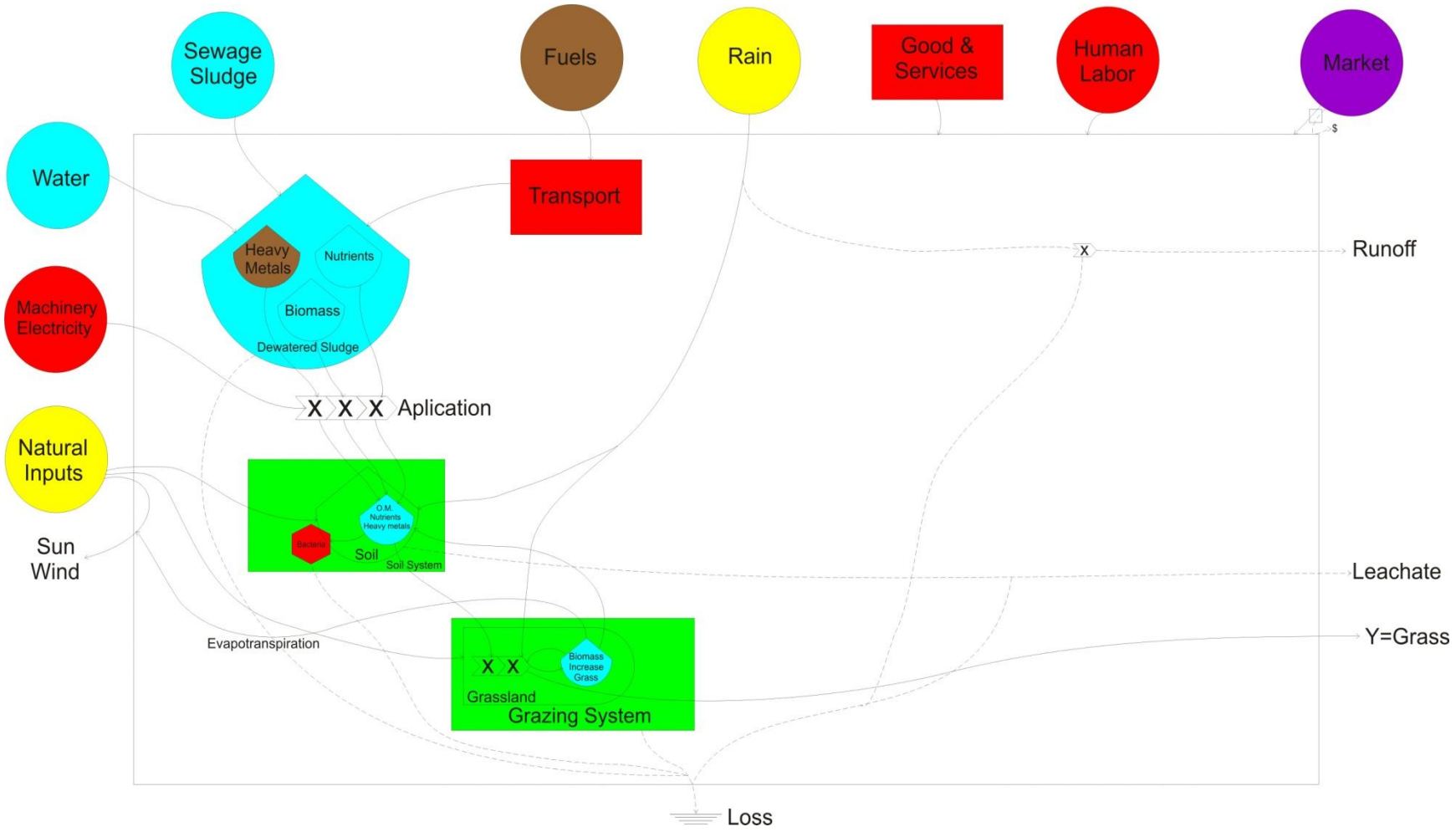

Figura 5.11 Diagrama emergético del uso de los biosólidos como fertilizante de suelos

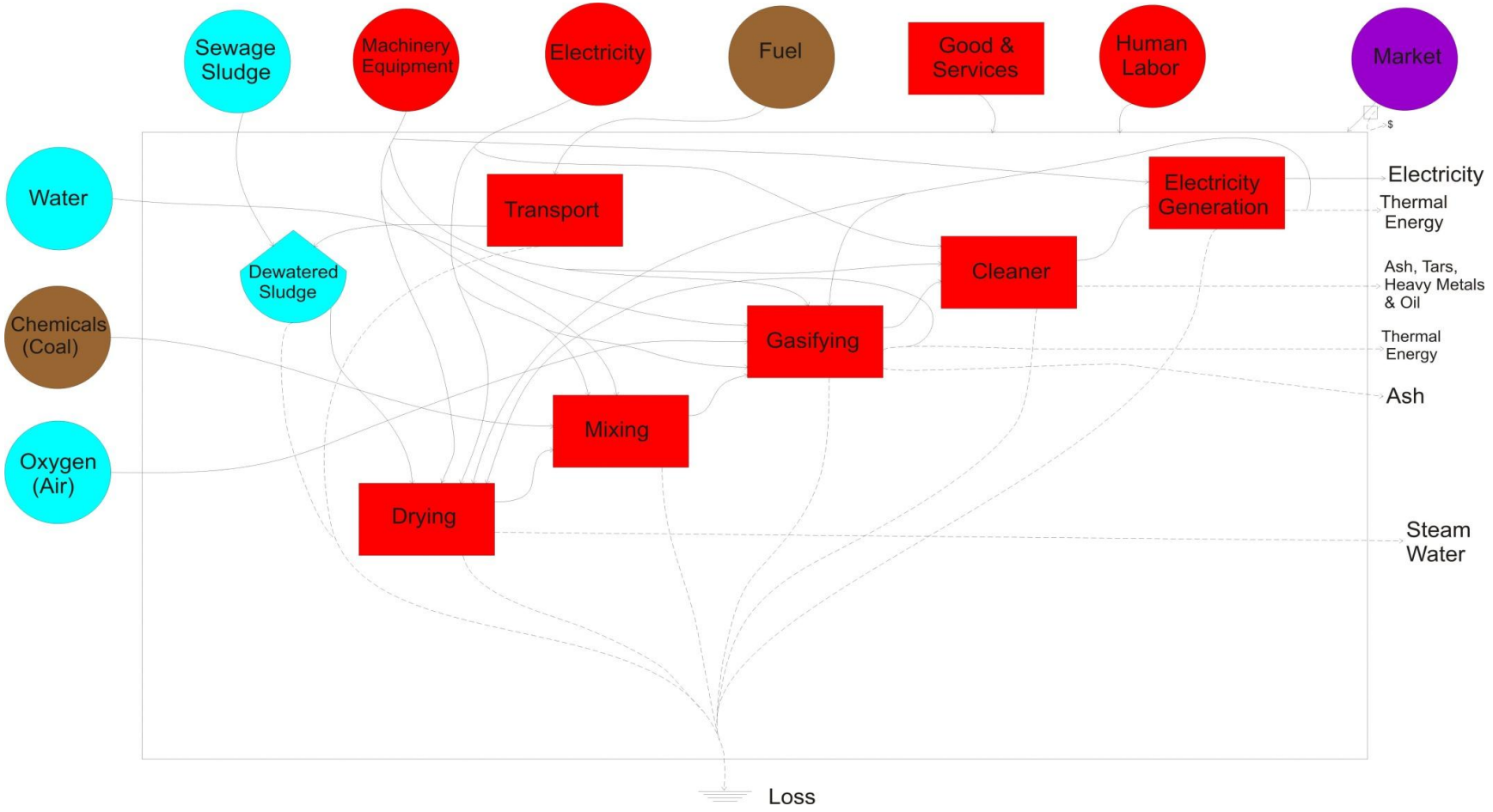

Figura 5.12 Diagrama emergético de la recuperación de energía de los biosólidos mediante gasificación por lecho fluidizado

En la figura 5.11 se describe allí la sinergia entre los microorganismos del suelo y los nutrientes aplicados; ésta consiste en la mineralización de la materia orgánica por parte de los microorganismos del suelo que la utilizan como fuente de energía en presencia de oxígeno, dejando de esta manera los nutrientes y otros compuestos requeridos para el crecimiento de las plantas de una forma más disponible para poder ser absorbidos por la vegetación (pasto) evidenciándose en el incremento de la biomasa; al mismo tiempo, la biomasa mediante su proceso fotosintético va a generar materia orgánica y oxígeno que lo devuelve al suelo y se comienza nuevamente con el ciclo teniendo como producto final pasto kikuyo. En las ecuaciones 5.4 y 5.5 se resumen todo este proceso sinérgico del suelo figurado en el diagrama emergético de la Figura 5.121 y del cual tampoco se han realizado estudios (diagramas emergéticos) que muestren esta interacción.

$$MO + O_2 \rightarrow H_2O + nutrientes + CO_2 \qquad \text{Ec 5.4}$$

$$H_2O + nutrientes + CO_2 \rightarrow MO + O_2 \qquad \text{Ec 5.5}$$

De igual manera, en la Figura 5.13 (Benavides López & Caicedo Montoya, 2012) se muestra el diseño de un humedal realizado en la materia “Tratamiento Biológico de Aguas Residuales” por estudiantes de Ingeniería Biológica de la Universidad Nacional, en el que se presenta el mismo comportamiento sinérgico descrito en la reacción ya mencionada.

Figura 5.13 Diseño de un humedal a escala de laboratorio

Fuente: Tomado de Benavides López & Caicedo Montoya, 2012. Diseño de un Humedal

Retomando, para ambos sistemas de aprovechamiento se parte del mismo lodo y transporte para iniciarse cada proceso. Se supone que la planta de gasificación y el sitio donde se aplican los biosólidos al suelo se encuentran a una misma distancia, con el fin de no ser subjetivos y no beneficiar uno u otra alternativa en cuanto al consumo de

combustible, que es uno de los elementos que aporta más emergía al proceso ya que tiene una transformicidad alta, siendo por esta razón una variable significativa.

- ***Elaboración de la tabla emergética para el sistema agrícola***

Ya seleccionadas y clasificadas las fuentes que entran a este sistema, se procede a realizar los cálculos energéticos para cada una de ellas. En el Anexo 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5 se describe de manera detallada y exhaustiva cada uno de estos, con las respectivas referencias de los datos utilizados.

Los cálculos de la energía aportada por los recursos renovables (sol, lluvia y viento) son exclusivamente para la ciudad de Medellín (precipitación, radiación solar, velocidad del viento); no obstante, aunque se realizan los cálculos para estas tres entradas, al final sólo se suma viento y lluvia, pues estos son un subproducto del sol y por tanto llevan el mismo contenido de emergía ya que son productos de una misma fuente, y uno es una consecuencia del otro. Por esta razón si se suman todos se estaría cayendo en una doble contabilización.

En cuanto a los recursos no renovables (**N**), para sistemas agrícolas está referenciado (Agostinho et al., 2008; Castellini *et al*., 2006; Jindarom, Meeyoo, Rirksomboon, & Rangsunvigit, 2007; Lu *et al*., 2006; Zhang *et al*., 2007) que se toma como la pérdida de suelo por fenómenos de meteorización y demás; en este trabajo no se consideró la perdida por meteorización, debido a que los resultados del estudio realizado para este sistema (Zapata *et al.,* 2011) asegura que una de las ventajas de la aplicación del biosólido al suelo, radica en las mejoras de las propiedades físicas del mismo, ya que forma agregados sumamente estables y resistentes difícilmente dispersables.

Aunque los metales pesados que aporta el biosólido sumados a los que se encuentran naturalmente en el suelo no se acumulan significativamente por cada aplicación de biosólidos (Zapata *et al.,* 2011), se tiene que considerar que pasados los años esta acumulación se va a empezar a evidenciar y no es tan insignificativa como se preveía, causando de esta manera la toxicidad en los suelos hasta el punto de volverlos improductivos; de lo contrario, ignorando este aspecto, se estaría incurriendo en el error de tomar el suelo como un sumidero infinito de depósito de biosólidos.

Por tal motivo, se realizó una simulación (Anexo 5.5) teniendo en cuenta y normalizando las concentraciones de los metales pesados presentes inicialmente en el suelo, el porcentaje de metales pesados aportados por el biosólido y los límites máximos para la concentración de metales pesados presentes en suelos estandarizados por la EPA (Tabla 5.5); superados estos límites, los suelos se vuelven improductivos e inutilizables para aprovechamiento agrícola o agronómico.

Tabla 5.5 Concentración de metales pesados en el suelo, biosólido y límites de la EPA

Límites EPA (mg/kg)[1]	
Cadmio	1
Cromo	100
Níquel	30
Plomo	250
Concentración de metales en el Suelo[2] (mg/kg)	
Cadmio	0,58
Cromo	7
Níquel	5,3
Plomo	8,3
Concentración de metales pesado en el biosólido[2] mg/kg)	
Cadmio	1,8
Cromo	317,6
Níquel	70,5
Plomo	21,4

Fuente: Tomado de EPA (1986). 6/278/EEC

La simulación arroja que el número de aplicaciones de biosólidos que se puede hacer sin violar los intervalos establecidos por la EPA es de 120 pastoreos, considerando que se hacen siete aplicaciones al año con un período de descanso de 45 días y que la raíz del pasto kikuyo sólo alcanza los 10 cm de profundidad. En cada aplicación de biosólidos la altura del suelo aumenta 0.05 cm. Para 120 aplicaciones se tiene aproximadamente 17 años hábiles, con una fracción anual de pérdida de suelo (productividad) de 0.058 lo que corresponde a 46.666 kg al año (Anexo 5.5).

Como se ve en la Figura 5.14, el primer metal que alcanza los límites estandarizados es el cromo; esto era de esperarse dado que corresponde a la mayor fracción de los metales presentes en el biosólido y es el segundo metal más abundante en el suelo, aunque no sea el más restringido por la EPA. El único metal que no sobrepasa estos límites después de 17 años de aplicación de biosólidos es el plomo, pues corresponde al metal menos restringido por la EPA. Ya conocida la cantidad de suelo perdido anualmente es calculada la fuente no renovable del sistema (**N**).

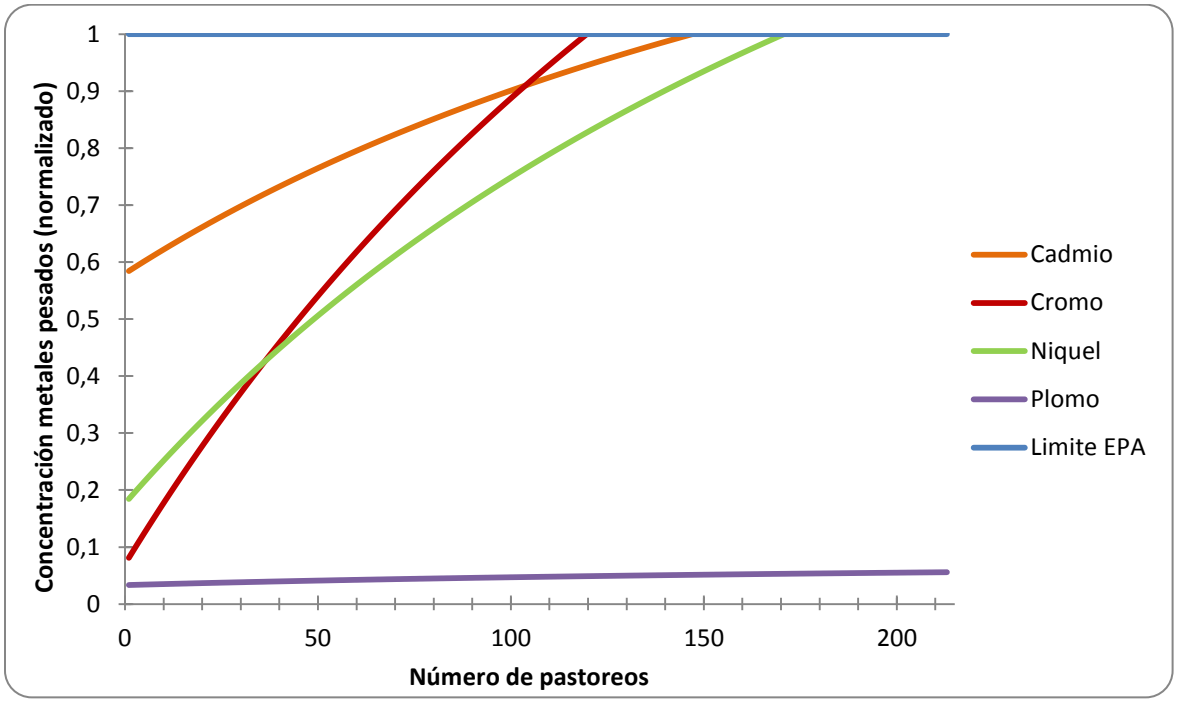

Figura 5.14 Simulación de la acumulación de metales pesados en suelos fertilizados con biosólidos

Por último, otro aspecto a rescatar en los cálculos para el sistema agrícola, dado que tampoco se ha considerado en los estudios referenciados sobre el tema, es el costo por la recuperación del suelo gastado o degradado mediante técnicas de fitorremediación (Jiang *et al*., 2007). Si bien el suelo tiene la capacidad de degradar algunos de sus compuestos y reciclar nutrientes a través de las plantas, dicha capacidad tiene un límite, el cual una vez sobrepasada puede llegar a la degradación y contaminación del suelo, de las aguas superficiales y subterráneas, y a la captación de metales pesados por las plantas que sustenta, incorporando de esta manera elementos contaminantes a la cadena trófica, potencialmente perjudiciales a la salud humana y animal. Por tanto, la fitorremediación es un método que utiliza plantas para descontaminar suelos y lodos, lo que representa ventajas económicas y ecológicas (Calvo, Otero, Jenkins, García, & Morán, 2004). El tiempo que toma descontaminar un sitio depende de diversos factores como tipo y número de plantas que se emplean, tipo y cantidad de sustancias químicas presentes, tamaño y profundidad del área contaminada, tipo de suelo y condiciones ambientales presentes (EPA, 2003), es así como esta técnica permite reducir, estabilizar o transformar una amplia variedad de contaminantes (Miller, 1966).

Para la disposición de los biosólidos en el suelo, dado que todos los datos requeridos (Zapata *et al.,* 2011) están referidos a cuatro aplicaciones durante siete meses para un total de 11 ton/ha de biosólido aplicado, haciendo las respectivas conversiones, se tiene que para un año se aplican aproximadamente 20 toneladas de biosólido por hectárea. Como se dijo en capítulos anteriores, las transformicidades se tomaron de estudios anteriores y se utilizó el Emergy Money Ratio de Ecuador.

Para este sistema se parte de la misma cantidad de biosólidos utilizados en el anterior (20 toneladas) y se supone que el área ocupada por la planta de gasificación también es una hectárea, de esta manera el cálculo de los recursos renovables es el mismo que para el sistema agrícola.

Los cálculos de los flujos energéticos de las fuentes no renovables e importadas se realizan con base al balance de materia y energía utilizando las consideraciones y supuestos descritas en la sección variables del proceso de gasificación; dichos balances se realizaron para cada uno de los equipos presentados en el diagrama de la Figura 5.9, en la que se muestra la numeración de cada una de las corrientes (ver Anexo 5.), las propiedades termodinámicas utilizadas fueron simuladas en Aspen Plus (2001).

Del balance de materia y energía se tiene:

- Se recuperan 0.70 kW y 0.38 kW de calor en la turbina utilizado para calentar el aire (agente gasificante) que entra al reactor y para suplir parte de la energía demandada por el secador de lecho fluidizado.
- Se recupera 4.91 kW de calor del gas de síntesis de salida del reactor utilizado para suplir parte de la energía demandada por el secador de lecho fluidizado.
- La turbina genera 0.24 kW de potencia eléctrica, utilizada para suplir 0.099 kW para el calentamiento del agua que entra al reactor.

Tanto para el sistema térmico como para el agrícola, toda la maquinaria se selecciona utilizando factores de conversión para llevar las unidades de los flujos másicos a las unidades de los caudales operativos de uso comercial para los diferentes tipos de maquinas requeridas, de esta manera se garantiza el flujo de los caudales necesarios en cada etapa del proceso.

En la Tabla 5.6, Tabla 5.7, Tabla 5.8 y Tabla 5.9 se presentan todos los cálculos emergéticos para cada una de las entradas renovables, no renovables e importadas; presentándose como la fracción que cada una de éstas aporta a la emergía total del proceso, para el sistema agrícola y térmico, tomando los biosólidos como una fuente importada y renovable respectivamente.

Tabla 5.6 Evaluación energética del pasto kikuyo abonado con lodo (hectárea por año). Biosólido como F

Note	Item	Unit	Data (units/yr)	Unit Solar EMERGY* (seJ/unit)	Solar EMERGY (E13 seJ/yr)	Em$ Value ($/yr)	Fraction EMERGY
RENEWABLE RESOURCES							
1	Sun	J	5.72E+13	1	5.7	6.6	
2	Rain, chemical energy	J	1.33E+11	3.10E+04	413	475	0.043
3	Wind, cinetic energy	J	3.63E+08	2.45E+03	0.09	0.10	0.00001
NONRENEWABLE STORAGES							
4	Net soil loss (heavy metals from the sludge)	J	2.2E+11	1.24E+05	2747	3157	0.29
PURCHASED INPUTS							
5	Fuel	J	5.48E+10	1.11E+05	607	698	0.064
6	Electricity	J	8.10E+09	2.69E+05	218	250	0.023
7	Machinery	g	5.54E+04	1.79E+10	99	114	0.010
8	Phosphate (from the sludge)	g	1.86E+05	1.60E+10	297	341	0.031
9	Nitrogen (from the sludge)	g	3.60E+05	6.38E+09	230	264	0.024
10	Potash (from the sludge)	g	6.00E+04	1.74E+09	10	12	0.001
11	Biomass (from the sludge)	g	2.00E+07	2.70E+09	4863	5590	0.510
12	Labor	J	9.42E+07	4.45E+06	41.9	48	0.004
23	Fitorremediacion	U$	1.17E+03	8.70E+12	1015	1167	0.107
	Total Emergy				9527	10950.18	1
TRANSFORMITIES, Calculated							
14	Total Yield, Grass weight	Ton	280				
	Transformity			3.40E+08			
	Emergy Money Ratio	8.70E+12					
	Grass sale Price (U$ Dollars)	3111					
	NR	**R**	**F**	**Y**	**Y (g, J, $)**		
	2747	414	6366	9527	10950.18		
	0.288	0.043	0.668	1.00			

Tabla 5.7 Evaluación energética del pasto kikuyo abonado con lodo (hectárea por año). Biosólido como R

Note	Item	Unit	Data (units/yr)	Unit Solar EMERGY* (seJ/unit)	Solar EMERGY (E13 seJ/yr)	Em$ Value ($/yr)	Fraction EMERGY
RENEWABLE RESOURCES							
1	Sun	J	5.72E+13	1	5.7	6.6	
2	Rain, chemical energy	J	1.33E+11	3.10E+04	413	475	0.043
3	Wind, cinetic energy	J	3.63E+08	2.45E+03	0.09	0.10	0.000
8	Phosphate (from the sludge)	g	1.86E+05	1.60E+10	297	341	0.031
9	Nitrogen (from the sludge)	g	3.60E+05	6.38E+09	230	264	0.024
10	Potash (from the sludge)	g	6.00E+04	1.74E+09	10	12	0.001
11	Biomass (from the sludge)	g	2.00E+07	2.70E+09	4863	5590	0.510
NONRENEWABLE STORAGES							
4	Net soil loss (heavy metals from the sludge)	J	2.2E+11	1.24E+05	2747	3157	0.288
PURCHASED INPUTS							
5	Fuel	J	5.48E+10	1.11E+05	607	698	0.064
6	Electricity	J	8.10E+09	2.69E+05	218	250	0.023
7	Machinery	g	5.54E+04	1.79E+10	99	114	0.010
12	Labor	J	9.42E+07	4.45E+06	42	48	0.004
23	Fitorremediacion	U$	1.17E+03	8.70E+12	1015	1167	0.107
	Total Emergy				9527	10950.18	1
TRANSFORMITIES, Calculated							
14	Total Yield, Grass weight	Ton	280				
	Transformity			3.40E+08			
	Emergy Money Ratio	8.70E+12					
	Grass sale Price (U$ Dollars)	3111					
	NR	**R**	**F**	**Y**	**Y (g, J, $)**		
	2747	5814	966	9527	10950.18		
	0.288	0.610	0.101	1			

Tabla 5.8 Evaluación energética del proceso de generación de electricidad mediante gasificación del biosólido por lecho fluidizado (hectárea por año). Biosólido como F

Note	Item	Unit	Data (units/yr)	Unit Solar EMERGY* (seJ/unit)	Solar EMERGY (E13 seJ/yr)	Em$ Value ($/yr)	Fraction EMERGY
RENEWABLE RESOURCES							
1	Sun	J	5.72E+13	1	6	6.6	
2	Rain, chemical energy	J	1.33E+11	3.10E+04	413	475.3	0.034
3	Wind, cinetic energy	J	3.63E+08	2.45E+03	0.1	0.1	0.00001
4	Oxigen (in air)	g	1.30E+07	5.16E+07	67	77.0	0.005
NONRENEWABLE STORAGES							
5	Carbón	J	3.28E+10	3.92E+04	129	147.8	0.010
6	ignition oil	J	1.20E+09	6.60E+04	8	9.1	0.001
PURCHASED INPUTS							
7	Fuel	J	5.48E+10	1.11E+05	607	698.2	0.050
8	Electricity (mixing, drying, gasyfing,. Gas cleaning)	J	8.19E+09	2.69E+05	220	253.2	0.018
9	Machinery	g	2.80E+06	1.79E+10	5004	5751.5	0.408
10	Biomass (from the sludge)	g	2.00E+07	2.70E+09	5400	6206.9	0.441
11	Labor	J	5.32E+08	4.45E+06	237	272.2	0.019
12	H2O	g	3.83E+04	6.64E+05	3	2.9	0.000
13	Disposal cost	U$	1.93E+02	8.70E+12	168	193.0	0.014
	Total Emergy				12256	14087.1	1.000
TRANSFORMITIES, Calculated							
14	Total Yield, Electricity	KW	262336.59			72.871275	
	Transformity (Sej/j)			4.67E+08			
	Emergy Money Ratio	8.70E+12					
	Electricity Sale price (U$ Dollars)	14.5					
	NR	**R**	**F**	**Y**	**Y (g, J, $)**		
	137	481	11639	12256	14087.07		
	0.011	0.039	0.950	1			

Tabla 5.9 Evaluación energética del proceso de generación de electricidad mediante gasificación del biosólido por lecho fluidizado (hectárea por año). Biosólido como R

Note	Item	Unit	Data (units/yr)	Unit Solar EMERGY* (seJ/unit)	Solar EMERGY (E13 seJ/yr)	Em$ Value ($/yr)	Fraction EMERGY
RENEWABLE RESOURCES							
1	Sun	J	5.72E+13	1	6	6.6	
2	Rain, chemical energy	J	1.33E+11	3.10E+04	413	475.3	0.034
3	Wind, cinetic energy	J	3.63E+08	2.45E+03	0.1	0.1	0.00001
4	Oxigen (in air)	g	1.30E+07	5.16E+07	67	77.0	0.005
10	Biomass (from the sludge)	g	2.00E+07	2.70E+09	5400	6206.9	0.441
NONRENEWABLE STORAGES							
5	Carbón	J	3.28E+10	3.92E+04	129	147.8	0.010
6	ignition oil	J	1.20E+09	6.60E+04	8	9.1	0.001
PURCHASED INPUTS							
7	Fuel	J	5.48E+10	1.11E+05	607	698.2	0.050
8	Electricity (mixing, drying, gasyfing,. Gas cleaning)	J	8.19E+09	2.69E+05	220	253.2	0.018
9	Machinery	g	2.80E+06	1.79E+10	5004	5751.5	0.408
11	Labor	J	5.32E+08	4.45E+06	237	272.2	0.019
12	H2O	g	3.83E+04	6.64E+05	3	2.9	0.000
13	Disposal cost	U$	1.93E+02	8.70E+12	168	193.0	0.014
	Total Emergy				12256	14087.1	1
TRANSFORMITIES, Calculated							
14	Total Yield, Electricity	KW	262336.59			72.871275	
	Transformity (Sej/j)			4.67E+08			
	Emergy Money Ratio	8.70E+12					
	Electricity Sale price (U$ Dollars)	14.5					
	NR	**R**	**F**	**Y**	**Y (g, J, $)**		
	137	5881	6239	12256	14087.07		
	0.011	0.480	0.509	1			

- ***Cálculo de los índices emergéticos de las alternativas consideradas***

Ya conocidos los recursos renovables(R), los recursos no renovables (N) e importados (F) para cada escenario de las dos alternativas evaluadas, se calculan los índices como se explicó con antelación en el marco teórico y metodología.

Tabla 5.10 Índices emergéticos de las dos alternativas evaluadas

INDICES	Agricultura Biosólido F	Agricultura Biosólido R	Térmico Biosólido F	Térmico Biosólido R	Intervalos
ELR (Índice de Carga Ambiental)	22,04	0.64	24,50	1,08	3<>10
EYR(Índice de Rendimiento Emergético)	1,50	9,86	1,05	1,96	2<>5
ESI (Índice de Sostenibilidad)	**0,07**	**15,44**	**0,04**	**1,81**	1<>5
EIR (Índice de Inversión Emergética)	2,01	0,11	18,86	1,04	+<>-
% Renovabilidad	4,34	61,02	3,92	47,98	
SEC (Costo Emergético del Suelo)	0,29	0,29			1<
EER (Índice de Tasa de Cambio Emergético)	3,52	3,52	970,21	970,21	1<, 1>, =1

- *Índice de carga ambiental (ELR)*

El índice de carga ambiental para las dos alternativas donde se presentan los biosólidos como una fuente importada, exhibe un alto impacto ambiental, no evidenciándose una diferencia significativa entre ellas. Considerar los biosólidos como una fuente renovable o importada influye mucho en el resultado; esto ~~se~~ evidencia que ambas alternativas pasan de ser grandes generadores de impactos ambientales cuando estos se toman como recurso importado, a ser muy amigables con el ambiente (impacto ambiental muy bajo) cuando se toma como recurso renovable.

De esta manera ninguna de las dos alternativas es ambientalmente aceptable cuando los biosólidos se consideran como una fuente importada y lo son (hasta el punto de considerarse “buenas”) cuando estos son clasificados como renovables, presentándose una mejor viabilidad ambiental en la alternativa de utilización de los biosólidos como fertilizantes. Esto era de esperarse, ya que este índice es alto para sistemas con altas entradas no renovables e importadas.

- *Índice de rendimiento emergético (EYR)*

Hablando en términos económicos, mientras más alto sea el EYR más energía está proporcionando el proceso frente a la que se retira, siendo éste el caso del sistema agrícola cuando los biosólidos son renovables; es decir, se presenta un aprovechamiento energético y por lo tanto económico, a diferencia de si se toma como importado. Caracterizando los biosólidos como fuentes importadas, las dos disposiciones presentan un muy bajo beneficio económico (no presentándose mucha diferencia entre ambas), debido a que la única fuente renovable (para los dos sistemas) es la lluvia y el viento; esta dos fuentes no son significativamente a la emergía del proceso por las bajas precipitaciones y velocidades del viento que se presentan en la ciudad de Medellín. Sin embargo, aunque en el proceso de gasificación el biosólido se tome como renovable continúa presentando bajos rendimientos económicos, por no decir que pérdidas; la principal razón es porque este proceso está basado en el uso de fuentes importadas y no renovables, el 50 % de la emergía total del proceso utiliza fuentes compradas, a pesar de que el biosólido tomado como renovable (R), compensa en un 45% los recursos importados del sistema.

- *Índice de sostenibilidad (ESI)*

El ESI que permite relacionar el aspecto ambiental con el económico y por ende energético, muestra que las dos alternativas no son sostenibles a largo plazo cuando el biosólido es una fuente importada; pues para ambas no hay un rendimiento económico y energético, ni tampoco son ambientalmente aceptables.

Ahora, en el proceso de gasificación contabilizando el biosólido como recurso renovable, en términos de sostenibilidad; se presenta una contribución aceptable a la economía a mediano plazo, a pesar que se encuentra en límite inferior del intervalo estandarizado, pues a pesar que en este escenario se presenta un muy bajo estrés ambiental, económicamente no es tan viable (aunque no genera pérdidas) ya que no hay una explotación de los recursos locales; esto quiere decir que si el país entra en crisis económica, este proceso no tiene la posibilidad de autosostenerse. A diferencia del sistema agrícola con biosólido residual, que por su valor de 15.44, se considera un proceso aún subdesarrollado; es decir, es un proceso el cual puede ser mucho más explotado porque todavía tiene mucha más capacidad de entregar energía o un mayor rendimiento económico sin causar impactos ambientales considerables; en otras palabras, es un proceso que no ha entregado toda su energía (rendimiento económico) brindando la posibilidad de ser explotado desde el aspecto económico, pues el ambiente tiene la capacidad de asimilar más impactos sin degradar su calidad. Es un proceso donde falta más intervención del hombre para ser explotado.

Para el escenario donde los biosólidos son entradas importadas, ambos sistemas son insostenibles a largo plazo, por la relación que existe entre el porcentaje de entradas renovables e importadas. Retomando el concepto de sostenibilidad tratado en capítulos

anteriores, la sostenibilidad de un proceso depende principalmente de los tipos de recursos o de energías que intervienen en los mismos, siendo sostenible la dependencia de estos de los recursos renovables y no de los que no son renovables, a largo plazo sólo sistemas con un alto porcentaje de emergía renovable capturada son sostenibles.

- *Índice de inversión emergética*

El índice de inversión emergética exhibe que el único escenario competitivo y próspero en el mercado es cuando se utilizan los biosólidos como fuentes renovables para aprovecharlos como fertilizantes, pues requiere de poca inversión para llevarse a cabo; es decir, la emergía atribuida a los recursos importados (F) respecto a la emergía total es muy baja(10%), a diferencia de cuando los biosólidos son tomados para ésta misma alternativa como recurso importado, debido a que la emergía asociada a los recursos importados respecto a la total es muy alta (66%), presentando un comportamiento muy similar al escenario donde los biosólidos gasificados se clasifican como renovables. El escenario menos favorable es el del uso de los biosólidos para recuperación energética cuando se consideran importados por las razones anteriormente expuestas.

- *% Renovabilidad*

El porcentaje de renovabilidad simplemente indica la fracción de energía renovable usada en el sistema; lógicamente el valor más alto lo presenta el sistema agrícola cuando los biosólidos son entradas renovables, por ende es el escenario con mayor probabilidad de ser sostenible y prevalecer en el tiempo, seguido por el sistema térmico con la misma consideración. Los escenarios menos favorecidos ambos sistemas cuando el biosólido es caracterizado como importado; esto indica que el biosólido aporta un gran porcentaje de emergía a los sistemas térmico y agrícola (44 y 52 %, respectivamente, frente a la emergía total).

Similarmente, la fracción de emergía aportada por los demás recursos renovables (aire y lluvia) no es significativa; esto es reflejado en la relativa pequeña diferencia que hay entre los dos sistemas cuando el biosólido es tomado como una fuente importada.

- *Costo emergético del suelo (SEC)*

El costo emergético del suelo es independiente del tipo de escenario que se considere en el sistema agrícola, dado que la variable implicada son las fuentes no renovables y ésta es inalterable (pérdida de productividad del suelo por la presencia de metales pesados). El valor de 0.29 se considera muy bajo (se compara respecto a la unidad), indicando que la pérdida de suelo es baja respecto al rendimiento total.

- *Índice de tasa de cambio energético (EER)*

El canje emergético es independiente de cómo se clasifiquen los biosólidos, ya que simplemente se basa en la emergía total y no discretiza las fuentes. Define quién gana o pierde en el comercio económico con relación al consumidor y productor.

Para las dos alternativas el productor recibió menos emergía de la que fue utilizada para producir el bien; es decir, se suplió mas emergía al consumidor (en términos monetarios) respecto a la que fue recibida en el intercambio, representando una menor pérdida para el productor del pasto que para el de la electricidad. Esto quiere decir que no se obtuvieron ganancias económicas por el producto generado, esto invita a valorar realmente emergéticamente el precio de los productos obtenidos en ambos procesos.

5.4. Comparación de las dos alternativas para los cuatro escenarios evaluados

Con el fin de complementar uno de los principios básicos del análisis emergético, (herramienta para la toma de decisiones ambientales), se utilizó un diagrama ternario desarrollado por Giannetti *et al*., (2006).

El diagrama emergético ternario tiene tres componentes: R, N y F; cada vértice del triangulo representa un componente y cada lado un sistema binario. La composición de cualquier sistema en un diagrama ternario puede ser determinado mediante la lectura del cero a lo largo de la línea basal anterior del diagrama hasta el 100% del otro vértice del triangulo (Giannetti *et al*., 2006). El tamaño de los puntos del diagrama ternario es proporcional a la emergía utilizada.

En la Figura 5.15 (1. sistema agrícola biosólido renovable, 2.sistema agrícola biosólido importado) se compara los dos escenarios para el sistema agrícola y presentan la misma cantidad de emergía utilizada (tamaño de los puntos sólidos). Tomando los biosólidos como recursos renovables (R), las fuentes renovables totales en el sistema llegan a un 60%, en contraste al 4% si no se tomaran de esta manera. Ninguno de los dos escenarios logra ubicarse en el área óptima de sostenibilidad (1‹ESI‹5), siendo insostenible para la primera opción porque tiene un alto porcentaje de recursos renovables a la vez que presenta un bajo porcentaje de recursos importados (F), indicando que el proceso puede ser explotado aún más, pues no se ha logrado alcanzar el máximo rendimiento económico con un mínimo impacto ambiental (la naturaleza tiene la capacidad de asimilar más carga ambiental) y para la segunda opción por la dependencia tan grande de recursos importados (F); así, no hay una explotación de los recursos locales y el proceso es económicamente inviable.

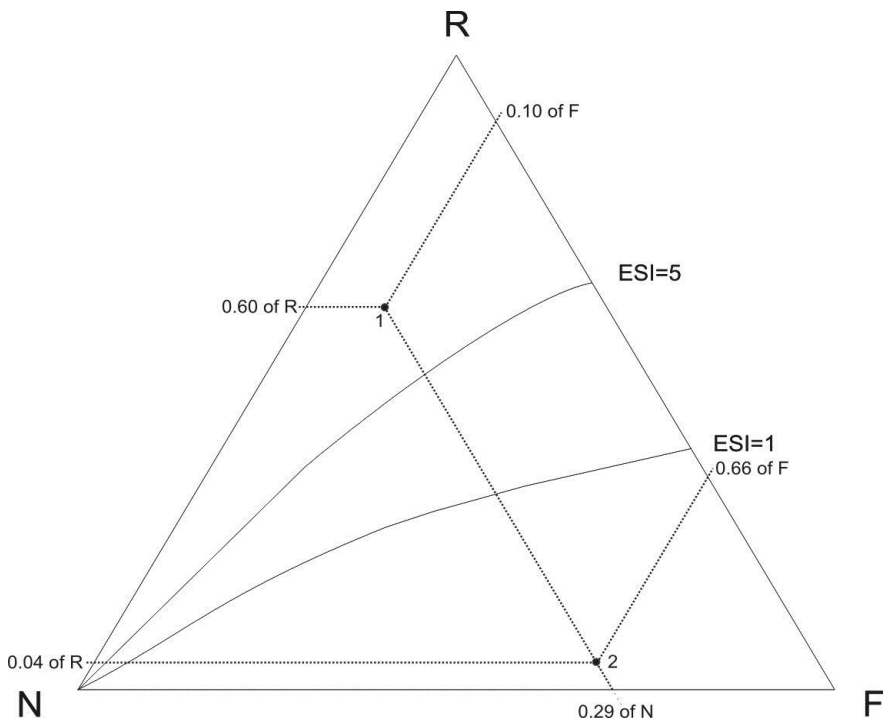

Figura 5.15 Comparación emergética del sistema agrícola considerando los biosólidos como R y F

Se compara el sistema térmico bajo los dos escenarios y la emergía total requerida para producir gas de síntesis es la misma. Considerando los biosólidos como recursos renovables, el sistema logra ubicarse en la región óptima del diagrama, ya que se alcanza un **equilibrio** entre las fuentes renovables e importadas. A diferencia si se toma como recurso importado, debido a que no se equilibran los dos tipos de entradas (recursos renovables e importados); se aporta al sistema un 95% de recursos importados y un 4 % de recursos renovables. Para el sistema actual y el anterior los recursos no renovables no cambian y quedan inalterados.

En la Figura 5.16 (1.sistema térmico biosólido renovable, 2.sistema gasificación biosólido importado). Ambos sistemas son insostenibles (no se ubican en la región optima), ya que el sistema de gasificación y agrícola presentan un 95 % y 66% de recursos importados (F) respectivamente, con un mismo porcentaje de entradas renovables. Esto refleja que la cantidad de emergía aportada por el oxígeno utilizado como agente gasificante en el primer sistema, es insignificante; al igual que la emergía aportada por el aceite de ignición y el carbón como fuentes no renovables respecto a la pérdida de suelo (29%) en el sistema agrícola.

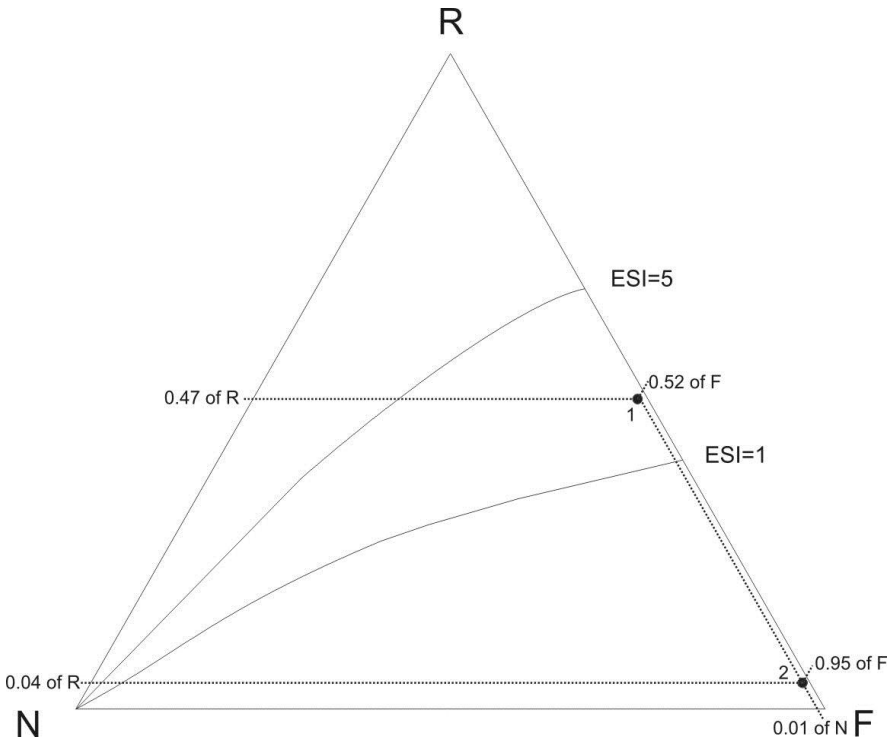

Figura 5.16 Comparación emergética del sistema de térmico considerando los biosólidos como R y F

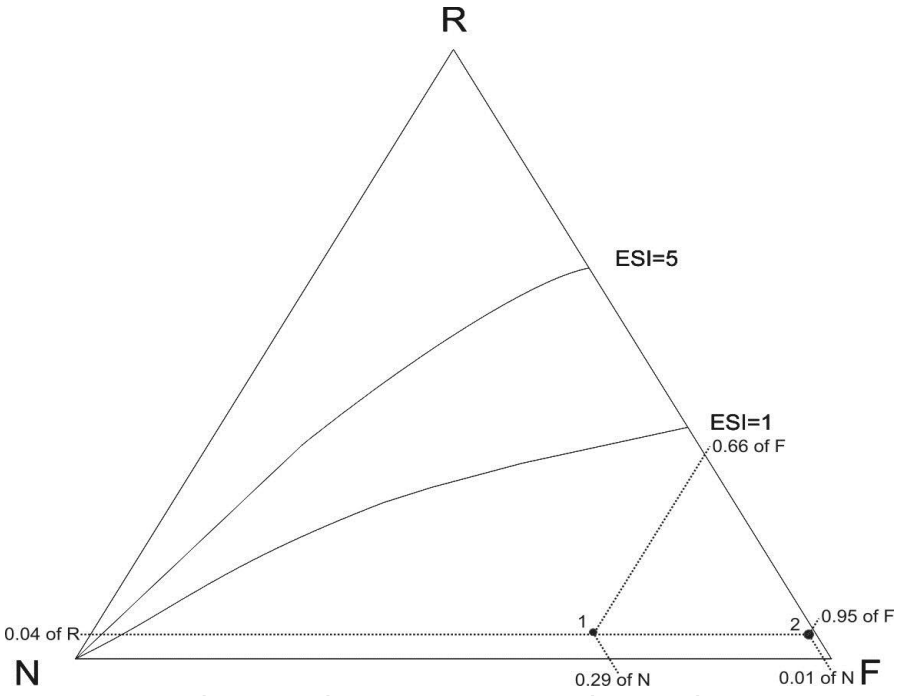

Figura 5.17 Comparación emergética del sistema agrícola y térmico considerando los biosólidos como F

En la Figura 5.17 (1. sistema agrícola biosólido importado, 2. sistema térmico biosólido importado) y 5.18 (1. sistema agricola biosólido renovable, 2. Sistema termico biosólido importado) se exhiben los dos sistemas considerando los biosólidos como recursos importados y renovables respectivamente. Ya se explicó la razón del porque el comportamiento para ambos sistemas

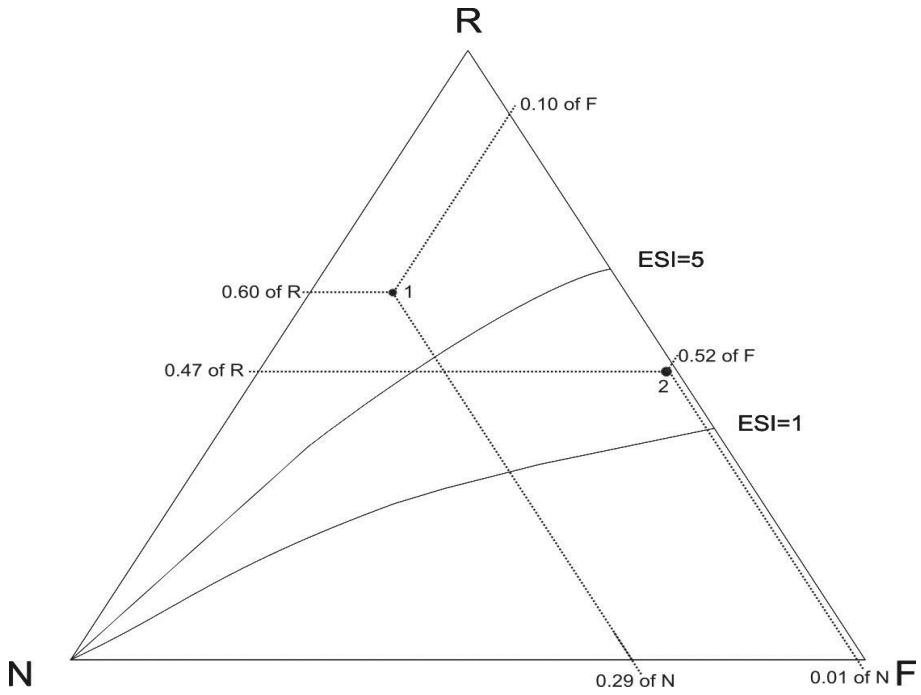

Figura 5.18. Comparación emergética del sistema agrícola y térmico considerando los biosólidos como R

Basados en que un proceso sostenible es aquel que presente el *mayor rendimiento económico con la menor carga medioambiental,* en la Figura 5.189 (1. sistema agrícola biosólido renovable, 2. sistema térmico biosólido renovable, 3. sistema agrícola biosólido importado, 4. sistema térmico biosólido importado) se presentan los cuatro escenarios analizados de manera conjunta. Se concluye que el proceso es insostenible tanto desde el aspecto económico como ambiental para las dos alternativas cuando los biosólidos son considerados importados.

Cuando los biosólidos son considerados como entradas renovables, el sistema térmico presenta una sostenibilidad, no alcanzando el tope más alto, pues se encuentra muy cercano al límite inferior; es decir, el proceso es sostenible a mediano plazo, aunque no se asegura a largo plazo. El sistema agrícola es considerado subdesarrollado, ya que no se ha sobreexplotado a su tope máximo (mayor rendimiento económico con la menor carga ambiental) presentando la posibilidad de obtener un mayor rendimiento económico dado que el ambiente no ha llegado a su límite de degradación; en otras palabras, el sistema natural puede asimilar más carga ambiental sin sufrir ningún deterioro.

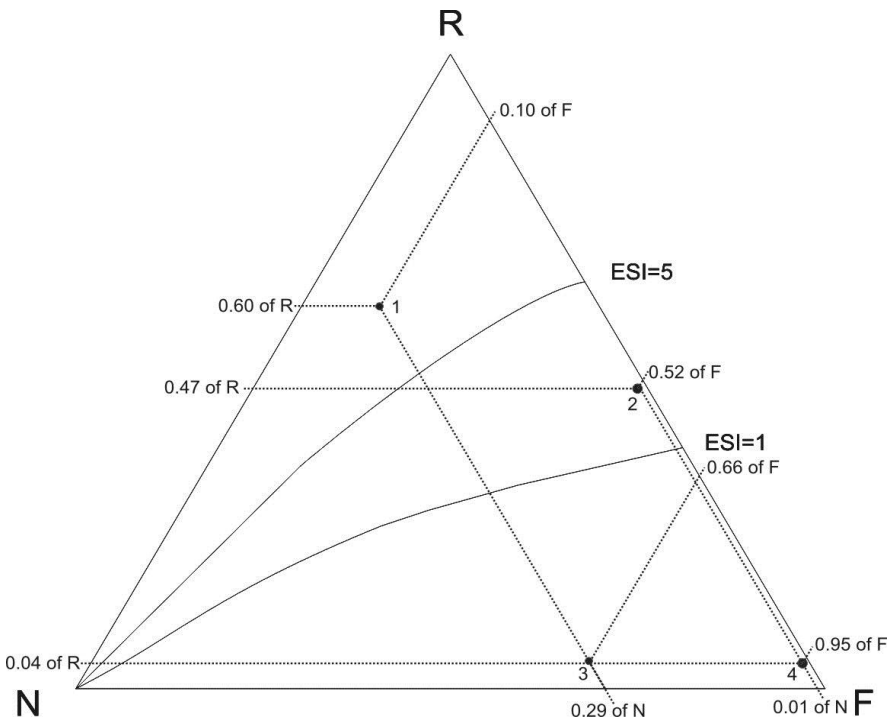

Figura 5.19 Comparación emergética del sistema agrícola y térmico considerando los biosólidos como F y R

De esta manera, la mejor alternativa más no la óptima para el aprovechamiento de los biosólidos generados en una PTAR en el Área Metropolitana del valle de Aburrá desde el punto de vista emergético, es aquella referenciada en la bibliografía como la adecuada: recuperación energética de los biosólidos mediante gasificación por lecho fluidizado. No diciendo que la actual disposición de los biosólidos sea inadecuada económica o ambientalmente; antes al contrario, no genera estrés ambiental debido a que no se le está sacando el rendimiento económico que ésta puede alcanzar.

En cuanto a la actual alternativa de disposición: uso de los biosólidos como fertilizantes para suelos, esta puede ser mejorada de tal forma que se logre el equilibrio entre las fuentes renovables e importadas. Una posible alternativa es la de someter los biosólidos estabilizados a un pos-tratamiento antes de ser aplicados a suelo. En este pos-tratamiento se disminuye la concentración de metales pesados y patógenos, llevando los biosólidos de clase A a clase B. Con este pos-tratamiento no sólo se aumentan los recursos importados al sistema, compensando la entrada de recursos renovables; también disminuyen las concentraciones de metales y patógenos en el suelo, lo que conlleva que se puedan hacer un mayor número de aplicaciones (el tiempo de productividad del suelo aumenta) sin restricciones, como lo recomienda Fytili & Zabaniotou (2008): previamente al uso de los biosólidos como fertilizantes se deben pos-tratar para minimizar al máximo estos compuestos, lo que conlleva a la generación de otros costos

Se puede decir entonces que la hipótesis planteada en esta tesis de maestría: el método del análisis emergético permite comparar dos alternativas de disposición integrando el aspecto energético, económico y ambiental ha sido corroborada mediante la investigación realizada. Pues el ***índice de sostenibilidad*** permitió integrar los tres aspectos, sirviendo como base para la comparación de la actual disposición de los biosólidos generados en una PTAR en el área Metropolitana del Valle de Aburrá respecto a la referenciada como la adecuada en la bibliografía bajo el criterio ambiental y económico.

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

La solución al tratamiento de las aguas residuales queda inconclusa sino se gestiona el aprovechamiento de los biosólidos estabilizados tipo B producto de dicho proceso; es decir, la prestación del servicio de tratamiento de aguas residuales no termina en la estabilización del biosólido sino en su aprovechamiento de manera sostenible; aspecto que no sólo le compete a los usuarios beneficiarios del servicio, sino también a las entidades comprometidas (aquellas asociadas directamente con la problemática, prestadora del servicio), reguladoras, o aquellas que ejercen algún tipo de control. Lo anterior se corrobora en el estudio de (Zhou *et al*., 2010), donde la intención es tomar los biosólidos estabilizados dentro del sistema de TAR, pero no se logra dado que no se evalúa la sostenibilidad de utilizar y aplicar el biosólido como compost en otro ecosistema.

Pese a que emergéticamente el proceso de tratamiento de las aguas residuales es inviable económicamente; pues más del 60% aproximadamente de la emergía total que entra al proceso corresponde a fuentes importadas, este proceso es considerado sostenible ya que este porcentaje es bajo comparado con el alto costo ambiental si se liberaran las aguas sin tratar al medio receptor.

El índice de sostenibilidad muestra que las dos alternativas no son sostenibles a largo plazo cuando el biosólido es una fuente importada; pues para ambas no hay un rendimiento económico y energético, ni tampoco son ambientalmente aceptables.

Cuando los biosólidos son clasificados como fuente renovables el sistema agrícola es considerado subdesarrollado, ya que no se ha sobreexplotado a su tope máximo (mayor rendimiento económico con la menor carga ambiental) presentando la posibilidad de proveer un mayor rendimiento económico.

La mejor alternativa “económicamente viable”, “energéticamente aprovechable” y “ ambientalmente aceptable”, para el aprovechamiento de los biosólidos generados en una PTAR en el Área Metropolitana del valle de Aburrá desde el punto de vista emergético, es aquella referenciada en la literatura como la más adecuada “Recuperación Energética de los Biosólidos mediante gasificación por Lecho Fluidizado” considerando los

biosólidos como fuente renovable, concluyéndose que el criterio (ambientalmente aceptable y económicamente viable) bajo el cual se escogió la alternativa a comparar fue el adecuado, No diciendo que el actual aprovechamiento de los biosólidos sea inadecuada económica o ambientalmente.

Se puede aprovechar la infraestructura actual de aprovechamiento de los biosólidos para qué sea sostenible de tal forma que se logre el equilibrio entre las fuentes renovables e importadas. La emergía no solo permite la valoración de la sostenibilidad de un proceso mediante el cálculo de los índices emergéticos, también permite mejorar o corregir las prácticas insostenibles.

La hipótesis planteada en esta tesis de maestría “El método del análisis emergético permite comparar dos alternativas de aprovechamiento integrando el aspecto energético, económico y ambiental” ha sido corroborada mediante la investigación realizada. Pues el ***índice de sostenibilidad*** permitió integrar los tres aspectos, sirviendo como base para la comparación del actual aprovechamiento de los biosólidos generados en una PTAR en el área Metropolitana del Valle de Aburrá con respecto a la referenciada como la más correcta en la literatura bajo el criterio ambiental y económico.

Recomendaciones

Partiendo del hecho, que se ha concluido que el tratamiento de las aguas residuales es un tratamiento incompleto, es necesario acoplar los sistemas de aprovechamiento (o el mejor sistema de aprovechamiento) evaluados a la PTAR, con el fin de tomarlo como un sistema holístico.

Con el fin de sobreexplotar el sistema de aprovechamiento de los biosólidos como fertilizantes de suelos, y sacarles el máximo rendimiento económico limitado por la mínima carga ambiental, en la que se garantice que no haya un deterioro ambiental; se recomienda pretratar el biosólido estabilizado antes de su aplicación con el fin de disminuir no solo la concentración de metales pesados, también llevarlo de clase B a clase A (disminución de patógenos. de esta manera se equilibran los recursos importados con respecto a los renovables, y los biosólidos no tendrían restricción de aplicación en suelos agrícolas por cuestiones de contenido de metales pesados y patógenos.

Es necesario que se trabaje a nivel académico e investigativo para que se apropien las practicas de la teoría del análisis emergético a nivel nacional, y para que su uso se implemente con miras al desarrollo sostenible de nuestra nación, e implementarlo en la formación profesional, apoyando aquellos programas que ya lo tienen planeado en cursos para posgrado en la Facultad de Minas.

Se puede tomar para trabajos futuros el cálculo del Emergy Money Ratio para Colombia, pues aún no está calculado y evitar así posibles errores en el cálculo del índice del “Emergy Exchange Ratio”

Bibliografía

Agostinho, F., Diniz, G., Siche, R., & Ortega, E. (2008). The use of emergy assessment and the Geographical Information System in the diagnosis of small family farms in Brazil. *Ecological Modelling*, *210*(1-2), 37-57.

Alliende, E. (2006). El peso de los lodos. [Consulta en Mayo de 2012] Retrieved from http://www.induambiente.cl/elpeso.htm

Almeida, J. M. (2010). *Gasificación de lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas (EDAR).* Universidad Politécnica de Madrid. Tesis doctoral.

Alvarez, F. H. (2005). Afinidades y disparidades entre disciplinas ecológicas y la economía. Fundación General de la Universidad Autónoma de Madrid Ed. Madrid.

Álvarez, S., Lomas, P. L., Martín, B., Rodríguez, M., & Montes, C. (2006). La síntesis emergética ("emergy synthesis"). Integrando energía, ecología y economía. Monografia. Universidad autónoma de Madrid España.

Andaluz Wastreicher, C. (2011). *Manual de Derecho Ambiental*. Editorial Iustitia, Lima (Perú).

Anthony, E. (1995). Fluidized bed combustion of alternative solid fuels; status, successes and problems of the technology. *Progress in Energy and Combustion Science*, *21*(3), 239-268.

Appels, L., Baeyens, J., Degrève, J., & Dewil, R. (2008). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, *34*(6), 755-781.

Arias, M. E., & Brown, M. T. (2009). Feasibility of using constructed treatment wetlands for municipal wastewater treatment in the Bogotá Savannah, Colombia. *Ecological Engineering*, *35*(7), 1070-1078.

Aznar, M. P., Caballero, M. A., Corella, J. Gil, J. & Martin, J. A. (1998). Commercial steam reforming catalysts to improve biomass gasification with steam oxygen mixtures, 2. Catalytic tar removal. *Ind Eng Chem Res*, *37*, 2668–2680.

Bargigli, S. (2004). Comparison of thermodynamic and environmental indexes of natural gas, syngas and hydrogen production processes. *Energy*, *29*(12-15), 2145-2159.

Bastianoni, S. Ã., Facchini, A., Susani, L., & Tiezzi, E. (2007). Emergy as a function of exergy. *Energy,* 32, 1158-1162.

Benavides López, S., & Caicedo Montoya, C. (2012). Diseño de un Humedal. Medellín. Trabajo del curso de Tratamiento de Aguas Residuales, Programa de Ingeniería Biológica, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Colombia.

Bjo, J., & Geber, U. (2001). Emergy analysis of municipal wastewater treatment and generation of electricity by digestion of sewage sludge. *Resources Conservation and Recycling*, (31), 293-316.

Brown, M. T., & Ulgiati, S. (2004). Emergy analysis and environmental accounting. *Encyclopedia Energy*, *2*, 329–354.

Brown, Mark T., Raugei, M., & Ulgiati, S. (2012). On boundaries and “investments” in Emergy Synthesis and LCA: A case study on thermal vs. photovoltaic electricity. *Ecological Indicators*, *15*(1), 227-235.

Calvo, L. F., Otero, M., Jenkins, B. M., García, A. I., & Morán, A. (2004). Heating process characteristics and kinetics of sewage sludge in different atmospheres. *Thermochimica Acta*, *409*(2), 127-135.

Cao, K., & Feng, X. (2007). The Emergy Analysis of Multi-Product Systems. *Process Safety and Environmental Protection*, *85*(5), 494-500.

Castellini, C., Bastianoni, S., Granai, C., Bosco, A. D., & Brunetti, M. (2006). Sustainability of poultry production using the emergy approach: Comparison of conventional and organic rearing systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *114*(2-4), 343-350.

Chen, B., Chen, Z. M., Zhou, Y., Zhou, J. B., & Chen, G. Q. (2009). Emergy as embodied energy based assessment for local sustainability of a constructed wetland in Beijing. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, *14*(2), 622-635.

Cherubini, F., Bargigli, S., & Ulgiati, S. (2009). Life Cycle Assessment (LCA) of waste management strategies: Landfilling, sorting plant and incineration. *Energy*, *34*(12), 2116-2123.

Chobanoglous. (1987). *Wastewater engineering, treatment, disposal and reuse*. (N. D. T. McGraw-Hill, Ed.). New York

Cohen, M. J., Brown, M. T., & Shepherd, K. D. (2006). Estimating the environmental costs of soil erosion at multiple scales in Kenya using emergy synthesis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *114*(2-4), 249-269.

Communities, (1999). Council Directive 99/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste.

Conesa, J. ., Marcilla, A, Moral, R., Moreno-Caselles, J., & Perez-Espinosa, A. (1998). Evolution of gases in the primary pyrolysis of different sewage sludges. *Thermochimica Acta*, *313*(1), 63-73. doi:10.1016/S0040-6031(97)00474-7

Davis, R. (1996). The impact of EU and UK environmental pressures on the future of sludge treatment and disposal. *J CIWEM*, *10*, 65-69.

Dayton, M. D. (2002). A review of the literatura on catalytic biomass tar destruction. Millestone Completion Report. *National Renewable Energy Laboratory U.S. N. NREL/TP-510-32815*.

Elías, X. (2005). *Tratamiento y valorizacion energetica de residuos*. (Diaz de Santos, Ed.). Madrid, España

Empresas Públicas de Medellín. ESP, (2006). Informe ambiental 2006, 50-52.

EPA. (1986). Commission of European Communities. Council Directive 86/278/EEC on the protection of the environment and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture.

EPA, (2003). A citizen's guide to phytoremediation. United States Environmental Protection Agency.

FATH, B. D., & Cabezas, H. (2004). Exergy and Fisher Information as ecological indices. *Ecological Modelling*, *174*, 25–35.

Fytili, D., & Zabaniotou, A. (2008). Utilization of sewage sludge in EU: application of old and new methods—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *12*(1), 116-140.

Gervin. (2004). *Lo que usted necesita saber sobre biosólidos*. [Artículo de Internet] [Consulta en Mayo de 2012] Disponible en :‹ http://www.wsscwater.com.12.

Geber, U., & Bjo, J. (2001). The relationship between ecosystem services and purchased input in Swedish wastewater treatment systems — A case study. *Ecological Engineering, 18, 39-59*.

Giannetti, B. F., Barrella, F. a., & Almeida, C. M. V. B. (2006). A combined tool for environmental scientists and decision makers: ternary diagrams and emergy accounting. *Journal of Cleaner Production*, *14*(2), 201-210.

Goldsmith, P. (1994). *Sanitary solutions. The Chemical Engineer*, 13-14.

Gross, B., Eder, C., Grziwa, P., Horst, J., & Kimmerle, K. (2008a). Energy recovery from sewage sludge by means of fluidised bed gasification. *Waste management (New York, N.Y.)*, *28*(10), 1819-26.

Gu, X.-Y., & Wong, J. W. C. (2007). Degradation of inhibitory substances by heterotrophic microorganisms during bioleaching of heavy metals from anaerobically digested sewage sludge. *Chemosphere*, *69*(2), 311-8.

Guinee, J. B., Goree, M., Heijungs, Huppes, R., Kleijn, A. de K., L. den Oers, A., Wegener Sleeswijk, S. (2002). *Handbook on Life Cycle Assessment. Operational Guide to the ISO Standards. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.* Netherlands.

Hall, J. ., & Dalimier, F. (1994). Sewage sludge: Survey of sludge production, treatment, quality and disposal. *Waste management*, *B4-3040/01*(Report No: 3646).

Hudson, J.A., & Lowe, P. (1996). Current technologies for sludge treatment and disposal. *Water and Enviroment Journal*, 10(6), 436–40.

ISO, 14040. (1998). Environmental management-Life cycle assessment-Principles and framework. International Organisation for Standardisation, Geneva, Switzerland.

Janosova, B., Miklankova, J., Hlavinek, P., & Wintgens, T. (2006). Drivers for wastewater reuse: regional analysis in the Czech Republic. *Desalination*, *187*(1-3), 103-114.

Jiang, M. M., Chen, B., Zhou, J. B., Tao, F. R., Li, Z., Yang, Z. F., & Chen, G. Q. (2007). Emergy account for biomass resource exploitation by agriculture in China. *Energy Policy*, *35*(9), 4704-4719.

Jiang, M. M., Zhou, J. B., Chen, B., & Chen, G. Q. (2008). Emergy-based ecological account for the Chinese economy in 2004. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, *13*(10), 2337-2356.

Jindarom, C., Meeyoo, V., Rirksomboon, T., & Rangsunvigit, P. (2007). Thermochemical decomposition of sewage sludge in CO_2 and N_2 atmosphere. *Chemosphere*, *67*(8), 1477-84.

Kääntee, U., Zevenhoven, R., Backman, R., & Hupa, M. (2004). Cement manufacturing using alternative fuels and the advantages of process modelling. *Fuel Processing Technology*, *85*(4), 293-301.

Knoef, H. A. . (2000). The UNDP/World Bank monitoring program on small scale biomass gasifiers (BTG`s experience on tar measurements). *Biomass and Bioenergy*, *18*(1), 39-54.

Koehlbrandhoeft. (1994). *Information Booklet, Wastewater Treatment Plant.* Hamburg.

Lapa, N., Barbosa, R., Lopes, M. H., Mendes, B., Abelha, P., Boavida, D., Gulyurtlu, I. (2007). Chemical and ecotoxicological characterization of ashes obtained from sewage sludge combustion in a fluidised-bed reactor. *Journal of hazardous materials*, *147*(1-2), 175-83.

Lasprilla, J., & Botero Diego. (2009). • *Valoración energética del proceso de secado de lodo activado deshidratado proveniente de una planta de tratamiento de aguas residuales*. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín Facultad de Minas Escuela de Procesos y Energía. Tesis para optar el titulo de Ingenieros Químicos.

Lei, K., & Wang, Z. (2008). Municipal wastes and their solar transformities: an emergy synthesis for Macao. *Waste management (New York, N.Y.)*, *28*(12), 2522-31.

Lior, N., & Zhang, N. (2007). Energy, Exergy, and Second Law Performance Criteria. *Energy*, *32*(4), 281-296.

Liu, X., & Chen, B. (2007). Efficiency and sustainability analysis of grain production in Jiangsu and Shaanxi Provinces of China. *Journal of Cleaner Production*, *15*(4), 313-322.

Liu, Y., Kong, S., Li, Y., & Zeng, H. (2009). Novel technology for sewage sludge utilization: preparation of amino acids chelated trace elements (AACTE) fertilizer. *Journal of hazardous materials*, *171*(1-3), 1159-67.

Lomas, P. L., Donato, M. D., & Ulgiati, S. (2007). La síntesis emergética : una valoración de los servicios de los ecosistemas con base termodinámica. *Revista Ecosistemas, 16*(3), 37-45.

Lomas & Huerta, P. (2009). Aportaciones de la síntesis emergética a la evaluación multi-escalar del empleo de los servicios de los ecosistemas a través de casos de estudio. Universidad Autónoma de Madrid, Facultad de Ciencias, Departamento de Ecología, Tesis doctoral.

Lu, H., Bai, Y., Ren, H., & Campbell, D. E. (2010). Integrated emergy, energy and economic evaluation of rice and vegetable production systems in alluvial paddy fields: implications for agricultural policy in China. *Journal of environmental management*, *91*(12), 2727-35.

Lu, H., Campbell, D. E., & LI.R. H. (2006). Emergy synthesis of an agro-forest restoration system in lower subtropical China. *Ecological Engineering. 27*, 175–192.

Lu, H. F., Campbell, D. E., Li, Z. A., & Ren, H. (2006). Emergy synthesis of an agro-forest restoration system in lower subtropical China. *Ecological Engineering*, *27*(3), 175-192.

Ludovisi, A., & Poletti, A. (2003). Use of thermodynamic indices as ecological indicators of the development state of lake ecosystems 2. Exergy and specific exergy indices. . *Ecological Modelling*, *159*, 223-238.

Manyà, J., Gonzal, A., Sánchez, J.L., Arauzo, J., Rocha, J.D., Mesa & J.M, (2005) Gasificación de fangos de depuradora en lecho fluidizado: influencia de la temperatura y de la relación estequiometria. Trabajo investigativo Universidad de Campinas y Zaragoza. Brazil-España.

Manzel, J., & Sevar, . (1989). Sevar drying process in a thin bed, 74-81.

Mathias, B (1994). *Basic knowledge of environmental technology*. (W. V. Buchverlag, Ed.) (2nd ed.).

Mathieu, P., & Dubuisson, R. (2002). Performance analysis of a biomass gasifier. *Water*, *43*, 1291-1299.

McGhee, T. (1991). *Water supply and sewerage*. McGraw-Hill, Ed.. New York.

Metcalf, & Eddy, (Ed.). (1991). *Wastewater engineering—treatment, disposal and reuse.* (3rd ed.). New York (USA).

Midilli, A., Dogru, M., Akay, G., & Howarth, C. R. (2002). Hydrogen production from sewage sludge via a fixed bed gasifier product gas. I*nternational Journal of Hydrogen Energy*, *27*, 1035-1041.

Midilli, A., Dogru, M., Howarth, C. R., & Ling, M. J. (2001). Combustible gas production from sewage sludge with a downdraft gasifier. *Energy Conversion & Management,* 42, 157-172

Miller, G. (1966). *The flux of tidal energy out of the deep oceans*. (J. G. Res, Ed.)

Muniesa Bastida, B., & Velo García, E. (2005). *Ingeniería básica de una planta de gasificación de lodos de EDAR para el tratamiento de 14.000 Mg/año de lodo seco*. Universidad Politecnica de Cataluña. Tesis de maestría. Retrieved from http://upcommons.upc.edu/pfc/browse?type=author&value=Muniesa+Bastida+%2C+Blanca

Nipattummakul, N., Ahmed, I. I., Kerdsuwan, S., & Gupta, A. K. (2010a). Hydrogen and syngas production from sewage sludge via steam gasification. *International Journal of Hydrogen Energy*, *35*(21), 11738-11745.

Nipattummakul, N., Ahmed, I., Kerdsuwan, S., & Gupta, A. K. (2010b). High temperature steam gasification of wastewater sludge. *Applied Energy*, *87*(12), 3729-3734.

Ocaña, V., Quintana, C., Dewulf, J. & Roque, P. (2008). Procedimiento para la valoración de la sostenibilidad energético–ambiental de estrategias energéticas. Monografía Estudio. Universidad central “Marta Abreu” de las villas facultad de ingeniería mecánica centro de estudio de termoenergética azucarera (ceeta).

Odum, H. (1973). *Energy, ecology and economics*. *Energy edition of ambio. No. 6.*

Odum, H.T. (1996). *Environmental accounting: Emergy and Environmental Decision Making*. (J. W. and Sons, Ed.). New York.

Odum, H.T. (1998). *Emergy evaluation. International workshop, advances in energy flows in ecology and economy.* Porto Venere, Italy.

Odum, H. T. (2001). *Environmental accounting, Emergy and Decision Making.* Ecological engineering. New York.

Odum, H., & Odum, B. (2003). Concepts and methods of ecological engineering. *Ecological Engineering*, *20*(5), 339-361.

Odum, H., Brown, M., & Brandt-Williams, S. (2000). *Handbook of emergy evaluation. Center for Environmental Policy. Environmental Engineerging Sciences*. (U. of F. Gainesville, Ed.). Florida. Retrieved from http://www.ees.ufl.edu/cep/emergydownloads.asp

Peng, T., Lu, H. F., Wu, W. L., Campbell, D. E., Zhao, G. S., Zou, J. H., & Chen, J. (2008). Should a small combined heat and power plant (CHP) open to its regional power and heat networks? Integrated economic, energy, and emergy evaluation of optimization plans for Jiufa CHP. *Energy*, *33*(3), 437-445.

Petersen, I., & Werther, J. (2005). Experimental investigation and modeling of gasification of sewage sludge in the circulating fluidized bed. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, *44*(7), 717-736. doi:10.1016/j.cep.2004.09.001

Poletschny, H. K. (1988). Sewage sludge—Useful or dangerous for agriculture. *Entsorgungspraxis-Spezial*, *10-13*.

Redclif. M. (1987). *Sustainable development: exploring the contradictions*. *Ecological Economics* Metheun, London. 217 pp

Reimann, D. (1989). Thermal conditioning of sludge (pp. 12-26).

Romdhana, M. H., Hamasaiid, A., Ladevie, B., & Lecomte, D. (2009). Energy valorization of industrial biomass: using a batch frying process for sewage sludge. *Bioresource technology*, *100*(15), 3740-4.

Romer, R., & Thermische, R. (1991). Thermal treatment of sewage sludge—Combustion, drying, energy recovery, emissions, 250-271.

Rótolo, G.C., Rydberg, T., Lieblein, G., Francis, C. (2007). Emergy evaluation of grazing cattle in Argentina`s Pampas. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 119, 383-395.

Rydberg, T., & Haden, A. (2006). Emergy evaluations of Denmark and Danish agriculture: Assessing the influence of changing resource availability on the organization of agriculture and society. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *117*(2-3), 145-158.

Schowanek, D., Carr, R., David, H., Douben, P., Hall, J., Kirchmann, H., Patria, L. (2004). A risk-based methodology for deriving quality standards for organic contaminants in sewage sludge for use in agriculture--Conceptual Framework. *Regulatory Toxicology And Pharmacology : RTP*, *40*(3), 227-51.

Sciubba, E., & Ulgiati, S. (2005). Emergy and exergy analyses: Complementary methods or irreducible ideological options? *Energy*, *30*(10), 1953-1988.

Sciubba, E. (2010). On the Second-Law inconsistency of Emergy Analysis. *Energy*, *35*(9), 3696-3706.

Sha, S., & Hurme, M. (2012). Emergy evaluation of combined heat and power plant processes. *Applied Thermal Engineering*, *43*, 67-74.

Siracusa, G., & La Rosa, A. D. (2006). Design of a constructed wetland for wastewater treatment in a Sicilian town and environmental evaluation using the emergy analysis. *Ecological Modelling*, *197*(3-4), 490-497.

Sklar, F. H., Constanza, R., & Day, J. W. (1990). *Model conceptualization. In Wetlands and Shallow Continental Water Bodies*. (B. . Patten, Ed.) (SPB Academ.).

Smith, K. M., Fowler, G. D., Pullket, S., & Graham, N. J. D. (2009). Sewage sludge-based adsorbents: a review of their production, properties and use in water treatment applications. *Water Research*, *43*(10), 2569-94.

Soibelzon, H. L. (2007). Aspectos de la sustentabilidad relacionados con la energía eléctrica. (pp. Tomo III: pp. 181 – 206.). Buenos Aires.

Solter, K., Peschen, N., Rohricht, K., & Gehrke, R. (1994). Simultaneous precipitation using lime in largescale operation—results, costs and advantages. *Awt-Abwassertechnik*, *1*, 19-23.

Ton, S., Odum, H. T., & Delfino, J. J. (1998). Ecological-economic evaluation of wetland management alternatives. *Ecological. Engineering.*, *11*, 291–302.

Universidad Pontificia Bolivariana. (2008). Seminario Internacional de Biocombustibles y Energías Renovables.

Ulgiati, S., Brown, M. T., Bastianoni, S., & Marchettini, N. (1995). Emergy based indices and ratios to evaluate the sustainable use of resources. *Ecol. Eng*, *5*, 519–531.

Vassallo, P. & Fabiano, M. (2009). Emergy required for the complete treatment of municipal wastewater. *Ecological Engineering*, *35*(5), 687-694.

Velez, J. (2007). Biosolids: A problem or a solution? *Producción mas Limpia*, *2*, 57-71.

Vesilind, P., & Ramsey, T. (1996). Effect of drying temperature on the fuel value of wastewater sludge. *Wastewater Management and Research*, *14*, 189-196.

Wall, G. & Gong, M. (2001). On exergy and sustainable development—Part 1: Conditions and concepts. *Exergy (Secon Edition)*, *1*(3), 128-45.

Wang, M. J. (1997). Land application of sewage sludge in China. *The Science of the total environment*, *197*(1-3), 149-60. Retrieved from http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9151437.

WEIDOU, N., & JOHANSSON, T. B. (2004). Energy for sustainable development in China. *Energy Policy*, *32*, 1225–1229.

Werther, J., & Ogada, T. (1999). Sewage sludge combustion. *Progress in Energy and Combustion Science, 25*, 55-116.

Xie, L.-Ping, Li, T., Gao, J.-Dong, Fei, X.-Ning, Wu, X., & Jiang, Y.-Guang. (2010). Effect of moisture content in sewage sludge on air gasification. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, *38*(5), 615-620.

Zapata, R., Osorio, N., Berrio, C., & Sotelo, (2011). Evaluación de los riesgos agronómico, ambiental y sanitario derivados de la aplicacion directa de los biosólidos para el cultivo de pastos en un agroecosistema de vocación lechera del norte de Antioquia. *Revista EPM*, 4, 8-38.

Zhang, X. H., Deng, S., Jiang, W., Zhang, Y., Peng, H., Li, L., Yang, G. (2010a). Emergy evaluation of the sustainability of two industrial systems based on wastes exchanges. *Resources, Conservation and Recycling*, *55*(2), 182-195.

Zhang, X., Deng, S., Wu, J., & Jiang, W. (2010b). A sustainability analysis of a municipal sewage treatment ecosystem based on emergy. *Ecological Engineering*, *36*(5), 685-696. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.ecoleng.2009.12.010

Zhang, X., Deng, S., Zhang, Y., Yang, G., Li, L., Qi, H., Xiao, H. (2011). Emergy evaluation of the impact of waste exchanges on the sustainability of industrial systems. *Ecological Engineering*, *37*(2), 206-216.

Zhang, G., & Long, W. (2010). A key review on emergy analysis and assessment of biomass resources for a sustainable future. *Energy Policy*, *38*(6), 2948-2955.

Zhang, L. X., Song, B., & Chen, B. (2012). Emergy-based analysis of four farming systems: insight into agricultural diversification in rural China. *Journal of Cleaner Production*, *28*, 33-44.

Zhang, L. X., Yang, Z. F., & Chen, G. Q. (2007). Emergy analysis of cropping–grazing system in Inner Mongolia Autonomous Region, China. *Energy Policy*, *35*(7), 3843-3855.

Zhou, J. B., Jiang, M. M., Chen, B., & Chen, G. Q. (2009). Emergy evaluations for constructed wetland and conventional wastewater treatments. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, *14*(4), 1781-1789.

Zhou, S. Y., Zhang, B., & Cai, Z. F. (2010). Emergy analysis of a farm biogas project in China: A biophysical perspective of agricultural ecological engineering. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, *15*(5), 1408-1418.

[Artículo de Internet] [Consulta en Febrero de 2012] http://www.emergysystems.org/folios.php.

[Artículo de Internet] [Consulta en Mayo de 2012] http://www.geocities.com/ptarcolombia/gestion.htm.

[Artículo de Internet] [Consulta en Mayo de 2012] http://www.unicamp.br/fea/ortega/curso/transformid.htm.

[Artículo de Internet] [Consulta en Junio de 2012] http://www.stcsa.es.

2.1. Anexo: Conceptos del análisis emergético

2.1.1. Características del método emergético

Una vez conocidos los principios del método de la contabilidad emergética, a continuación se resumen las principales características (Álvarez, Lomas, Martín, Rodríguez, & Montes, 2006):

- Carácter global e integrador. Análisis a distintas escalas, es decir se realiza el análisis desde una escala más amplia (menor detalle) a una más reducida (mayor detalle), teniendo en cuenta la escala temporal o memoria de los servicios usados.
- Se trata de uno de los pocos métodos de valoración que permite evaluar los sistemas económicos y naturales, así como las interacciones entre ambos con una metodología común.
- Maneja unidades estandarizadas (julios solares emergéticos o *seJ*). Considera distintos tipos de calidad energética. Emplea factores de estandarización (transformicidades) para hacer equivalentes todos los flujos de energía dentro de una jerarquía de sistemas complejos.
- Es capaz de estimar los valores de distintos componentes (tanto económicos como naturales) del sistema en unidades energéticas y ligar éstos a unidades monetarias, para hacerlo más comprensible, en un marco de referencia común (contabilidad ambiental).
- El valor (y los indicadores del mismo) no parte del individuo (de sus preferencias y/o conocimientos) sino que es intrínseco al recurso (el valor de un recurso es proporcional a la energía necesaria en su producción, denominada Emergía (Memoria Energética)). Pretende ser, por tanto, una teoría energética del valor (considerada objetiva y reproducible).
- Proporciona resultados cuantitativos sobre el estado de un sistema a través de diversos ***índices*** que permiten tomar decisiones con el objetivo de maximizar el bienestar público con las menores pérdidas ambientales posibles (gestión ambiental).
- Evalúa la renovabilidad de los servicios involucrados en el proceso
- Permite la modelización y la simulación, como poderosas herramientas de visualización de los flujos entre los sistemas socio-económicos y los ecológicos.

- Incluye en la evaluación el trabajo humano y los servicios bajo un marco común.
- Tiene un principio de optimización (Principio de maximización de la potencia emergética).

Así, lo habitual en el procedimiento de la síntesis emergética no es tanto tratar de reducir los distintos componentes materiales, energéticos, monetarios, etc. a energía solar como valor de cambio físico (la emergía no es una teoría de valoración económica), sino más bien tratar de introducir tanto elementos materiales como energéticos en el cálculo del trabajo realizado por la naturaleza para generar un determinado sistema o componente del sistema, que es medido en equivalentes de energía solar, como corresponde a la propia definición de emergía (Lomas & Huerta 2009).

2.1.2. Ventajas y Desventajas del Método de La Contabilidad Emergética

En la Tabla 2.1.1 se muestran las principales ventajas y desventajas de la aplicación del método del análisis emergético (Álvarez *et al*., 2006). De manera general constituye una ventaja el hecho de que se parte de la construcción de un modelo conceptual (que constituye un paso fundamental en el proceso) y de una base de datos interdisciplinaria. Ambos pasos (modelización, o conceptualización del socio-ecosistema y obtención de información multirrelacionada) son básicos a la hora de abordar, desde una perspectiva sistémica, cualquier problema. Estos modelos y bases de datos asociadas (que integran y comparan datos ecológicos con otros socioeconómicos) son de utilidad no sólo para la Síntesis Emergética, si no para otras múltiples aproximaciones o simplemente como bancos de información. No obstante, requieren grupos de trabajo transdisciplinares y supone grandes inversiones en términos de tiempo, dinero y personal que, en cualquier caso, dan sus frutos a medio-largo plazo. Una vez que se han creado esas bases de datos, su mantenimiento y actualización es mucho más sencillo (Álvarez *et al*., 2006).

Por lo tanto este método es una evaluación integrada de los sistemas económicos, ecológicos, técnicos y energéticos, que ya ha sido exitosamente aplicado a sistemas de diferentes escalas (Brown & Ulgiati, 2004), en los que se incluyen: la sostenibilidad regional (Lei & Wang, 2008), restauración de los ecosistemas (Ton, Odum, & Delfino, 1998) (Lu, Campbell, & Li., 2006), evaluación de la energía solar (Vassallo & Fabiano, 2009), **y evaluación de la tecnología de las aguas residuales** (Bjo & Geber, 2001; Siracusa & La Rosa, 2006), principalmente con el fin de utilizarlo como herramienta para la toma de decisiones ambientales.

Tabla 2.1.1. Ventajas y desventajas de la aplicación del método del análisis emergético

Ventajas	Inconvenientes
Sólida base ecológica. Considera estructura, funcionamiento de cada tipo de ecosistema	Excluye aspectos sociales. Necesidad de complementar con otros métodos para no caer en el “reduccionismo energético”
Permite la interrelación de bases de satos que tradicionalmente se analizan de manera individual	Necesidad de una solida y amplia base de datos de partida que no siempre está disponible
Consideración de las restricciones energéticas y termodinámicas de los sistemas. Aproximación desde la economía ecológica	Dificultad para incluir restricciones sociopolíticas de los sistemas. Aproximación egocéntrica
Consideración de distintos tipos de calidad energética	Necesidad de uso de factores de conversión (transformicidades
Procedimiento estandarizado. Aplicación del método científico. Conceptualización del sistema en modelos de uso general	Incertidumbre en los cálculos de algunos factores de transformicidad
Trabajo multidisciplinar	Costo en tiempos y personal elevado
Conmensurabilidad de valores. Utilización de unidades comunes para evaluar componentes naturales y socioeconómicos	El concepto de valor no puede depender exclusivamente en la cantidad de energía necesaria para crear un determinado componente (hay que considerar otros factores como escases)
Gran potencialidad del método en comparación de alternativas y análisis a distintas escalas espacio-temporales	Necesidad de múltiples análisis previos para alcanzar una escala a gran detalle

2.2. Anexo: diferencias de la emergía con otros métodos.

Existen varias metodologías que permiten evaluar y contabilizar los impactos ambientales de un determinado proceso, permitiendo la comparación de dos o más alternativas, con el fin de establecer criterios cuantitativos para seleccionar aquella alternativa con el menor impacto posible. Entre las metodologías más utilizadas, para dicho fin, se encuentra el Análisis del Ciclo de Vida, el Análisis Exergético y obviamente el Análisis del Método Emergético.

2.2.1. Análisis del Ciclo de Vida

El análisis de ciclo de vida (ACV), es una metodología analítica utilizada para proporcionar información de los requerimientos energéticos y de materiales, al igual que los residuos y emisiones que se generan cuando se concibe un producto o servicio desde su **inicio hasta su expiración**. Es decir, la técnica examina cada etapa del ciclo de vida del producto, desde la adquisición de materias primas, el proceso de fabricación, distribución, la posible utilización/reutilización y el reciclaje y luego la disposición final (ISO, 1998), (Guinee *et al*., 2002). El ACV generalmente consta de cuatro pasos: (1) objetivos y alcance; en donde se define el proceso y los límites del sistema, (2) Inventario de Ciclo de Vida; en este paso se cuantifican los flujos másicos y energéticos de todo el proceso, simultáneamente se evalúa la carga ambiental por los residuos generados en el proceso y por las emisiones (asociadas al transporte y transformación del producto). Para la evaluación de los impactos ambientales se definen las categorías del impacto o áreas impactadas por la concepción del producto, en donde se clasifican y caracterizan los tipos de impactos asociados a las mismas, posteriormente se les otorga una ponderación (cuantitativa) de la importancia relativa de cada impacto y (3) La interpretación del ciclo de vida, consiste en la interpretación y análisis de los anteriores resultados para la toma de decisiones ambientales de acuerdo al alcance de cada estudio. Existen múltiples softwares comerciales para desarrollar dicha metodología. La principal limitación del ciclo de vida es que los indicadores están dados en diferentes unidades, lo que hace difícil llevar a cabo un análisis comparativo entre los productos o servicios.

Como se evidencia, el Análisis del Ciclo de Vida (ACV) en términos ambientales, solo permite la evaluación cuantitativa de dichos impactos ambientales ocasionados por las emisiones y generación de residuos producidos durante el ciclo de vida de un determinado producto; mas no permite evaluar la sostenibilidad de un sistema; es decir, no integra los aspectos económicos, energéticos y ambientales, como lo hace el Método del Análisis Emergético; pues no evidencia la dependencia de la sostenibilidad de un proceso de lo recursos renovables y no renovables involucrados en este (contribuciones de los productos y servicios ecológicos), lo que revela una discrepancia del concepto de sostenibilidad entre los dos métodos anteriormente mencionados.

Una opción es combinar el método del ciclo de vida y el método del análisis emergético para estimar adecuadamente el equilibrio entre la demanda humana y el servicio natural (de los ecosistemas), así como también para evaluar la actual utilización de los recursos naturales y los niveles de emisiones al ambiente, pocos estudios han combinado estos dos instrumentos para medir el impacto sobre la naturaleza y la sostenibilidad de un sistema.

2.2.2. Análisis Exergético

La **exergía** es una propiedad termodinámica que permite determinar el potencial de trabajo útil de una determinada cantidad de energía para alcanzar el equilibrio con los alrededores.

Ahora bien, el Método del Análisis Exergético proporciona el análisis de la sostenibilidad de un sistema con base a unos índices de sostenibilidad, que permite predecir la evolución en el futuro de estos procesos, así como los diferentes cambios que se puedan producir en su entorno (Ludovisi & Poletti, 2003) y que aspectos se deben modificar para mejorar esa sostenibilidad.

A partir de los índices exergéticos, se pueden inferir aspectos como los impactos medioambientales de un proceso, la eficiencia de la utilización de los recursos requeridos, la sostenibilidad energética y las emisiones contaminantes del mismo. Esta metodología provee estrategias que permite un uso más racional de los recursos energéticos y aseguran los suministros de energía, junto con el mantenimiento de la calidad ambiental de los sistemas (Weidou & Johansson, 2004).

El índice de sostenibilidad exergético está planteado en función de los siguientes cuatro indicadores: el nivel de renovabilidad de la exergía consumida en el sistema, la limpieza de la exergía consumida, la auto satisfacción exergética del sistema; es decir, la capacidad de un sistema de auto abastecerse energéticamente y la eficiencia de los

sistema de transformación energética y su degradación; es así como se cuantifica el nivel de Sostenibilidad Energético Ambiental (Ocaña *et al*.,2008).

Es de esta manera como estos índices, permiten evaluar la influencia que sobre la sostenibilidad energética de un sistema dado tienen las fuentes de energía utilizadas, la eficiencia de transformación, el nivel de impacto sobre el medioambiente asociado a las tecnologías de transformación energética y la capacidad de auto sostenimiento energético. Este índice de sostenibilidad exergético o como también se le conoce el índice de sostenibilidad energético ofrece la facilidad de realizar comparaciones espacio-temporales entre diferentes sistemas, mostrando los aspectos que de manera favorable o desfavorable provocan los resultados obtenidos durante el análisis.

A la hora de calcular los anteriores indicadores, los elementos a considerar son (Ocaña *et al*.,2008)

- Para el cálculo de los Coeficientes de Peso, es necesario determinar la influencia de cada uno de los indicadores propuestos; esto se refiere a la ponderación de cada índice.
- Para el cálculo del potencial de energía renovable de un sistema, se requiere detectar los recursos energéticos renovables con que cuenta dicho sistema y la magnitud del mismo.
- El cálculo del costo asociado a la eficiencia exergética se realiza teniendo en cuenta cada una de las tecnologías de transformación utilizadas en el sistema.
- Para la determinación del costo asociado a la limpieza de la exergía consumida, se requieren los valores de las externalidades vinculadas a las emisiones contaminantes y el costo monetario de los portadores energéticos.
- Para el cálculo del costo asociado al Indicador de auto satisfacción exergética, el aspecto primordial son los costos de importación.

Se puede decir entonces que este Método del Análisis Exergético en comparación con el Método del Análisis Emergético, presenta o clasifica de manera implícita las diferentes fuentes de energía (fuentes renovables, no renovables e importadas), al mismo tiempo toma como base el mismo concepto de sostenibilidad, “El concepto de desarrollo sostenible resulta de un conjunto de interrelaciones entre sistemas (naturales y sociales), dinámica de procesos (energía, materia e información) y escala de valores (valores, ética). En la medida en que los sistemas económicos, ecológicos y sociales interaccionan entre sí de forma independiente, su estabilidad dependerá de su capacidad del conjunto y garantizará sus funciones básicas”. Tomando como referencia esta definición de sostenibilidad; muy similar a la del método del Análisis Emergético, y de acuerdo a las variables que se requieren para la cuantificación del índice de sostenibilidad exegético; se puede decir, desde el punto de vista emergético, que este método es apto para analizar la sostenibilidad de un proceso.

La principal diferencia entre estos dos métodos radica en su fundamento. Los cálculos de los índices emergéticos subyacen en la cantidad de energía solar total que se requiere para hacer determinado producto o servicio, y los índices exergéticos datan del contenido energético aprovechable de los insumos que entran al sistema. Es decir, la exergía (energía aprovechable) de un determinado producto o servicio puede llegar a cero, mientras que tiene asociado a él un cierto contenido energético.

El análisis emergético presenta una importante característica que lo diferencia totalmente de los dos métodos anteriormente descritos, y estriba en la consideración de los distintos tipos de calidad energética, abarcando la interacción de los sistemas socioeconómicos con los sistemas naturales o ecosistemas (la llamada ventana ambiental, que integra a los sistema ecológico y socio-económico), considerando ambos como sistemas abiertos que intercambian flujos de materia y energía, y que están sometidos a las leyes de la termodinámica, que en contraste con los otros dos métodos energéticos solo miran los flujos de calor equivalente de un proceso.

Estas calidades energéticas se evidencian gracias al uso de las transformicidades, que muestra el efecto de las entradas del sistema. De esta manera en el cálculo de los indicadores se encierra la historia (memoria de cuanta energía solar se invierte para generar un producto), en términos de aportación de materia o energía con calidad solar, del producto generado.

Por otra parte, el principio de máxima potencia emergética aporta un criterio que permite determinar qué sistemas o diseños, ya sean ecológicos o económicos, tienen más probabilidades de sobrevivir en el tiempo frente a otros, convirtiéndose así en uno de los fundamentos de la Síntesis Emergética (Odum, 1996)(Odum, 2001).

2.2.3 ¿Emergía como función de la exergía o energía?

Para finalizar este capítulo, es importante anotar la controversia que hay actualmente entre exergístas y emergístas, que radica en calcular la emergía con base en la exergía (energía disponible) y no con base a la energía como se ha venido realizando

$$Em^{(E)} = E_{solar}(s1) + E_{solar}(s2) \qquad \text{Ec. 2.2.1}$$

$$Em^{(E)} = Ex_{solar}(s1) + Ex_{solar}(s2) \qquad \text{Ec. 2.2.2}$$

Donde E_{solar} y Ex_{solar} hace referencia a la energía y exergía solar respectivamente.

De la Ec. 2.2.1 se tiene el cálculo de la emergía con base a la energía y de la Ec. 2.2.2 el cálculo de la emergía con base a la exergía (Bastianoni, Facchini, Susani, & Tiezzi, 2007).

$$Em^{(Ex)} = \propto Em^{(E)} \qquad \text{Ec. 2.2.3}$$

Se muestra como la exergía es equivalente a la energía multiplicada por el factor α. Este α (≈ 0.93) (Wall & Gong, 2001) (Ec. 2.2.3) (Bastianoni *et al.*, 2007). Expresa el porcentaje de energía disponible de la energía solar; es decir, es la exergía de la energía solar. De esta manera se evidencia que si se calcula la emergía con base a la exergía ésta tiene que ser corregida dividiendo el resultado por dicho factor Ec. 2.2.4, y además se refleja como la emergía se calcula con base a la energía total presente y no en la energía útil o exergía. Por lo que el resultado de la emergía es invariable, si ésta es calculada con base a la exergía o a la emergía

$$\frac{Em^{(Ex)}}{\propto} = Em^{(E)} \qquad \text{Ec. 2.2.4}$$

Simultáneamente en este mismo estudio (Bastianoni *et al*., 2007) donde se presenta este modelo analítico que teóricamente permite el cálculo de la emergía basado en la exergía, se demuestra como el cálculo de la transformicidad para poder aplicar este modelo analítico es prácticamente imposible, debido a que se requiere una cantidad muy grande de eficiencias del proceso de transformación de la energía solar hasta el producto que se requiere (Figura 2.2.1), prácticamente improbables de cuantificar ya se teórica o experimentalmente, pues se necesita de una cantidad de información con la que no se cuenta. La Figura 2.2.1 muestra los flujos exergéticos directa o indirectamente necesarios para el proceso de la producción de trigo y las eficiencias parciales de los pasos anteriores a partir de la fuente original de exergía

De apartados anteriores sabemos que la emergía es igual al producto de la transformicidad por la energía disponible (en el hipotético caso de que se calculara con base a exergía).

$$Em = \sum_{i} \tau_i Exi \qquad \text{Ec. 2.2.5}$$

Si se llegara a calcular dichas transformicidades como lo muestra la ecuación Ec. 2.2.5 necesitaríamos conocer *ω* (eficiencia de cada etapa del proceso de la transformación de la energía solar hasta el producto en cuestión), como se muestra en la Figura 2.2.1, en donde se simplifica el modelo de producción de trigo, y $\sum_{\mu=1}^{M}$ indica la sumatoria de la eficiencia de cada etapa de todos los procesos que se dan simultáneamente para la generación de dicho producto, de esta manera se muestra la imposibilidad del cálculo de

estas transformicidades, pues se requeriría conocer con detalle termodinámico todos los procesos por los que ha atravesado la energía solar para encontrarse presente en forma de la energía a la cual se desea calcular la emergía.

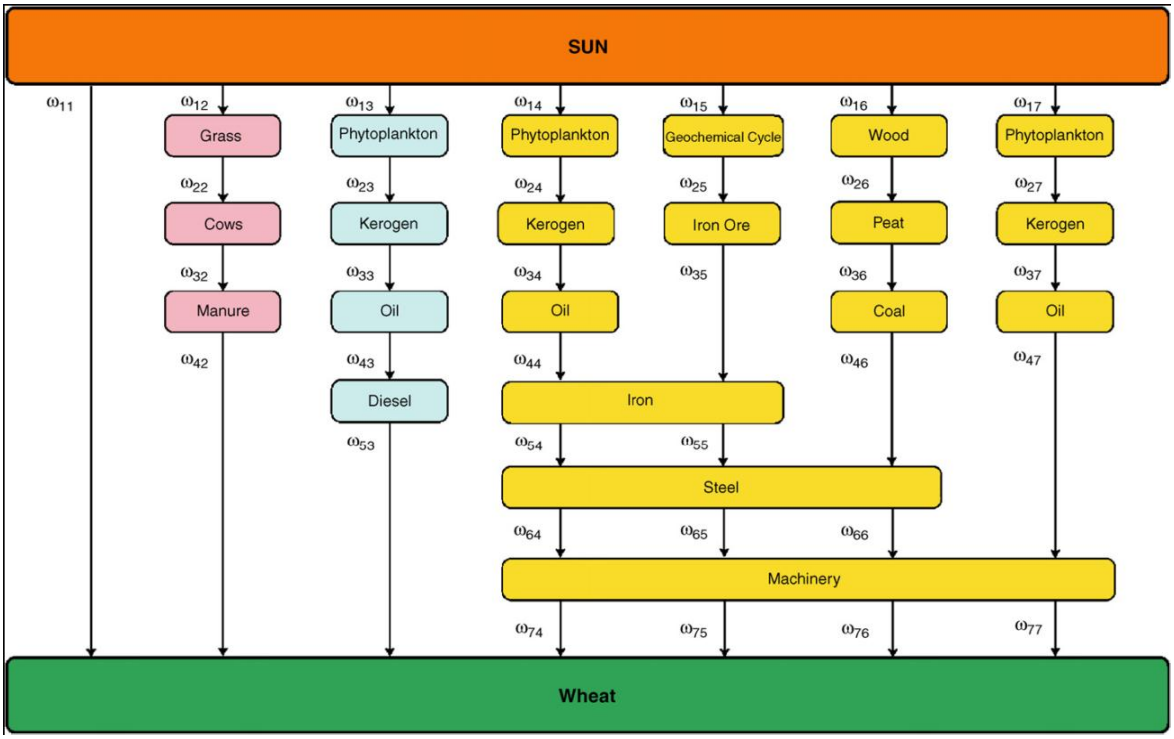

Figura 2.2.1. Modelo simplificado de la producción de trigo.
Fuente: Tomado de Bastianoni *et al*., 2007.Emergy as a function of exergy

Esta es una de las principal razón del porqué las transformicidades para los diferentes flujos energéticos, son tomadas de los resultados de anteriores análisis emergéticos, pues ésta es una propiedad que depende del tipo de energía.

$$\tau = \sum_{\mu=1}^{M} \prod_{v=1}^{N} \omega_{v\mu} \qquad \text{Ec. 2.2.6}$$

Sciubba, 2010 en su estudio titulado “On the Second-Law inconsistency of Emergy Analysis” refuta la afirmación que la emergía es un “método basado en la segunda ley”; es decir la cuestión en esta investigación es establecer si la emergía es energía o exergía incorporada., causa de la controversia entre exergístas y emergístas

Es de esta manera como en este articulo (el tercero de un largo proceso de estudio) mediante un largo y exhaustivo análisis termodinámico y después de una amplia revisión de los libros de Odum y las investigaciones realizadas por emergístas, afirma que el

análisis emergético es un conteo del costo acumulativo de energía, por eso la afirmación de que “La energía es la exergía incorporada”, como lo dijo Odum en 1996 en su libro “Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making”, no es congruente con los métodos adoptados por los analistas emergéticos en sus estudios, debido a que las teorías en que se basan no contienen características que les permita tratar flujos exergéticos diferentes a la unidad. De esta manera en esta investigación afirman que el método del análisis emergético es un proceso basado en la primera ley de la termodinámica y no en la segunda; es decir se concluye que en la emergía en lugar de utilizar el término “energía disponible” o “energía que se puede utilizar” se emplea solo el término “emergía”.

Los métodos basados en la segunda ley son los únicos que conducen a una valoración correcta de la exergía real. Cabe destacar que los argumentos presentados en este documento no niegan la validez del análisis, simplemente se refuta la afirmación de que emergía es un "método basado en la segunda ley", y que los análisis emergéticos y exergéticos se deben de tomar por separado.

5.1. Anexo: Cálculos de la evaluación energética del pasto kikuyo abonado con lodo (hectarea por año). Biosólido como F.

	Input	Calculation	Unit
1	**Sun**		
	Insolation:	7.52E+09	J/m2/yr
	Area:	1.00E+04	m2
	Albedo:	0.24	adimensional
	Conversion:	(Avg. Total Annual Insolation J/m2/yr)(Area m2)(1-albedo)	
	Annual energy:	5.72E+13	J/yr
	Emergy per unit input:	1	sej/J
	Emergy Input:	5.72E+13	sej/yr
2	**Rain**		
	Rainfall:	2.7	m/yr
	Area:	10000	m2
	Water density:	1000000	g/m3
	Water energy:	4.94	J/g
	Conversion:	(Rainfall m/yr)(Area m2)(Water density g/m3)(Water energy J/g)	
	Annual energy:	1.33E+11	J/yr
	Emergy per unit input:	3.10E+04	sej/J
	Emergy Input:	4.13E+15	sej/yr
3	**Wind**		
	Air density:	1.3	Kg/m3
	Annual average of wind velocity:	1.6	m/s
	Geotropic wind (60% of 1,6):	0.96	m/s
	Drag coefficient:	0.001	adimensional
	Conversion:	(Area m2)(Density Kg/m3)(Geotropic wind m/s)^3(Drag coefficient)(3,16E+07 s/yr)	
	Annual energy:	3.63E+08	J/yr
	Emergy per unit input:	2.45E+03	sej/J
	Emergy Input:	8.90E+11	sej/yr

4	**Net soil Loss**		
	Annual soil loss:	46667	Kg/ yr
	Organic matter fraction:	0.21	adimensional
	Energy content:	5.4	Kcal/g
	Conversion:	(Annual soil loss Kg/yr)(Organic matter fraction)(Energy content Kcal/g)(1000 g/kg)(4186 J/Kcal)	
	Annual Energy	2.2E+11	J/yr
	Emergy per unit input:	1.24E+05	sej/J
	Emergy Input:	2.75E+16	sej/yr
5	**Fuel**		
	Distance:	100	Km
	Transport Efficiency:	3.4	Km/gallon
	Annual Travels:	7	adimensional
	Energy content:	1.32E+08	J/gallon
	Conversion:	(Distance Km)(Annual travels)(Energy Content J/gallon)(2)/(Transport Efficiency Km/gallon)	
	Annual energy:	5.48E+10	J/yr
	Emergy per unit input:	1.11E+05	sej/J
	Emergy Input:	6.07E+15	sej/yr
6	**Electricity**		
	Annual hours:	168	hr/yr
	Pump:	13	KWh
	Conversion:	(Annual hours hr/yr)(Pump KWh)(3.6E+06 J/KWh)	
	Annual energy:	8.10E+09	J/yr
	Emergy per unit input:	2.69E+05	sej/J
	Emergy Input:	2.18E+15	sej/yr
7	**Machinery (assuming 10 year life)**		
	Pump weight:	5.54E+01	Kg
	Conversion:	(Pump weight Kg)(1000 g/Kg)	
	Annual consumption:	5.54E+04	g
	Emergy per unit input:	1.79E+10	sej/g
	Emergy Input:	9.92E+14	sej/yr

8	**Phosphate (from the sludge)**		
	Sludge weight:	20000	Kg
	Sludge Phosphate fraction:	9.30E-03	adimensional
	Conversion:	(Sludge weight Kg)(Sludge Phosphate fraction)(1000 g/Kg)	
	Annual consumption:	1.86E+05	gP/yr
	Emergy per unit input:	1.60E+10	sej/g
	Emergy Input:	2.97E+15	sej/yr
9	**Nitrogen (from the sludge)**		
	Sludge weight:	20000	Kg
	Sludge Nitrogen fraction:	1.80E-02	adimensional
	Conversion:	(Sludge weight Kg)(Sludge Nitrogen fraction)(1000 g/Kg)	
	Annual consumption:	3.60E+05	gN/yr
	Emergy per unit input:	6.38E+09	sej/g
	Emergy Input:	2.30E+15	sej/yr
10	**Potash (from the sludge)**		
	Sludge weight:	20000	Kg
	Sludge Potash fraction:	3.00E-03	adimensional
	Conversion:	(Sludge weight Kg)(Sludge Potash fraction)(1000 g/Kg)	
	Annual consumption:	6.00E+04	gK/yr
	Emergy per unit input:	1.74E+09	sej/g
	Emergy Input:	1.04E+14	sej/yr
11	**Biomass (from the sludge)**		
	Sludge weight:	20000	Kg
	Biomass weight:	20000	Kg
	Conversion:	(Biomass weight Kg)(1000g/Kg)	
	Annual consumption:	2.00E+07	g/yr
	Emergy per unit input:	2.70E+09	sej/g
	Emergy Input:	4.86E+16	sej/yr
12	**Labor**		
	Human energy consumption:	436	KJ/hr
	Worked hours:	216	hrs/yr
	Conversion:	(Human energy consumption KJ/hr)(Worked hours hr/yr)(1000 J/KJ)	
	Annual energy:	9.42E+07	J/yr
	Emergy per unit input:	4.45E+06	sej/J
	Emergy Input:	4.19E+14	sej/yr

13	**Fitorremediacion**		
	Annual soil loss:	46667	Kg/ yr
	Cost:	25	Dollars/Ton
	Conversion:	(Annual soil loss Kg/yr)(cost Dollars/ton)(1/1000 Ton/Kg)	
	Total Cost:	1167	Dollars/yr
	Emergy Money Ratio :	8.70E+12	Sej/U$
	Emergy Input:	1.02E+16	Sej/yr

5.2. Anexo: Calculo de la evaluación energética del pasto kikuyo abonado con lodo (hectárea por año). Biosólido como R.

	Input	Calculation	Unit
1	**Sun**		
	Insolation:	7.52E+09	J/m2/yr
	Area:	1.00E+04	m2
	Albedo:	0.24	adimensional
	Conversion:	(Avg. Total Annual Insolation J/m2/yr)(Area m2)(1-albedo)	
	Annual energy:	5.72E+13	J/yr
	Emergy per unit input:	1	sej/J
	Emergy Input:	5.72E+13	sej/yr
2			
	Rain		
	Rainfall:	2.7	m/yr
	Area:	10000	m2
	Water density:	1000000	g/m3
	Water energy:	4.94	J/g
	Conversion:	(Rainfall m/yr)(Area m2)(Water density g/m3)(Water energy J/g)	
	Annual energy:	1.33E+11	J/yr
	Emergy per unit input:	3.10E+04	sej/J
	Emergy Input:	4.13E+15	sej/yr
3	**Wind**		
	Air density:	1.3	Kg/m3
	Annual average of wind velocity:	1.6	m/s
	Geotropic wind (60% of 1,6):	0.96	m/s
	Drag coefficient:	0.001	adimensional
	Conversion:	(Area m2)(Density Kg/m3)(Geotropic wind m/s)^3(Drag coefficient)(3,16E+07 s/yr)	
	Annual energy:	3.63E+08	J/yr
	Emergy per unit input:	2.45E+03	sej/J
	Emergy Input:	8.90E+11	sej/yr

	Net soil Loss		
	Annual soil loss:	46667	Kg/ yr
	Organic matter fraction:	0.21	adimensional
4	Energy content:	5.4	Kcal/g
	Conversion:	(Annual soil loss Kg/yr)(Organic matter fraction)(Energy content Kcal/g)(1000 g/kg)(4186 J/Kcal)	
	Annual Energy	2.2E+11	J/yr
	Emergy per unit input:	1.24E+05	sej/J
	Emergy Input:	2.75E+16	sej/yr
	Fuel		
	Distance:	100	Km
	Transport Efficiency:	3.4	Km/gallon
	Annual Travels:	7	adimensional
5	Energy content:	1.32E+08	J/gallon
	Conversion:	(Distance Km)(Annual travels)(Energy Content J/gallon)(2)/(Transport Efficiency Km/gallon)	
	Annual energy:	5.48E+10	J/yr
	Emergy per unit input:	1.11E+05	sej/J
	Emergy Input:	6.07E+15	sej/yr
	Electricity		
	Annual hours:	168	hr/yr
	Pump:	13	KWh
6	Conversion:	(Annual hours hr/yr)(Pump KWh)(3.6E+06 J/KWh)	
	Annual energy:	8.10E+09	J/yr
	Emergy per unit input:	2.69E+05	sej/J
	Emergy Input:	2.18E+15	sej/yr
	Machinery (assuming 10 year life)		
	Pump weight:	5.54E+01	Kg
7	Conversion:	(Pump weight Kg)(1000 g/Kg)	
	Annual consumption:	5.54E+04	g
	Emergy per unit input:	1.79E+10	sej/g
	Emergy Input:	9.92E+14	sej/yr

8	**Phosphate (from the sludge)**		
	Sludge weight:	20000	Kg
	Sludge Phosphate fraction:	9.30E-03	adimensional
	Conversion:	(Sludge weight Kg)(Sludge Phosphate fraction)(1000 g/Kg)	
	Annual consumption:	1.86E+05	gP/yr
	Emergy per unit input:	1.60E+10	sej/g
	Emergy Input:	2.97E+15	sej/yr
9	**Nitrogen (from the sludge)**		
	Sludge weight:	20000	Kg
	Sludge Nitrogen fraction:	1.80E-02	adimensional
	Conversion:	(Sludge weight Kg)(Sludge Nitrogen fraction)(1000 g/Kg)	
	Annual consumption:	3.60E+05	gN/yr
	Emergy per unit input:	6.38E+09	sej/g
	Emergy Input:	2.30E+15	sej/yr
10	**Potash (from the sludge)**		
	Sludge weight:	20000	Kg
	Sludge Potash fraction:	3.00E-03	adimensional
	Conversion:	(Sludge weight Kg)(Sludge Potash fraction)(1000 g/Kg)	
	Annual consumption:	6.00E+04	gK/yr
	Emergy per unit input:	1.74E+09	sej/g
	Emergy Input:	1.04E+14	sej/yr
11	**Biomass (from the sludge)**		
	Sludge weight:	20000	Kg
	Biomass weight:	20000	Kg
	Conversion:	(Biomass weight Kg)(1000g/Kg)	
	Annual consumption:	2.00E+07	g/yr
	Emergy per unit input:	2.70E+09	sej/g
	Emergy Input:	4.86E+16	sej/yr
12	**Labor**		
	Human energy consumption:	436	KJ/hr
	Worked hours:	216	hrs/yr
	Conversion:	(Human energy consumption KJ/hr)(Worked hours hr/yr)(1000 J/KJ)	
	Annual energy:	9.42E+07	J/yr
	Emergy per unit input:	4.45E+06	sej/J
	Emergy Input:	4.19E+14	sej/yr

13	**Fitorremediacion**		
	Annual soil loss:	46667	Kg/ yr
	Cost:	25	Dollars/Ton
	Conversion:	(Annual soil loss Kg/yr)(cost Dollars/ton)(1/1000 Ton/Kg)	
	Total Cost:	1167	Dollars/yr
	Emergy Money Ratio :	8.70E+12	Sej/U$
	Emergy Input:	1.02E+16	Sej/yr

5.3. Anexo: Cálculo de la evaluación energética del proceso de generación de electricidad mediante gasificación del biosólido por lecho fluidizado (hectárea por año). Biosólido como F.

	Input	Calculation	Unit
1	**Sun**		
	Insolation:	7.52E+09	J/m2/yr
	Area:	1.00E+04	m2
	Albedo:	0.24	adimensional
	Conversion:	(Avg. Total Annual Insolation J/m2/yr)(Area m2)(1-albedo)	
	Annual energy:	5.72E+13	J/yr
	Emergy per unit input:	1	sej/J
	Emergy Input:	5.72E+13	sej/yr
2	**Rain**		
	Rainfall:	2.7	m/yr
	Area:	10000	m2
	Water density:	1000000	g/m3
	Water energy:	4.94	J/g
	Conversion:	(Rainfall m/yr)(Area m2)(Water density g/m3)(Water energy J/g)	
	Annual energy:	1.33E+11	J/yr
	Emergy per unit input:	3.10E+04	sej/J
	Emergy Input:	4.13E+15	sej/yr
3	**Wind**		
	Air density:	1.3	Kg/m3
	Annual average of wind velocity:	1.6	m/s
	Geotropic wind (60% of 1,6):	0.96	m/s
	Drag coefficient:	0.001	adimensional
	Conversion:	(Area m2)(Density Kg/m3)(Geotropic wind m/s)^3(Drag coefficient)(3,16E+07 s/yr)	
	Annual energy:	3.63E+08	J/yr
	Emergy per unit input:	2.45E+03	sej/J
	Emergy Input:	8.90E+11	sej/yr

4	**Oxygen**		
	Air consumption:	203	Kg/hr
	Annual hours:	305	hr/yr
	Oxygen fraction in air:	0.21	adimensional
	Conversion:	(Air consumption Kg/hr)(Annual hours hr/yr)(oxygen fraction in air 0.21)(1000 g/Kg)	
	Annual consumption:	12980460	g/yr
	Emergy per unit input:	5.16E+07	Sej/g
	Emergy Input:	6.70E+14	Sej/yr
5	**Carbon**		
	Carbon consumption:	3.4	Kg
	Annual hours:	305	hr/yr
	Carbon energy content:	3.18E+07	J/Kg
	Conversion:	(Carbon consumption Kg/hr)(Annual hours hr/yr)(Cabon energy content J/Kg)	
	Annual energy:	3.28E+10	J
	Emergy per unit input:	39200	Sej/J
	Emergy Input:	1.28624E+15	Sej/yr
6	**Ignition Oil**		
	Ignition Oil consumption:	8	Gal
	Oil energy content:	6.28E+09	J/Bbl
	Conversion:	(Ignition oil consumption Gal)(Oil energy content J/Bbl)(1/42 Bbl/Gal)	
	Annual energy:	1196190476	J
	Emergy per unit input:	6.60E+04	Sej/J
	Emergy Input:	7.89486E+13	Sej/yr
7	**Fuel**		
	Distance:	100	Km
	Transport Efficiency:	3.4	Km/gallon
	Annual Travels:	7	adimensional
	Energy content:	1.32E+08	J/gallon
	Conversion:	(Distance Km)(Annual travels)(Energy Content J/gallon)(2)/(Transport Efficiency Km/gallon)	
	Annual energy:	5.48E+10	J/yr
	Emergy per unit input:	1.11E+05	sej/J
	Emergy Input:	6.07E+15	sej/yr

8	**Electricity (Power consumption)**		
	Annual hours:	305	hr/yr
	Screw conveyor 1:	2.2	KWh
	Screw conveyor 2:	1.5	KWh
	Pump:	7.2E-03	KWh
	Compressor:	3.7	KWh
	Resistance:	0.1	KWh
	Conversion:	(Annual hours hr/yr)(Screw conveyor 1 + Screw conveyor 2 + Plump + Compressor + Resistance)(3.6E+06 J/KWh)	
	Annual energy:	8.19E+09	J/yr
	Emergy per unit input:	2.69E+05	sej/J
	Emergy Input:	2.20E+15	sej/yr
9	**Machinery (assuming 10 year life)**		
	Screw conveyor 1 weight:	33	Kg
	Screw conveyor 2 weight:	28	Kg
	Plump weight:	2	Kg
	Compressor weight:	125	Kg
	Turbine weight:	8	Kg
	Gasifier weight:	2000	Kg
	Others weight:	600	Kg
	Conversion:	(All machinery weight summatory)(1000 g/Kg)	
	Annual consumption:	2795422	g
	Emergy per unit input:	1.79E+10	Sej/g
	Emergy Input:	5.00E+16	
10	**Sludge**		
	Sludge weight:	20000	Kg
	Biomass weight:	20000	Kg
	Conversion:	(Biomass weight Kg)(1000g/Kg)	
	Annual energy:	2.00E+07	J/yr
	Emergy per unit input:	2.70E+09	sej/J
	Emergy Input:	5.40E+16	sej/yr
11	**Labor, J**		
	Human energy consumption:	436	KJ/hr
	Worked hours:	1220	hrs/yr
	Conversion:	(Human energy consumption KJ/hr)(Worked hours hr/yr)(1000 J/KJ)	
	Annual energy:	5.32E+08	J/yr
	Emergy per unit input:	4.45E+06	sej/J
	Emergy Input:	2.37E+15	sej/yr
12	**H2O**		
	H20 consumption:	0.13	Kg/hr
	Annual hours:	305	hr/yr
	Conversion:	(H2O consumption Kg/hr)(Annual hours hr/yr)(1000 g/Kg)	
	Annual consumption:	38336	g/yr
	Emergy per unit input:	6.64E+05	Sej/g
	Emergy Input:	2.55E+13	Sej/yr

13	**Ash Disposal Cost**		
	Ceniza:	53	Dollars
	costo disposicion cenizas+ alquitrames+ metales pesados:	125	Dollars
	costo de disposicion aceite:	15	Dollars
	Total Cost:	193	Dollars
	Emergy Money Ratio:	8.70E+12	Sej/U$
	Emergy Input:	1.6791E+15	Sej/yr

5.4. Anexo: Cálculo de la evaluación energética del proceso de generación de electricidad mediante gasificación del biosólido por lecho fluidizado (hectárea por año). Biosólido como R.

	Input	Calculation	Unit
1	**Sun**		
	Insolation:	7.52E+09	J/m2/yr
	Area:	1.00E+04	m2
	Albedo:	0.24	adimensional
	Conversion:	(Avg. Total Annual Insolation J/m2/yr)(Area m2)(1-albedo)	
	Annual energy:	5.72E+13	J/yr
	Emergy per unit input:	1	sej/J
	Emergy Input:	5.72E+13	sej/yr
2	**Rain**		
	Rainfall:	2.7	m/yr
	Area:	10000	m2
	Water density:	1000000	g/m3
	Water energy:	4.94	J/g
	Conversion:	(Rainfall m/yr)(Area m2)(Water density g/m3)(Water energy J/g)	
	Annual energy:	1.33E+11	J/yr
	Emergy per unit input:	3.10E+04	sej/J
	Emergy Input:	4.13E+15	sej/yr
3	**Wind**		
	Air density:	1.3	Kg/m3
	Annual average of wind velocity:	1.6	m/s
	Geotropic wind (60% of 1,6):	0.96	m/s
	Drag coefficient:	0.001	adimensional
	Conversion:	(Area m2)(Density Kg/m3)(Geotropic wind m/s)^3(Drag coefficient)(3,16E+07 s/yr)	
	Annual energy:	3.63E+08	J/yr
	Emergy per unit input:	2.45E+03	sej/J
	Emergy Input:	8.90E+11	sej/yr

	Oxygen		
	Air consumption:	203	Kg/hr
	Annual hours:	305	hr/yr
	Oxygen fraction in air:	0.21	adimensional
4	Conversion:	(Air consumption Kg/hr)(Annual hours hr/yr)(oxygen fraction in air 0.21)(1000 g/Kg)	
	Annual consumption:	12980460	g/yr
	Emergy per unit input:	5.16E+07	Sej/g
	Emergy Input:	6.70E+14	Sej/yr
	Carbon		
	Carbon consumption:	3.4	Kg
	Annual hours:	305	hr/yr
	Carbon energy content:	3.18E+07	J/Kg
5	Conversion:	(Carbon consumption Kg/hr)(Annual hours hr/yr)(Cabon energy content J/Kg)	
	Annual energy:	3.28E+10	J
	Emergy per unit input:	39200	Sej/J
	Emergy Input:	1.28624E+15	Sej/yr
	Ignition Oil		
	Ignition Oil consumption:	8	Gal
	Oil energy content:	6.28E+09	J/Bbl
6	Conversion:	(Ignition oil consumption Gal)(Oil energy content J/Bbl)(1/42 Bbl/Gal)	
	Annual energy:	1196190476	J
	Emergy per unit input:	6.60E+04	Sej/J
	Emergy Input:	7.89486E+13	Sej/yr
	Fuel		
	Distance:	100	Km
	Transport Efficiency:	3.4	Km/gallon
	Annual Travels:	7	adimensional
7	Energy content:	1.32E+08	J/gallon
	Conversion:	(Distance Km)(Annual travels)(Energy Content J/gallon)(2)/(Transport Efficiency Km/gallon)	
	Annual energy:	5.48E+10	J/yr
	Emergy per unit input:	1.11E+05	sej/J
	Emergy Input:	6.07E+15	sej/yr

8	**Electricity (Power consumption)**		
	Annual hours:	305	hr/yr
	Screw conveyor 1:	2.2	KWh
	Screw conveyor 2:	1.5	KWh
	Pump:	7.2E-03	KWh
	Compressor:	3.7	KWh
	Resistance:	0.1	KWh
	Conversion:	(Annual hours hr/yr)(Screw conveyor 1 + Screw conveyor 2 + Plump + Compressor + Resistance)(3.6E+06 J/KWh)	
	Annual energy:	8.19E+09	J/yr
	Emergy per unit input:	2.69E+05	sej/J
	Emergy Input:	2.20E+15	sej/yr
9	**Machinery (assuming 10 year life)**		
	Screw conveyor 1 weight:	33	Kg
	Screw conveyor 2 weight:	28	Kg
	Plump weight:	2	Kg
	Compressor weight:	125	Kg
	Turbine weight:	8	Kg
	Gasifier weight:	2000	Kg
	Others weight:	600	Kg
	Conversion:	(All machinery weight summatory)(1000 g/Kg)	
	Annual consumption:	2795422	g
	Emergy per unit input:	1.79E+10	Sej/g
	Emergy Input:	5.00E+16	
10	**Sludge**		
	Sludge weight:	20000	Kg
	Biomass weight:	20000	Kg
	Conversion:	(Biomass weight Kg)(1000g/Kg)	
	Annual energy:	2.00E+07	J/yr
	Emergy per unit input:	2.70E+09	sej/J
	Emergy Input:	5.40E+16	sej/yr
11	**Labor, J**		
	Human energy consumption:	436	KJ/hr
	Worked hours:	1220	hrs/yr
	Conversion:	(Human energy consumption KJ/hr)(Worked hours hr/yr)(1000 J/KJ)	
	Annual energy:	5.32E+08	J/yr
	Emergy per unit input:	4.45E+06	sej/J
	Emergy Input:	2.37E+15	sej/yr
12	**H2O**		
	H20 consumption:	0.13	Kg/hr
	Annual hours:	305	hr/yr
	Conversion:	(H2O consumption Kg/hr)(Annual hours hr/yr)(1000 g/Kg)	
	Annual consumption:	38336	g/yr
	Emergy per unit input:	6.64E+05	Sej/g
	Emergy Input:	2.55E+13	Sej/yr

13	**Ash Disposal Cost**		
	Ceniza:	53	Dollars
	costo disposicion cenizas+ alquitrames+ metales pesados:	125	Dollars
	costo de disposicion aceite:	15	Dollars
	Total Cost:	193	Dollars
	Emergy Money Ratio:	8.70E+12	Sej/U$
	Emergy Input:	1.6791E+15	Sej/yr

5.5. Anexo: Cálculos de la simulación de la acumulación de metales pesados en suelos fertilizados con biosólidos.

Limites EPA (mg/kg)	
Cadmio	1
Cromo	100
Niquel	30
Plomo	250
Concentracion Suelo (mg/kg)	
Cadmio	0.58
Cromo	7
Niquel	5.3
Plomo	8.3
Fraccion Lodo (mg/kg)	
Cadmio	1.8
Cromo	317.6
Niquel	70.5
Plomo	21.4
Area (m2)	10000
Profundidad (cm)	10
Lodo Depositado (kg/año)	20000
Densidad Lodo (kg/m3)	621
Volumen Lodo (m3/año)	32.21
Pastoreos/año	7
Erosion (g/m2 año)	0
Densidad Suelo (kg/m3)	800
Volumen Suelo (m3)	1000
Suelo (kg)	800000
Lodo Perdido Erosion (kg/pastoreo)	0.00
Altura Aumentada (cm/pastoreo)	0.05
Pastoreos	120
Años Habiles	17.1428571
Fraccion Anual de Perdida	0.05833333
Suelo Perdido (kg/año)	46666.6667

5.6. Anexo: Balances de materia y energía.

Balance de materia y energía en el secador

Materia		
Entradas		
1	20	ton/año ef
1	65,52650547	kg/h
Salidas		
2	31,72028919	kg/h
3	33,806	kg/h

Energía			
Entradas			
	Materia (kg/h)	**Temperatura (°C)**	**Entalpía (kJ/kg)**
1	65,52650547	25	-9252,109719
31	145,6217725	200	-13091,3
33	45,73745873	200	-13091,3
Salidas			
2	31,72028919	120	-13257,54
3	145,6217725	80	-5195,956543
32	145,6217725	90	-13312,55
34	45,73745873	120	-13257,54

Punto de mezcla		
Entradas		
3	33,80621628	kg/h
4	3,380621628	kg/h
Salidas		
5	37,18683791	kg/h

Balance de materia y energía en el gasificador

	Materia	T		
Entradas	5	37,187	25	$\dot{Q}[kW]$
	6	11,156	250	
	35	0,126	250	0,09972466
Salidas	7	41,198	870	
	10	7,270	870	

	Cenizas	
Entradas	7	41,198
	10	7,270
Salidas	8	37,078
	15	11,390

	Para el aire			
	Corriente	Flujo	T	Entalpía
Entrada	13	11,156	25	0
Salida	12	11,156	25	496,78
	Corriente	Flujo	T	Entalpía
Entrada	12	11,156	25	
	27	1,507	500	3134,771
Salida	6	11,156	250	496,780
	43	1,507	250	-543,228
			$\dot{Q}[kW]$	0,706

	5		6		7		10	
C	0,276	10,263	0	0	0,13	5,273	0	0
H	0,099	3,669	0	0	0,13	5,315	0	0
O	0,000	0,003	0,21	2,342771	0,15	6,180	0	0
N	0,018	0,659	0,79	8,813281	0,57	23,483	0	0
S	0,001	0,035	0	0	0	0,082	0	0
Cl	0,001	0,033	0	0	0	0	0	0
F	0,000	0,000	0	0	0	0	0	0
Ash	0,212	7,883	0	0	0,01	0,330	1	7,2703
Alquitranes	0,000	0,000	0	0	0,01	0,247	0	0
Pesados	0,004	0,164	0	0	0,01	0,288	0	0
H2O	0,389	14,477	0	0	0	0	0	0
Total	1,000	37,187	1	11,15605	1	41,198	1	7,2703

	Recuperador			
	Corriente	Flujo	T	Entalpía
Entradas	8	37,078	870	-303,017
	32	145,622	80	84,050
Salidas	16	37,078	500	-755,436
	31	145,622	200	199,246
		$\dot{Q}[kW]$		4,912308

Balance de Materia y Energía en el Limpiador

Materia		
	Corriente	Flujo
Entradas	16	37,078
	20	0,397
Salidas	18	1
	22	1,507

En el filtrador-separador		
Entradas	18	1
	23	1,214
	20	0,397
Salidas	24	0
	25	1,817

densidad normal	1,912
Volumen normal	1

	20		16		18		22	
C	0	0	0,13	5,27	0	0	3,50	5,27
H2	0	0	0,13	5,31	0	0	3,53	5,31
O2	0	0	0,15	6,18	0	0	4,10	6,18
N2	0	0	0,57	23,48	0	0	15,58	23,48
S	0	0	0,00	0,08	0	0	0,05	0,08
Cl	0	0	0	0	0	0	0	0
F	0	0	0	0	0	0	0	0
Ash	0	0	0,008	0,33	0,323	0,323	0,004	0,007
Alquitranes	0	0	0,006	0,25	0,006	0,006	0,003	0,005
Pesados	0	0	0,007	0,29	0,274	0,274	0,004	0,006
H2O	0	0	0	0	0	0	0	0
Aceite	1	0,397	0	0	0,397	0,397	0	0
Total	1	0,397	1	41,20	1	1	27	1,5068

Balance de Materia y Energía en la turbina

Turbina					
	Corriente	Flujo	Temperatura	Presión	Entalpía
Entrada	22	1,506	250	15	719,382
Salida	27	1,506	500	1	148,989
				$(W)^{\cdot}[kW]$	0,23875

Recuperador				
	Corriente	Flujo	Temperatura	Entalpía
Entrada	43	1,5068	250	-252,34
	33	45,7375	130	108,94
Salidas	28	1,5068	150	-1158,80
			$\dot{Q}[kW]$	0,38571

	22		27		43	
C	3,500	5,273	0,106	0,160	0,106	0,160
H2	3,527	5,315	0,000	0,000	0,000	0,000
O2	4,101	6,180	0,117	0,176	0,117	0,176
N2	15,584	23,483	0,777	1,170	0,777	1,170
S	0,055	0,082	0	0	0	0
Cl	0	0	0	0	0	0
F	0	0	0	0	0	0
Ash	0,004	0,0066	0	0	0	0
Alquitranes	0,003	0,0049	0	0	0	0
Pesados	0,004	0,0058	0	0	0	0
Aceite	0	0,0000	0	0	0	0
Total	26,778	1,5068	1	1,507	1	1,507

	% masa	H Inicial	22'	H Final		H 43		ro	
H2	0,00023	16047,90	3,728	7021,88	1,631	3283,95	0,763	1,013	0,00024
N2	0,77664	1219,56	947,155	516,55	401,171	237,5457	184,487	1,000	0,77651
CH4	0	-374,69	0	-3171,45	0	-4058,702	0	0,417	0
CO	0	-2712,21	0	-3425,10	0	-3707,603	0	0,950	0
CO2	0,03006	-7702,29	-231,501	-8444,66	-253,814	-8726,165	-262,275	0,326	0,00980
C2H6	0	1020,57	0	-1477,87	0	-2283,446	0	0,890	0
C2H4	0	5051,29	0	2991,29	0	2309,074	0	0,777	0
H2O	0,07604	-11078,54	-842,453	-12465,08	-947,891	-12993,47	-988,072	0,327	0,02483
O2	0,11703	1128,98	132,126	475,38	55,634	214,3755	25,089	0,312	0,03652
	1,00000	H total	719,382		148,989	496,7802	496,780	1,064	1,06442