



**Universidad Autónoma de Baja California**  
**Instituto de Investigaciones Oceanológicas**  
**Facultad de Ciencias Marinas**  
**Facultad de Ciencias**  
**Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo**

**Tesis**

**LODOS RESIDUALES COMO MATERIA PRIMA PARA LA  
RECUPERACIÓN ENERGÉTICA EN ENSENADA, B. C.**

Que para obtener el grado de  
Doctora en Medio Ambiente y Desarrollo.

Presenta

**Rebeca Rojas Remis**

**Director: Dr. Leopoldo G. Mendoza Espinosa**

**Sinodal: Dra. Nelly Calderón de la Barca**

**Sinodal: Dra. Sara Ojeda Benítez**

**Sinodal: Dra. Gisela Montero Alpírez**

**Sinodal: Dra. María del Carmen Alcalá Álvarez**

Ensenada, Baja California, Enero de 2014

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres porque me enseñaron  
a perseguir mis sueños y luchar por ellos.

A mi esposo por que siempre ha estado  
ahí apoyándome para nunca rendirme.

A mis hermanos por motivarme a  
seguir adelante y creer en mí.

A mis cuñados, suegros y sobrina  
por tener siempre una palabra de aliento.

A mi director y sinodales por sus conocimientos.

A mis compañeros y amigos del doctorado  
que hombro con hombro hemos conseguido  
cumplir nuestra meta.

A mis alumnos que sin saberlo me han  
hecho crecer como profesionista y persona.

A todas aquellas personas que he  
conocido en el camino, pues me han enseñado  
que la vida es una experiencia maravillosa.

## RESUMEN

El aumento de la población en México ha hecho que se incremente la red de agua potable y drenaje, lo que ha dado lugar a la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Esto ha implicado mayor tratamiento de agua residual y, a su vez, un incremento en la cantidad de lodos residuales generados. Los lodos residuales representan un problema ambiental y social por las cantidades, volúmenes y contaminación que generan. Tan sólo en México se estima que los lodos residuales generados por las 2,029 PTAR públicas del país, generan 640,000 toneladas por año, de los cuales el 76% se dispone como relleno en tierra a cielo abierto.

La PTAR más grande de la ciudad de Ensenada, Baja California, operada por la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Ensenada (CESPE), llamada “El Naranja”, maneja 28,800 toneladas de lodos al año provenientes de las 5 PTAR de la ciudad, los cuales desde hace 12 años han sido depositados como relleno en tierra a cielo abierto. Dicha actividad representa un peligro latente al medio ambiente, por lo que es necesario encontrar maneras de tratar eficientemente estos lodos.

Por lo anterior se realizó un análisis, desde un punto de vista interdisciplinario, sobre el manejo de lodos residuales, su recuperación para la generación de energía, su impacto ambiental, un análisis de percepción social, así como un análisis costo-impacto. El resultado del análisis realizado, indica que la incorporación de un sistema de digestión anaerobia con recuperación energética, representa un ahorro para CESPE del 88% del gasto anual energético, el 81% del gasto anual por manejo de lodos residuales y disminuye en un 69% la generación de lodos residuales y gases de efecto invernadero (GEI), lo que reduce el impacto ambiental generado por el manejo actual de estos lodos. Adicionalmente representa un beneficio para los habitantes cercanos a la PTAR, pues al mejorar la calidad ambiental, disminuyen los problemas de salud asociados. Como conclusión la instalación de un sistema de digestión anaerobia con recuperación energética en la PTAR “El Naranja” es viable desde un punto de vista sustentable.

## ABSTRACT

The population growth in Mexico has made to increase the drinking water supply and drainage services, which has resulted in the construction of waste water treatment plants (WWTP), implying higher wastewater treatment and, in turn, an increased amount of sewage sludge produced. Sewage sludge represents an environmental and social problem for the quantities, volumes and pollution generated, however, can be treated to become biosolids, and can be used as fertilizer, soil stabilizer and even to produce electricity through anaerobic digestion systems.

The sewage sludge generated in Mexico from the 2,029 WWTP is about 640,000 tons per year, of which 76% regardless of treatment is deposited as landfill.

The largest WWTP of Ensenada, Baja California, is operated by the State Public Service Commission of Ensenada (CESPE), called "El Naranjo" handles 28,800 tons per year of sewage sludge from the 5 WWTP of the city, this sewage sludge has been deposited as a landfill for 12 years. Such activity represents a potential danger to the environment, so it is necessary to find ways to treat this sewage sludge efficiently.

An analysis from an interdisciplinary perspective on the management of sewage sludge: its use for energy recovery, their environmental impacts and social benefits as well as cost-impact analysis. The results of the analysis indicates that the addition of an anaerobic digestion system with energy recovery, represents for CESPE an annual savings in energy costs of 88%, a reduction of 81% of the annual expenditure of sewage sludge management and reduce 69% the environmental impact caused by the generation of greenhouse gases (GHG) and volume of sewage sludge generated. Additionally, is a benefit for nearby residents of WWTP "El Naranjo", because the improving of environmental quality, reduces associated health problems.

In conclusion installing an anaerobic digestion system with energy recovery in WWTP "El Naranjo" is feasible from a sustainable point of view.

## INDICE GENERAL

<b>1. INTRODUCCIÓN.</b> .....	<b>1</b>
1.1 Manejo de lodos residuales en el mundo.....	4
1.2 Lodos residuales en México. ....	6
1.3 Aspectos legales del manejo de lodos residuales y biosólidos a nivel mundial. ....	7
1.4 Legislación Mexicana.....	10
1.5 Calidad de lodos residuales y biosólidos en México. ....	12
1.6 La recuperación de energía por medio de digestión anaerobia. ....	13
1.7 Digestores anaerobios para el tratamiento de lodos residuales. ....	14
1.8 Proceso de Digestión Anaeróbica.....	18
1.9 Diseño de Tanques Digestores Anaerobios.....	23
1.10 Sistema para generación de energía eléctrica.....	25
1.11 Simulación dinámica de sistemas.....	27
1.12 Impacto ambiental generado por los lodos residuales. ....	28
1.13 Emisión de GEI por lodos residuales en México. ....	30
1.14 Utilización de ACV para determinar el impacto ambiental de sistemas. ....	31
1.15 Percepción social y riesgos a la salud. ....	32
1.16 Factibilidad financiera de aprovechamiento de lodos residuales como fuente de energía.....	36
1.17 Importancia de los análisis costo-impacto. ....	36
<b>2. OBJETIVOS.</b> .....	<b>38</b>
2.1 Objetivo General.....	38
2.2 Objetivos Específicos.....	38
<b>3. HIPÓTESIS.</b> .....	<b>39</b>
<b>4. METODOLOGIA.</b> .....	<b>40</b>
2.1 Determinación de la calidad de los lodos residuales para su utilización como materia prima para la recuperación energética.....	40
2.2 Prototipado y diseño de experimento. ....	41
2.3 Modelación del sistema de digestión anaerobia con recuperación energética. ....	45

2.4 Análisis de impacto ambiental. ....	46
2.5 Análisis de percepción social.....	48
2.5.1 Diseño del estudio cualitativo y trabajo de campo.....	52
2.5.1. Análisis de entrevistas abiertas enfocadas. ....	56
2.5.2. Análisis de entrevistas semi estructuradas con preguntas abiertas. ....	57
2.6 Análisis costo-impacto (ACI) y de valor económico. ....	57
2.6.1 Análisis de costos para cada alternativa. ....	58
2.6.2 Análisis de impacto para cada alternativa. ....	62
2.6.3 Análisis de valor económico. ....	63
<b>3. RESULTADOS.....</b>	<b>65</b>
3.1 Calidad de lodos residuales PTAR “El Naranja”. ....	65
3.2 Potencial energético del sistema. ....	67
3.3 Modelación del sistema de digestión con recuperación energética. ....	70
3.4 Impacto ambiental del sistema. ....	82
3.5 Percepción social.....	87
3.3.1 Categoría conocimiento. ....	90
3.3.2 Categoría efectos.....	92
3.3.3 Categoría relación vecinos-gobierno.....	95
3.3.4 CESPE, CFE e Institución Educativa. ....	98
3.6 Costo-impacto y valoración económica del sistema de digestión con recuperación energética. ....	104
<b>4. DISCUSIÓN. ....</b>	<b>116</b>
<b>5. CONCLUSIONES. ....</b>	<b>126</b>
<b>6. REFERENCIAS.....</b>	<b>128</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>141</b>

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estadísticas sobre el aprovechamiento de lodos residuales en México y otros países. ....	6
Figura 2. Digestores anaerobios de primera generación.....	15
Figura 3. Digestores anaerobios de segunda generación .....	16
Figura 4. Digestores anaerobios de tercera generación.....	17
Figura 5. Tipos de configuraciones de digestores anaerobios .....	18
Figura 6. Reacción química en la fase de hidrólisis .....	18
Figura 7. Reacciones químicas de la fase de acidogénesis.....	19
Figura 8. Reacciones químicas de la fase de acetogénica y metanogénica .....	20
Figura 9. Marco metodológico que sirvió como base para la desarrollo del proyecto de tesis.....	40
Figura 10. Diseño de tanque digestor para realización de experimentos .....	42
Figura 11. Prototipo experimental de digestor anaerobio fabricado en acero inoxidable con termómetros para biogás y lodos residuales, así como válvula de seguridad y llave de drenado .....	42
Figura 12. Formato para el monitoreo y registro de los parámetros de los experimentos de digestión anaerobia.....	43
Figura 13. Pesaje, alimentación y drenado de lodos residuales para los experimentos realizados .....	44
Figura 14. Metodología del ACV realizada en el presente estudio.....	47
Figura 15. Vista panorámica de la ubicación de la PTAR “El Naranja” y la zona de influencia .....	49
Figura 16. Marco metodológico para la realización del análisis de percepción social .....	51
Figura 17. Ubicación de las entrevistas realizadas a los habitantes de la zona y a los profesores de la institución educativa .....	53
Figura 18. Comparativo de la normatividad aplicable para concentración de metales pesados en los lodos residuales de la PTAR “El Naranja” .....	66
Figura 19. Sistema de digestión anaerobia con depuración de biogás para producción de energía eléctrica a partir de la combustión del metano.....	70

Figura 20. Sector 1 dedicado a las operaciones de recepción de aguas residuales y la generación de lodos residuales .....	72
Figura 21. Sector 2 dedicado a la recolección y mezcla de lodos residuales.....	72
Figura 22. Sector 3 donde se realiza la digestión de lodos residuales con la finalidad de producir biogás y biosólidos clase B para la producción de composta .....	73
Figura 23. Sector 4 sistema de purificación de biogás para la obtención de CH <sub>4</sub> .	73
Figura 24. Sector 5 utilización de CH <sub>4</sub> como biocombustible para la generación de energía .....	74
Figura 25. Sector 6 Energía producida para su distribución en el sistema eléctrico de la PTAR “El Naranjo” .....	74
Figura 26. Sector 7 Energía eléctrica disponible para satisfacer los requerimientos energéticos de la PTAR “El Naranjo” .....	74
Figura 27. Sector 8 sistema actual de manejo de lodos residuales que se lleva a cabo actualmente en la PTAR “El Naranjo” .....	75
Figura 28. Gráfico de resultados que muestra la relación a 25 años de los lodos residuales generados y los biosólidos resultantes .....	78
Figura 29. Gráfico de resultados que muestra el promedio anual de generación de energía eléctrica y su utilización para abastecer a la PTAR “EL Naranjo”, para un contenido de CH <sub>4</sub> del 50%. .....	80
Figura 30. Gráfico de resultados que muestra el promedio anual de generación de energía eléctrica y su utilización para abastecer a la PTAR “El Naranjo”, para un contenido de CH <sub>4</sub> del 60%. .....	80
Figura 31. Gráfico de resultados que muestra el promedio anual de generación de energía eléctrica y su utilización para abastecer a la PTAR “El Naranjo”, para un contenido de CH <sub>4</sub> del 70%. .....	81
Figura 32. Diagrama de entradas, procesos y salidas para el sistema actual de gestión de lodos residuales en la PTAR “El Naranjo” .....	83
Figura 33. Diagrama de entradas, procesos y salidas para el sistema de digestión anaerobia con recuperación energética propuesto para la PTAR “El Naranjo” .....	84

Figura 34. Gráfica comparativa de las cantidades en kg/año generadas por cada categoría para cada escenario .....	86
Figura 35. Línea de tiempo del crecimiento población alrededor de la PTAR “El Naranja” de 2004 a 2011.....	88
Figura 36. Marco conceptual resultante del análisis de percepción sobre la categoría de “Conocimiento” .....	92
Figura 37. Marco conceptual resultante del análisis de percepción sobre la categoría de “Efectos” .....	95
Figura 38. Marco conceptual resultante del análisis de percepción sobre la categoría de “Vecinos-gobierno” .....	97
Figura 39. Marco conceptual resultante del análisis de percepción de actores Habitantes de la zona de influencia.....	97
Figura 40. Marco conceptual resultante del análisis de percepción del actor Habitantes de la zona de influencia.....	101
Figura 41. Marco conceptual resultante del análisis de percepción de actores Habitantes de la zona de influencia.....	102

## INDICE DE CUADROS

Cuadro I. Generación de lodos residuales/biosólidos en México y el mundo y su aprovechamiento para la recuperación energética.....	7
Cuadro II. Legislación para lodos residuales/biosólidos en México y el mundo ....	10
Cuadro III. Clasificación de lodos y biosólidos para su aprovechamiento establecido en la NOM-004-SEMARNAT-2002.....	11
Cuadro IV. Ventajas y desventajas de los sistemas de digestión anaerobia para la recuperación energética .....	14
Cuadro V. Condiciones y parámetros de operación del digester anaerobio.....	21
Cuadro VI. Potencial de generación de energía eléctrica el biogás y del metano	23
Cuadro VII. Procesos de digestión anaerobia y su eficiencia para la producción de biogás y potencial de generación de energía eléctrica.....	23
Cuadro VIII. Gases más importantes en la composición del biogás.....	29
Cuadro IX. Gases de efecto invernadero (GEI) y su potencial de calentamiento..	29
Cuadro X. Preguntas abiertas para la realización de las entrevistas semi estructuradas a informantes clave de CESPE y CFE.....	54
Cuadro XI. Descripción de los códigos y categorías utilizados para la agrupación de los datos. ....	56
Cuadro XII. Depreciación anual asignada a la infraestructura y equipo para la alternativa 1 y 2 de acuerdo con el DOF, 2012 y LISR, 2012 .....	58
Cuadro XIII. Porcentajes del costo de inversión considerados para determinar el costo por mantenimiento. ....	60
Cuadro XIV. Metas por alcanzar al implementar cada una de las alternativas .....	62
Cuadro XV. Comparativo del cumplimiento con la NOM-004-SEMARNAT-2002 de límites máximos permisibles para patógenos y parásitos de lodos residuales de la PTAR “El Naranja” .....	66
Cuadro XVI. Porcentaje de humedad de los lodos residuales de la PTAR “El Naranja” de acuerdo con la NOM-004-SEMARNAT-2002 .....	67
Cuadro XVII. Medición de las variables consideradas durante los experimentos realizados para determinar el potencial de recuperación energética a partir de la digestión de los lodos residuales de la PTAR “El Naranja” .....	67

Cuadro XVIII. Matriz principal de cálculos realizados para determinar el potencial de producción de biogás, CH <sub>4</sub> y energía eléctrica por año para cada escenario ..	68
Cuadro XIX. Potencial de generación de energía eléctrica utilizando los lodos residuales de la PTAR “El Naranja”, como materia prima para cada escenario ....	69
Cuadro XX. Requerimiento energético de la PTAR “El Naranja”, del sistema de digestión anaerobio con recuperación energética propuesto y ahorro en energía suministrada por CFE para cada escenario .....	70
Cuadro XXI. Listado y descripción de infraestructura y equipo necesarios para la implementación del sistema de digestión con recuperación energética en la PTAR “El Naranja” .....	71
Cuadro XXII. Variables independientes y dependientes utilizadas en cada sector la modelación del sistema con recuperación energética propuesto para la PTAR “El Naranja” .....	75
Cuadro XXIII. Promedio mensual a 25 años de disminución de lodos residuales a manejar de acuerdo con la modelación realizada en STELLA .....	79
Cuadro XXIV. Promedio mensual a 25 años de generación de energía eléctrica y del abastecimiento energético para la PTAR “El Naranja”, de acuerdo con la modelación realizada en STELLA .....	81
Cuadro XXV. Datos de entrada y salida para la realización del inventario y del ACV para los escenario 1 y 2b .....	85
Cuadro XXVI. Datos normalizados arrojados por el software IWM2, resultantes de la cantidad generada por categoría para el escenario 1 y 2b.....	85
Cuadro XXVII. Porcentaje de disminución para cada categoría del escenario 2b con respecto al escenario 1.....	86
Cuadro XXVIII. Impacto que genera cada salida representada por una categoría	87
Cuadro XXIX. Cuadro de actores involucrados en el sistema actual de la PTAR “El Naranja” y el sistema de digestión anaerobia con recuperación energética propuesto. ....	89
Cuadro XXX. Flujo de costos a 10 años de la PTAR “El Naranja” para la alternativa 1 en pesos mexicanos (Información proporcionada por CESPE .....	104

Cuadro XXXI. Flujo de costos a 10 años de la PTAR “El Naranja” para la alternativa 2b en pesos Mexicanos .....	105
Cuadro XXXII. Flujo de costos a 25 años de la PTAR “El Naranja” para la alternativa 1 en pesos Mexicanos .....	106
Cuadro XXXIII. Flujo de costos a 25 años de la PTAR “El Naranja” para la alternativa 2b en pesos Mexicanos .....	107
Cuadro XXXIV. Costo total VP para las alternativas 1 y 2b a 10 años.....	108
Cuadro XXXV. Costo total VP para las alternativas 1 y 2b a 25 años.....	108
Cuadro XXXVI. Costo total anual para las alternativas 1 y 2b a 10 años.....	109
Cuadro XXXVII. Costo total anual para las alternativas 1 y 2b a 25 años.....	109
Cuadro XXXVIII. Costo por habitante durante la vida útil de las alternativas 1 y 2b a 10 años.....	109
Cuadro XXXIX. Costo por habitante durante la vida útil de las alternativas 1 y 2b a 10 años.....	109
Cuadro XL. Nivel de importancia para cada meta que se pretenden alcanzar por las alternativas .....	110
Cuadro XLI. Impacto total ponderado para cada una de las alternativas a 10 y 25 años .....	111
Cuadro XLII. Costo por unidad de impacto (CUI) por cada meta para cada una de las alternativas a 10 años.....	111
Cuadro XLIII. Costo por unidad de impacto (CUI) por cada meta para cada una de las alternativas a 25 años.....	111
Cuadro XLIV. Costo- impacto total (CUI <sub>A</sub> ) para cada una de las alternativas a 10 años .....	112
Cuadro XLV. Costo- impacto total (CUIA) para cada una de las alternativas a 25 años .....	112
Cuadro XLVI. Productos, cantidades generadas y su valor en el mercado para cada alternativa analizada.....	113
Cuadro XLVII. Flujos de efectivo para la alternativa 1.....	114
Cuadro XLVIII. Flujo de efectivo para la alternativa 2b .....	114
Cuadro XLIX. Comparativo de VPN y TIR de las alternativa 1 y 2b .....	115

## INDICE DE ANEXOS

<b>Anexo 1.</b> Portada del artículo: Un residuo aprovechable: Lodos residuales.....	142
<b>Anexo 2.</b> Portada del artículo: El potencial de generación de energía eléctrica utilizando biosólidos como fuente de materia prima: El caso de la ciudad de Ensenada, B.C. ....	144
<b>Anexo 3.</b> Poster: Biosólidos como materia prima para la producción de energía .....	146
<b>Anexo 4.</b> Portada del artículo: Utilización de biosólidos para la recuperación energética en México. ....	148
<b>Anexo 5.</b> Portada del artículo: Plantas de tratamiento de aguas residuales como sistema complejo.....	150
<b>Anexo 6.</b> Portada del capítulo: Gestión sustentable de lodos residuales: Propuesta para la recuperación energética y reducción de impactos .....	152
<b>Anexo 7.</b> Versión digital de la Tesis y Anexos .....	154

## 1. INTRODUCCIÓN.

Al igual que el resto del mundo, la crisis del agua en México se debe, entre otras cosas, al incremento y concentración de la población. El desarrollo económico del país ha permitido el crecimiento de las redes de agua potable y drenaje (CONAGUA, 2011) y un aumento en la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) que permiten tratar las aguas residuales hasta niveles aceptables. Es de esperarse que el reuso de estas aguas en la agricultura, riego de parques y jardines y recarga de acuíferos vaya en aumento.

En el 2011 en México se generaron 6,700 millones de m<sup>3</sup> de aguas residuales, y se espera que en 20 años el volumen de agua tratada aumente a 9,200 millones de m<sup>3</sup>. Esto implica que la generación de lodos residuales se incremente de 640,000 toneladas para 2011 a 880,000 toneladas para el 2030 (CONAGUA, 2011).

Se les llama lodos residuales a los sólidos remanentes del proceso de tratamiento de las aguas residuales municipales que son removidos para que el agua pierda sus propiedades contaminantes y esta pueda volver a utilizarse (Ortiz, 1995). Los lodos residuales también deben ser tratados para eliminarse o transformarse y sus elementos contaminantes no representen un riesgo a la salud o al ambiente. Por ello, es importante que las plantas de tratamiento de aguas residuales no sólo contemplen cómo tratar el agua sino también deben de plantear qué hacer con los lodos residuales generados (Daguer, 2004).

Los lodos residuales son un problema por el costo adicional de tratamiento que implican, los volúmenes y las cantidades que se generan, así como por su composición, ya que están constituidos principalmente por materia orgánica y por elementos contaminantes que fueron removidos del agua, tales como: metales pesados, material inorgánico y contaminantes emergentes (productos de limpieza, plaguicidas, medicamentos y productos de cuidado personal). Asimismo, son un problema debido a los gases que desprenden como producto de su descomposición, los malos olores y las bacterias y demás microorganismos patógenos que pueden llegar a generar. De ahí que los lodos residuales, a su vez,

deban ser tratados para eliminar, disminuir o transformar estos elementos y que no representen un riesgo para la salud ni el medio ambiente (Ghazy, 2009).

Sin embargo, el problema generalizado con respecto al manejo de lodos residuales radica en que estos no son considerados un tema importante en las políticas públicas del manejo de residuos y, por lo tanto, ni se controlan ni se tratan adecuadamente, convirtiéndose en un problema de contaminación ambiental y de salud pública de las ciudades (UN-HABITAT, 2008).

Existen diferentes tratamientos para lodos residuales que se utilizan con la finalidad de reducir su volumen y estabilizarlos, es decir, que los lodos pierdan sus propiedades contaminantes y que puedan ser reutilizados o aprovechados. Una vez que los lodos se encuentran estabilizados son denominados biosólidos y pueden ser aprovechados con diferentes propósitos: composta, fertilizantes, mejorador de suelos, reutilización en procesos industriales y producción de energía eléctrica (Mahamud, 1996).

En el Atlas Global para el Manejo de la Excreta, Lodos Residuales y Biosólidos publicado en el 2008 por United Nations Human Settlements Programme (UN-HABITAT) y la Comisión Canadiense del manejo de lodos, se especifica que los países desarrollados usualmente invierten en infraestructura para la reducción y estabilización de lodos, cuentan con un control sobre su cantidad y calidad, así como de su disposición final y/o aprovechamiento. En contraste, los países en vías de desarrollo no consideran los lodos residuales como un residuo a tratar, lo que da como resultado una nula inversión en infraestructura para su tratamiento así como deficiente información estadística sobre las cantidades generadas y su disposición final (Cardoso, 2000).

Es importante mencionar que, en promedio, los países desarrollados utilizan un 15% de los biosólidos generados para la recuperación energética por medio de digestores anaerobios. La energía producida es utilizada para abastecer de energía eléctrica al propio sistema de digestión así como los requerimientos energéticos de la PTAR donde se encuentra instalado el sistema de digestión anaerobia (UN-HABITAT, 2008).

La conveniencia para la implementación de un sistema de digestión anaerobia radica en que reduce en un 24% el volumen de lodos residuales y produce un 25% adicional de energía, por lo que representa una reducción del 30% en el costo anual de manejo y disposición de lodos residuales, el cual se estima es de aproximadamente el 45% del gasto anual de una PTAR (Onyeche, 2011).

La percepción social que existe sobre el manejo y aprovechamiento de los lodos residuales es importante debido a que las PTAR suelen encontrarse instaladas cerca de zonas habitadas, por lo que en la realización de proyectos de utilización de lodos residuales y biosólidos se deben de llevar a cabo reuniones con la comunidad para hacerlos partícipes y que conozcan sobre las bondades de su reciclaje, su reutilización (Beecher, 2005) y los beneficios sociales y ambientales que este tipo de proyectos implican.

La Agencia para la Protección Ambiental de Estados Unidos (Environmental Protection Agency - EPA) incluye en sus programas de reuso de biosólidos prácticas de concientización a la comunidad sobre la importancia de reciclar y reutilizar los biosólidos y ha establecido en su normatividad que cualquier proyecto de esta índole debe de involucrar a la comunidad que será beneficiada con la finalidad de que conozcan del tema y formen parte del proyecto.

A continuación se realiza una revisión de la información disponible sobre el manejo de lodos residuales y el aprovechamiento de biosólidos a partir de la digestión anaerobia con la finalidad de utilizarlo como materia prima para la generación de energía eléctrica. Adicionalmente, se hace una revisión sobre el impacto ambiental de los gases de efecto invernadero (GEI) y riesgos a la salud pública que provocan los lodos residuales y de las implicaciones tanto económicas como legales que conlleva el desarrollar proyectos de recuperación energética, así como las medidas de prevención necesarias para disminuir su generación en México.

## 1.1 Manejo de lodos residuales en el mundo

Diversos autores concuerdan con Snyman *et al.* (2000) en que la disposición y/o aprovechamiento final de los lodos residuales implica un reto económico y de ingeniería, puesto que el volumen y las cantidades que se generan involucran tanto la inversión en infraestructura como el desarrollo de tecnologías que reduzcan su volumen y los estabilice con la finalidad de reducir o eliminar sus propiedades contaminantes.

Existen diferentes tratamientos para reducir el volumen y estabilizar los lodos residuales con la finalidad de convertirlos en un producto que pierda sus propiedades contaminantes y así poder ser reutilizados.

Los tratamientos para la reducción de volumen son: deshidratación e incineración. El problema con estos tratamientos es que la deshidratación únicamente reduce en un 20% el volumen, mientras que la incineración, si bien reduce el volumen en un 80% y elimina los compuestos orgánicos tóxicos, destruye las bacterias y nutrientes que pudieran ser útiles para usarlo como fertilizante; además, el proceso genera gases de efecto invernadero (GEI), provocando contaminación ambiental considerable y altos costos de operación (Cardoso, 2000).

Por su parte, los procesos para la estabilización de lodos residuales son: digestión aerobia (en donde bacterias aerobias degradan la materia orgánica), digestión anaerobia (en el cual la materia orgánica es degradada por bacterias anaeróbicas y es posible generar energía eléctrica mediante la utilización del biogás producido durante la digestión) y tratamiento químico (que generalmente consiste en añadir cal a los lodos provocando fermentaciones ácidas que evitan la proliferación de microorganismos).

En los tres casos anteriores la estabilización está enfocada en eliminar o disminuir la materia orgánica presente en los lodos residuales. Sin embargo, otros compuestos como metales pesados, plaguicidas y material inorgánico seguirán presentes, por lo que es importante someter los lodos residuales resultantes (biosólidos) a un análisis para determinar si son un residuo peligroso o no y así determinar el tipo de manejo y disposición final adecuado (Oropeza, 2006).

Con base en lo anterior se han desarrollado propuestas para generar novedosas formas de reutilización y aprovechamiento de los biosólidos como: producción de biodiesel (Kargbo, 2010) y utilización como materia prima para construcción de carreteras y edificios (UN-HABITAT, 2008).

En todos los países del mundo se tratan las aguas residuales y por lo tanto se generan lodos residuales (Figura 1). De acuerdo con UN-HABITAT (2008), Estados Unidos genera alrededor de 7.2 millones de toneladas por año de lodos residuales; sus PTAR cuentan con sistemas de reducción de volumen y estabilización, por lo que el 49% de los biosólidos se utilizan benéficamente para aplicación en la agricultura, silvicultura o mejorador de suelos, el 45% es dispuesto como relleno en tierra, confinamientos o simplemente es incinerado y el 6% tiene otros usos.

En Canadá, los lodos son estabilizados y posteriormente el 52% es utilizado como fertilizante en agricultura, 22% es incinerado (en algunos casos el vapor generado es utilizado para recuperación de energía), el 17% se deposita como relleno en tierra y el 9% restante en otros usos.

La unión Europea, constituida por 27 países, genera 9 millones de toneladas por año y destina el 45% de sus lodos residuales a la agricultura, el 23% a generación de energía térmica (por medio de la incineración), el 18% como relleno en tierra y el 14% restante a elaborar composta y otros usos particulares.

Los tratamientos de lodos que utiliza China son la deshidratación y la digestión anaerobia para reducción de volumen y estabilización respectivamente, para posteriormente aplicar el 45% en la agricultura, 34.4% como relleno en tierra, 3.5% en la ganadería, 3.5% se incinera y el porcentaje restante a otros usos.

En América Latina, Brasil dispone el 45% como relleno en tierra, el 5.6% en la agricultura y el porcentaje restante es indefinido.

Es importante mencionar que el manejo de los lodos residuales más común en países en vías de desarrollo como Sudáfrica y Bulgaria es el de digestión anaerobia.

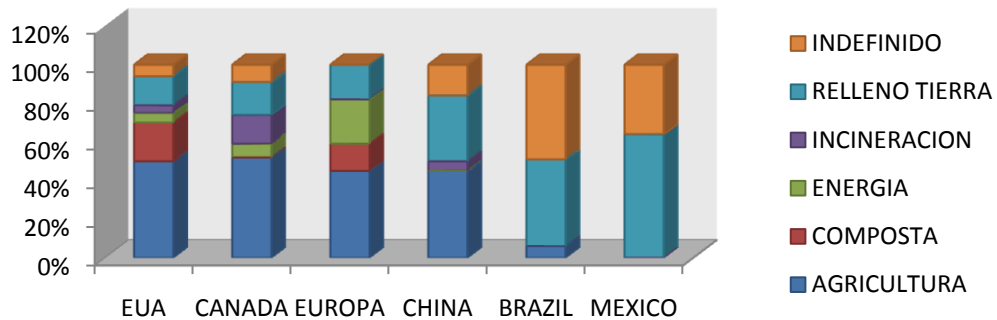


Figura 1. Estadísticas sobre el aprovechamiento de lodos residuales en México y otros países. Datos obtenidos del Atlas mundial del manejo de excreta, lodos residuales y biosólidos publicado por UN-HABITAT en 2008 (Elaboración propia).

Aunque en los países en vías de desarrollo no se tienen controles estrictos de los lodos residuales generados, su manejo y disposición, se han realizado proyectos de investigación que implican el análisis de calidad de lodos y elaboración de propuestas para lograr su estabilización y aprovechamiento benéfico, principalmente como fertilizante de cultivos agrícolas y mejorador de suelos (Cardoso, 2000). Aunque en América Latina se han generado proyectos a menor escala para la reutilización de biosólidos como materia prima para la producción de energía, no se cuenta con datos oficiales sobre las cantidades utilizadas y la cantidad de energía eléctrica producida y su utilización final.

## 1.2 Lodos residuales en México.

Tan sólo en México se estima que los lodos residuales generados por las 2,029 PTAR que tratan el 37% de las aguas residuales que se captan en el sistema de drenaje ( $88 \text{ m}^3/\text{s}$ ) (CONAGUA, 2011) es entre 640,000 y 10 millones de toneladas por año (Jiménez, 2011). Tal discrepancia se debe a que en ocasiones la cantidad reportada está en peso seco y en otros casos no se menciona el contenido de humedad, de tal suerte que no existe un dato oficial sobre la cantidad de lodos residuales y biosólidos generados.

Adicionalmente, los reportes no incluyen información sobre el tratamiento que reciben los lodos residuales, su disposición y/o aprovechamiento final.

De acuerdo con Jiménez y Wang (2006) de las 640,000 toneladas de lodos residuales que se generan, el 51% es estabilizado mediante digestión anaerobia, sin embargo no se recupera el biogás generado durante este proceso, ya que el 76% de los lodos residuales, independientemente de su tratamiento, es depositado como relleno a cielo abierto.

Como se muestra en la Cuadro I, México y otros países de América Latina, en comparación con otros países desarrollados, no lleva un registro confiable sobre la cantidad de lodos que se generan, los tipos de tratamiento y la disposición final que cada PTAR utiliza.

Cuadro I. Generación de lodos residuales/biosólidos en México y el mundo y su aprovechamiento para la recuperación energética (información extraída de UN-HABITAT, 2008).

País	Lodos/biosólidos generados (millones t/a)*.	Cantidad depositada como relleno en tierra (%).	Cantidad utilizada para recuperación energética (%).
Estados Unidos	7.2	15	5
Canadá	0.550	17	7
Unión Europea	9.2	18	23
China	2.9	34	0
Japón	2.0	20	5
Brasil	0.48	45	0
México	0.640	76	0

\*t/a= toneladas por año.

### 1.3 Aspectos legales del manejo de lodos residuales y biosólidos a nivel mundial.

La necesidad de regular el manejo de los lodos residuales, su tratamiento, aprovechamiento y disposición, radica en la importancia de mitigar los efectos negativos al medio ambiente, efectos nocivos a la salud y riesgos al ser reutilizados o aprovechados de diversas formas.

En los últimos 10 años a nivel mundial se ha incrementado en un 50% la producción de lodos residuales debido a las exigencias ambientales para el tratamiento de las aguas residuales con la finalidad de disminuir los impactos ambientales al ser descargadas en cuerpos de agua (Rizzardini, 2009).

En el caso de la Unión Europea, desde 1992 se han emitido reglamentaciones con la finalidad de reutilizar los lodos residuales, lo cual generó que en 2006 se emitiera una ley general para la reutilización y aprovechamiento de los lodos residuales con la finalidad de promover entre los países europeos la elaboración de reglamentos locales que lograra obligar a las PTAR dar tratamiento de sus lodos residuales para ser aprovechados como biosólidos.

La implementación de esta ley y sus reglamentos particulares ha logrado que en al menos 7 países pertenecientes a la comunidad Europea se hayan reutilizado el 50% de sus lodos como fertilizante agrícola, mejorador de suelos y materia prima para fábricas de composta (Rizzardini, 2009). Tales regulaciones consideran concentraciones y límites máximos permisibles de metales pesados, coliformes fecales, salmonella, huevos de helmintos, niveles de toxicidad, reactividad, corrosividad, explosividad y presencia de agentes biológico-infecciosos, para lodos y biosólidos, y máximas cantidades permitidas para su aplicación en tierra u otro aprovechamiento.

En los Estados Unidos, la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) se encarga de regular el manejo, tratamiento y disposición de los lodos residuales, así como de los biosólidos. También cuenta con estadísticas y datos sobre cantidades y tratamientos por PTAR, lo que hace que se tengan datos oficiales sobre su calidad, su aprovechamiento y su disposición final. Adicionalmente, la EPA establece los requisitos y procedimientos para cada uno de los diversos tipos de tratamientos, lo que implica que regule adecuadamente los sistemas de digestión anaerobia y las condiciones bajo las cuales se genera energía a partir del biogás producido. Clasifica los biosólidos resultantes de diversos tipos de tratamiento en A, B y C; donde A es el biosólido con mayor calidad, por lo que puede ser aplicado en la agricultura, mejorador de suelos, composta ornamental y aditivo como materiales para la construcción.

Por su parte, en Sudáfrica desde 1997 se establecieron los criterios de calidad y composición de los biosólidos con la finalidad de poder ser aprovechados (Snyman, 2000) y son clasificados en cuatro tipos, de acuerdo con el tipo de tratamiento que recibieron: A (no requiere tratamiento por su calidad), B

(tratamiento de digestión aeróbica), C (tratamiento mediante digestión anaeróbica, compostaje, irradiación y pasteurización) y D (lo mismo que para C pero con menor contenido de metales pesados) (Jiménez y Wang, 2006).

China basa su legislación en la aplicación de biosólidos como fertilizante agrícola y mejorador de suelos controlando la duración y cantidad que es aplicada, en términos de la textura tanto del suelo como del biosólido y del nivel del agua subterránea. La legislación es muy estricta con respecto a los máximos permisibles de metales pesados y no establece límites para organismos patógenos (Jiménez y Wang 2006).

Brasil toma como referencia la clasificación que establece la EPA, tanto para utilización de biosólidos de acuerdo con su calidad, como para límites máximos permisibles de patógenos y de metales pesados.

En cambio, Guatemala cuenta con reglamentación sobre el reuso y disposición de lodos, pero no contempla regulaciones sobre los tratamientos (IMTA, 2000).

Por su parte, en Nicaragua el manejo y disposición de los lodos residuales debe de realizarse conforme las recomendaciones que en su momento emita la comisión de medio ambiente (IMTA, 2000).

En cuanto a Chile, el Congreso Nacional Chileno (CNC) en 2009 publicó el decreto mediante el cual se establece el reglamento para el manejo de los lodos residuales generados por las PTAR. En este se considera la clasificación sanitaria para el reuso de lodos residuales y sus diferentes aprovechamientos, así como los lugares en los que deberán de disponerse cuando estos sean considerados como residuos peligrosos por su composición. Adicionalmente hace referencia a los diferentes tratamientos mediante los cuales pueden ser estabilizados los lodos residuales y los clasifica de acuerdo con su composición fisicoquímica para poder ser aprovechados en tres categorías: A, B y C, considerando que el biosólido con mayor calidad y que se puede aprovechar para mas usos es el A (Legislación Chilena, 2009).

Como se presenta en el Cuadro II, la legislación usualmente es un reflejo de las necesidades detectadas por cada país. Los países desarrollados conocen el

problema ambiental y de salud pública que representan los lodos residuales, por lo que su legislación es específica, para sus tratamientos y control de sus aprovechamientos; mientras que los países en vías de desarrollo aunque consideran que los lodos residuales representan un problema y deben regularse, dan prioridad al desarrollo de legislación que tenga que ver con cuestiones de alimentación y atención a la pobreza.

Cuadro II. Legislación para lodos residuales/biosólidos en México y el mundo (información extraída de EPA, 2000; Snyman, 2000; Jiménez y Wang, 2006; CNC, 2009).

País	Consideración como residuo sólido de manejo especial	Manejo y disposición final	Tratamientos de estabilización	Reutilización y/o aprovechamiento según clasificación	Aprovechamiento como fuente de energía (recuperación energética)
Estados Unidos	X	X	X	X	X
Unión Europea	X	X	X	X	X
Sudáfrica					
China	X	X		X	
México	X			X	
Brasil	X	X	X	X	X
Chile	X	X	X	X	

#### 1.4 Legislación Mexicana.

La ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LEGEPIR, 2007) clasifica a los lodos residuales como un residuo sólido urbano y los considera como de manejo especial, por lo que hay que disponerlos adecuadamente según sus propiedades contaminantes.

De acuerdo con la NOM-004-SEMARNAT-2002 (SEMARNAT, 2002), todas las PTAR deben de realizar análisis de los lodos residuales generados en periodos de acuerdo a las cantidades generadas mensualmente y considerando límites máximos permisibles para el contenido de metales pesados, microorganismos patógenos y análisis CRETIB (corrosividad, radioactividad, explosividad, toxicidad y biológico infecciosos), de acuerdo con la NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2002 (SEMARNAT y SSA, 2003) y la NOM-053-SEMARNAT-1993 (SEMARNAT, 2003)

con la finalidad de clasificarlos como se muestra en el Cuadro III y poder aprovecharlos sin poner en riesgo la salud o el medio ambiente.

Como todo residuo sólido, los lodos residuales una vez analizados, en caso de no cumplir con los parámetros establecidos por la NOM-004-SEMARNAT-2002 (SEMARNAT, 2002) o el análisis CRETIB, deben ser tratados como residuo peligroso y ser dispuestos en confinamientos o vertederos controlados y especificados para la depositación de este tipo de residuos, de acuerdo con la NOM-052-SEMARNAT-2005 (SEMARNAT, 2006).

Cuadro III. Clasificación de lodos y biosólidos para su aprovechamiento establecido en la NOM-004-SEMARNAT-2002 (SEMARNAT, 2002).

Tipo	Clasificación	Aprovechamiento
Excelente	A	<ul style="list-style-type: none"><li>• Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación.</li><li>• Los establecidos para clase B y C.</li></ul>
Excelente o bueno	B	<ul style="list-style-type: none"><li>• Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación.</li><li>• Los establecidos para clase C.</li></ul>
Excelente o bueno	C	<ul style="list-style-type: none"><li>• Usos forestales.</li><li>• Mejoramiento de suelos.</li><li>• Usos agrícolas.</li></ul>

Es importante mencionar que las clasificaciones para los lodos y biosólidos que ha adoptado no solo México, si no otros países, se basa en la clasificación emitida por la EPA (EPA, 2007), esto ha colaborado en la estandarización de los sistemas de análisis y en el aprovechamiento benéfico de los lodos y biosólidos, sin que se tengan para la salud humana.

En el caso de la normatividad mexicana no existe regulación sobre los tratamientos a los que se deben ser sometidos los lodos residuales con la finalidad de convertirlos en biosólidos, ni para su construcción y operación.

Por tanto, en el caso de la utilización de los biosólidos como materia prima para la generación de energía eléctrica, no existe una normatividad específica. La Comisión Federal de Electricidad (CFE), que regula la generación y distribución de la energía eléctrica en el país, permite generar energía eléctrica para consumo propio pero no para su posible distribución o venta, por lo que la energía excedente debe ser reincorporada a las líneas eléctricas propiedad de CFE, sin

beneficios adicionales por ingresos económicos para la institución o empresa generadora de energía eléctrica más que la del incentivo de disminuir los gastos energéticos por consumo u operación.

La legislación mexicana requiere incluir las regulaciones necesarias para exigir que todos los lodos residuales reciban un proceso de estabilización que permitan aprovecharlos en diferentes usos sin que presenten un riesgo para la salud.

Adicionalmente, México debe de implementar la normatividad para la construcción y operación de sistemas de digestión anaerobia, que permitan recuperar la energía, con la finalidad de disminuir los gastos energéticos y operativos de las PTAR y contribuir a la producción de energía renovable.

### **1.5 Calidad de lodos residuales y biosólidos en México.**

El estudio de Cardoso *et al.* (2000) indica que los biosólidos de las 8 PTAR estudiadas (capacidad de 9.33 m<sup>3</sup>/s) cumplen con la normatividad aplicable tanto para metales pesados (Tipo excelente), como para patógenos y parásitos (Clase B), por lo que se les puede aprovechar benéficamente. Es importante mencionar que 4 de estas plantas deshidratan sus lodos mediante filtros banda y solamente 2 utilizan un sistema de digestión anaerobia.

Adicionalmente, el estudio realizado por Castrejon *et al.* (2000) en 18 PTAR del país encontró que en las PTAR ubicadas en regiones con un desarrollo industrial importante los metales pesados Níquel y Mercurio excedieron los máximos permisibles establecidos por lo que en aquel momento era proyecto de la NOM-004-SEMARNAT-2002, por lo que tales lodos no pueden ser aprovechados.

En el mismo estudio se determinó la calidad en cuanto al contenido de patógenos y parásitos, el cual depende del sistema de tratamiento utilizado para la estabilización de los lodos. En el caso de la estabilización alcalina, se logró cumplir con lo requerido por la norma, sin embargo para los sistemas de digestión anaerobia y aerobia no, por lo que es importante que en estos sistemas de

digestión se tenga un mayor control de los procesos internos, así como en el proceso de tratamiento de las aguas residuales.

En el caso particular de una PTAR del Estado de México que cuenta con tratamiento primario avanzado de sus aguas residuales y un caudal promedio de 35 lps, los lodos crudos analizados rebasaron el contenido de patógenos y parásitos; esto indica que el tratamiento de las aguas residuales debe estar más controlado puesto que un sistema efectivo de tratamiento de agua puede disminuir las concentraciones de contaminantes para que los lodos o biosólidos puedan ser aprovechados benéficamente (Rendón, 2002).

Otros estudios más recientes como el de González *et al.* (2009) indican que los metales pesados contenidos en los biosólidos de la PTAR de la ciudad de Puebla estabilizados mediante digestión anaerobia cumplen con la normatividad, clasificándose como de Tipo Excelente.

Para el caso de Colombia, independientemente del tratamiento que reciben los biosólidos de las 4 PTAR mas importantes, cumplen con la normatividad correspondiente para metales pesados, patógenos y parásitos (Daguer, 2004). En Colombia estos biosólidos están siendo aprovechados como mejoradores de suelos y fertilizantes agrícolas.

## **1.6 La recuperación de energía por medio de digestión anaerobia.**

Uno de los métodos para lograr la estabilización de lodos residuales es la digestión anaerobia, la cual se realiza en ausencia de oxígeno y genera biogás (gas compuesto principalmente por metano, bióxido de carbono y nitrógeno), el cual puede ser utilizado como combustible para la producción de energía eléctrica (Rulkens, 2007; Malik, 2009).

A su vez, los sistemas de digestión anaerobia son eficientes para la reducción de volumen de los lodos residuales y la carga orgánica que contienen. Sin embargo, como se muestra en la Cuadro IV, existen inconvenientes que hay que considerar para eficientizar el sistema y lograr el aprovechamiento óptimo del biogás producido.

Cuadro IV. Ventajas y desventajas de los sistemas de digestión anaerobia para la recuperación energética (información extraída de Mahamud, 1996; Jiménez y Wang, 2006).

Ventajas	Desventajas
Reducción de 40-60% de sólidos volátiles.	Inversión inicial importante.
Bajos costos de operación por recuperación del biogás y de la energía térmica generada.	Posibles depósitos minerales en el digestor, se requiere un buen programa de mantenimiento.
Rentable económicamente para plantas que tratan arriba de 7,500 m <sup>3</sup> /d.	Posible producción de olores, si no se regula el proceso interno.
Reducción del número de microorganismos patógenos.	Peligrosidad de los gases inflamables generados (biogás).
Lodos Clase B, pudiéndose aplicar como fertilizante agrícola y mejorador de suelos.	Se puede presentar problemas de “digestión ácida” por lo que es importante controlar el pH de los lodos en digestión.
Reducción del volumen de lodos.	Requiere de operadores capacitados.
Eliminación eficiente de contaminantes, presentes en los lodos residuales.	Requerimientos energéticos para mezclar y calentar los lodos residuales.

También es posible generar energía eléctrica por medio de la implementación de digestión anaerobia como parte del tratamiento secundario utilizado en las PTAR, como es el caso de la PTAR de León, Guanajuato que inició operaciones en mayo de 2011 (SEIA, 2013). Esta PTAR cuenta con un sistema de cogeneración para la producción de energía y la utilización del calor producido durante la digestión. La energía producida es suficiente para satisfacer el 75% de la demanda energética la PTAR para operar. La inversión realizada se pretende recuperar en los próximos 10 años.

### 1.7 Digestores anaerobios para el tratamiento de lodos residuales.

Los digestores anaerobios se pueden dividir en digestores de primera generación, de segunda generación y de tercera generación.

Los de 1<sup>a</sup> generación son los que más comúnmente se utilizan, por sus bajos costos de inversión y operación e incluyen: laguna anaeróbica (similares a los tanques sépticos abiertos) (Figura 2a), tanques sépticos (contenedor herméticamente cerrado donde se depositan las aguas residuales) (Figura 2b), modelo Hindú (consiste en una fosa con un tanque enterrado, es de flujo sémi-continuo, el gas se extrae por la cúpula) (Figura 2c), modelo Chino (consiste en un tanque redondo y achatado con el techo y el piso en forma de domo, se

encuentran enterrados y cuentan con un gasómetro fijo) (Figura 2d), de mezcla completa sin recirculación (tanque que se encuentra en el exterior y es depositado el lodo por lotes) (Figura 2e), y de mezcla completa con recirculación (tanque que se encuentra en el exterior, se mantiene una agitación constante de los lodos) (Figura 2f), (Deublein y Steinhauser, 2011; Nakasima, 2011).

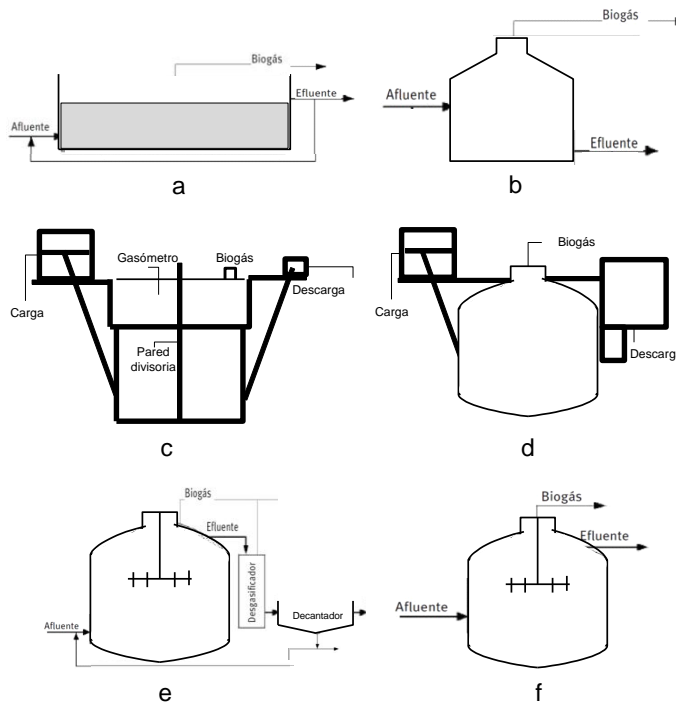


Figura 2. Digestores anaerobios de primera generación: (a) laguna anaerobia, (b) tanques sépticos, (c) modelo hindú, (d) modelo chino, (e) de mezcla completa sin recirculación y (f) de mezcla completa con recirculación (elaboración propia, información extraída de (Dohányos 2001, Deublein y Steinhauser, 2011; Nakasima, 2011).

Los digestores anaerobios de 2ª generación son: filtro anaerobio (consiste en un reactor con lecho poroso donde las bacterias anaerobias se pueden adherir), manto de lodo granular (reactor que opera con régimen continuo y flujo ascendente, contiene estratos de gránulos) (Figura 3a), de circulación interna (tanques que operan en dos etapas de donde se obtiene el biogás para cada una de las etapas) (Figura 3b), híbrido (consiste en un manto de barro que mantiene los lodos en la parte inferior) (Figura 3c), flujo de pistón horizontal (tanque reactor en posición horizontal construido en concreto), y geomembrana (tanque con forma alargada, los lodos y el agua para la mezcla circulan como flujo de pistón, los

lodos entran por un extremo y salen digeridos por el otro) (Figura 3d y 3e), (Deublein y Steinhauser, 2011; Nakasima, 2011).

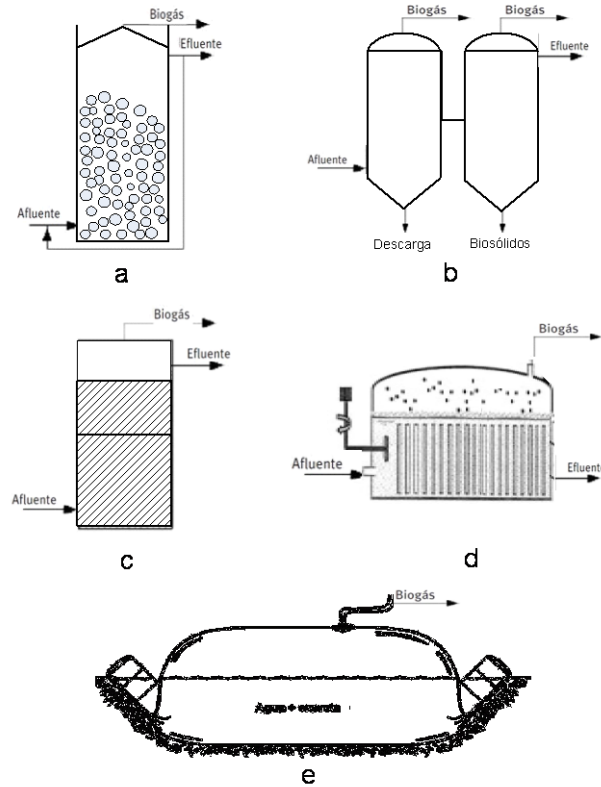


Figura 3. Digestores anaerobios de segunda generación: (a) manto lodo granular, (b) de circulación interna, (c) híbrido, (d) flujo de pistón horizontal y (e) de geomembrana (elaboración propia, información extraída de (Deublein y Steinhauser, 2011; Nakasima, 2011).

Por último se encuentran los digestores anaerobios de 3<sup>a</sup> generación los cuales se clasifican en: de lecho fluidizado (los microorganismos se encuentran suspendidos, cuenta con recirculación y cuenta con un sedimentador en la parte superior que evita la salida de lodos y bacterias) (Figura 4a) y de manto de lodo granular expandido (es de recirculación y extiende el lecho de los lodos para mejorar la actividad de las bacterias anaeróbicas) (Figura 4b) (Nakasima, 2011; Deublein y Steinhauser, 2011).

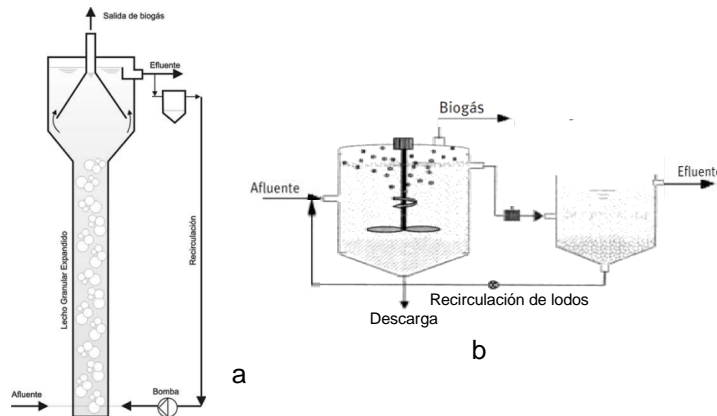


Figura 4. Digestores anaerobios de tercera generación: (a) lecho fluidizado y (b) manto de lodo granular expandido (adaptado de Deublein y Steinhauser, 2011; Nakasima, 2011).

Independientemente del distinto funcionamiento de los digestores anaerobios, existen configuraciones (construcción de los reactores de biodigestión) que afecta los parámetros y la forma de operación. Tradicionalmente los digestores anaeróbicos en Estados Unidos y Canadá han sido de forma cilíndrica y están contruidos con concreto, la dimensión del cilindro dificulta el mezclado y la distribución uniforme del calor (Figura 5a). La construcción típica está basada en un cilindro inferior y un cilindro con terminación cónica en la parte superior que generalmente es móvil (también llamados reactores de campana flotante).

Por su parte, los digestores europeos son tanques totalmente cerrados con base cilíndrica y la parte superior termina en forma de botella (similar a los tanques para acumular agua en las casas). Las ventajas de este tipo de digestor es que es más económico y la distribución del calor es uniforme (Figura 5b).

El digestor en forma de “huevo” es una versión mejorada del digestor europeo, está construido en concreto mejorado tecnológicamente (Figura 5c), y ofrece un funcionamiento en condiciones óptimas, puesto que permite la distribución uniforme de calor, disminuye la acumulación de lodos no digeridos y eficientiza la extracción de los biosólidos (Deublein y Steinhauser, 2011).

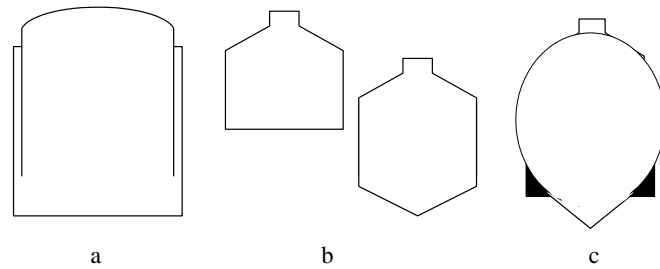
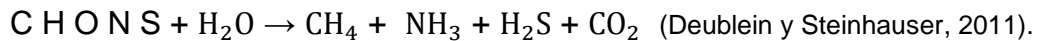


Figura 5. Tipos de configuraciones de digestores anaerobios (a) tipo norteamericano, (b) tipo europeo y (c) tipo huevo (elaboración propia, información extraída de Deublein y Steinhauser, 2011).

### 1.8 Proceso de Digestión Anaeróbica.

La digestión anaeróbica está caracterizada por contar con diferentes fases durante su proceso de degradación de los lodos residuales, las cuáles son: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Nakasima, 2011). La ecuación general que define el proceso de biodegradación de los lodos es:



En la fase de hidrólisis los microorganismos anaerobios usan el oxígeno disuelto en el agua que tienen los lodos residuales e inducen las óxido reducciones con la finalidad de activar el potencial de alimentación y reducción de la materia orgánica presente (Figura 6) (Akerlund, 2008; Deublein y Steinhauser, 2011).

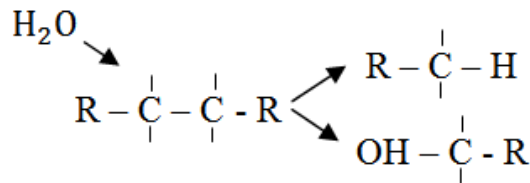


Figura 6. Reacción química en la fase de hidrólisis (información extraída de Deublein y Steinhauser, 2011).

En la etapa de acidogénesis los microorganismos anaerobios consumen las moléculas formadas en la fase de hidrólisis para degradarlas en ácidos, óxido nítrico, alcoholes, hidrógeno y dióxido de carbono, facilitando su fermentación (Figura 7) (Akerlund, 2008; Deublein y Steinhauser, 2011).

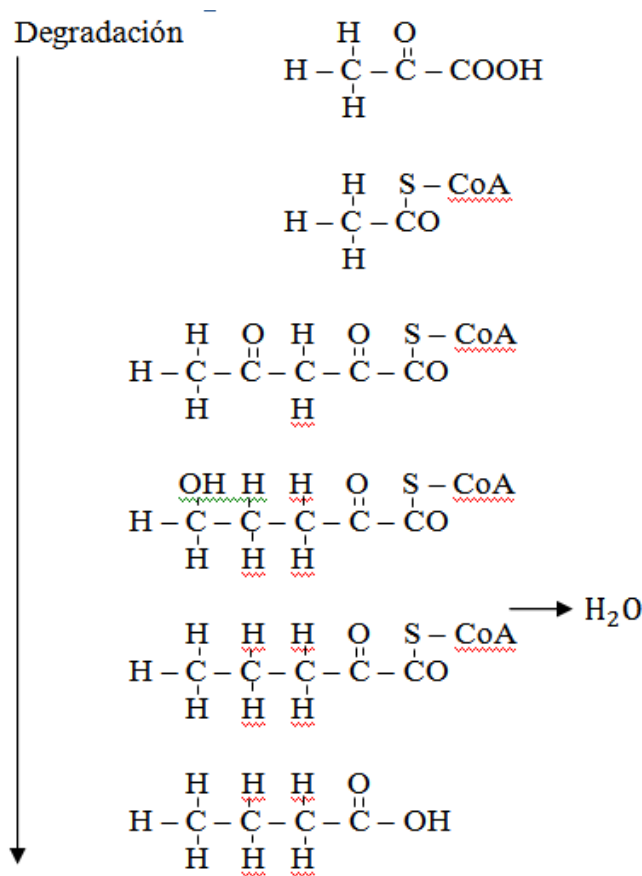


Figura 7. Reacciones químicas de la fase de acidogénesis (información extraída de Deublein y Steinhauser, 2011).

La acetogénesis es la etapa en la que los microorganismos y bacterias consumen el hidrógeno y el dióxido de carbono producido en la etapa anterior formando metano y reduciendo el sulfuro y nitrógeno produciendo amonio y sulfuro de hidrógeno. Se considera que en esta fase es donde radica el potencial de generación de biogás (Akerlund, 2008; Deublein y Steinhauser, 2011).

Por último se encuentra la fase metanogénica donde la formación total de metano toma lugar en condiciones estrictamente anaeróbicas (Figura 8) (Akerlund, 2008; Deublein y Steinhauser, 2011).

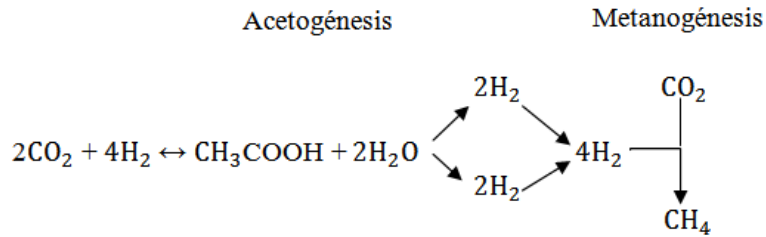


Figura 8. Reacciones químicas de la fase de acetogénica y metanogénica (información extraída de Deublein y Steinhauser 2011).

Estas cuatro fases se presentan en toda digestión anaeróbica la cual se puede realizar mediante dos procesos: mesofílico y termofílico. El proceso mesofílico se lleva a cabo a temperaturas entre los 25-37°C y se puede manejar mediante digestión anaerobia de una etapa (solamente con un digestor) o de dos etapas (dos digestores uno para la etapa de acidogénesis y otro para la etapa de metanogénesis), ya sean de flujo continuo o por lote. Los biosólidos que se obtienen como resultado del proceso mesofílico con un tiempo de retención de 15 días a una temperatura entre 35-45°C o 60 días a 20°C, son de Clase B según la NOM-004-SEMARNAT-2002 (SEMARNAT, 2002), debido a que la remoción de patógenos y coliformes fecales es baja (Rubia, 2002; Jiménez y Wang, 2006).

El proceso termofílico se realiza a temperaturas entre los 38-65°C con un tiempo de retención de 20-22 días, ya que la temperatura acelera las reacciones bioquímicas y permite que la digestión se realice en menor tiempo, utilizando digestores de menor tamaño y se obtienen biosólidos Clase A (Cisneros, 2005; Jiménez y Wang, 2006). El problema que se presenta con este tipo de proceso es que requiere de mayor energía para mantener la temperatura, desprende olores, es inestable y el tiempo para su estabilización al inicio de la operación puede llegar a ser de varios meses (Rubia, 2002).

Cualquiera de los dos procesos anaerobios genera biogás en menor o mayor cantidad, y su producción dependerá de las condiciones y parámetros de operación del digestor anaerobio que se muestran en el Cuadro V. Tales parámetros deben ser controlados para garantizar no sólo la producción de biogás, sino la estabilidad del digestor y la calidad de los biosólidos que se obtengan como resultado.

Cuadro V. Condiciones y parámetros de operación del digestor anaerobio (información extraída de WEF & ASCE, 1998; Rubia, 2002; Arthur, 2010; Nakasima, 2011).

Condición.	Parámetro.
pH neutro	6.8-7.2
Temperatura mesofílica	25-35°C
Temperatura termofílica	37-65°C
Tiempo de retención (TRH)	15-27 días
Sólidos Volátiles (SV)	7-12%
Relación C/N*	20:1-30:1

\*Relación carbono-nitrógeno en la mezcla de lodos en digestión.

El tiempo de retención de los lodos residuales en el digestor es importante, ya que mientras mayor sea este, mayor será el porcentaje de recuperación del biogás. De esta manera se tiene que, para un tiempo de retención de 15-25 días se obtiene el 75-80% de recuperación, mientras que de 30-60 días se logra un 95-100% de recuperación del potencial de generación de biogás para la cantidad de lodos digerida (Deublein y Steinhauser, 2011; Arthur, 2010).

De acuerdo con el trabajo de Agler *et al.* (2010) el tiempo de retención óptimo para lograr una producción de biogás constante es entre 12-32 días con una temperatura máxima de 42°C y mínima de 22°C. En el caso de que el sistema de digestión anaerobia sea de flujo continuo (alimentación diaria de lodos residuales) el biogás producido tendrá menor cantidad de CH<sub>4</sub>. Si la operación del sistema de digestión anaerobia es tipo “batch” o por lote (alimentación de una sola vez de lodos residuales) el contenido de CH<sub>4</sub> en el biogás puede aumentar.

En los dos sistemas (flujo continuo y por lote) las características de los biosólidos obtenidos es la misma, el tiempo de retención y la temperatura son igualmente importantes para la producción de biogás. Sin embargo, el sistema de digestión por lote es más estable y tiene un mayor rendimiento debido a que la agitación de los lodos es intermitente (Agler, 2010), por lo que se logra una mayor degradación.

El tiempo de retención mínimo para que se obtenga biogás es de 20 días a una temperatura interna de 37.5°C y el máximo potencial de generación de biogás

se logra a los 40 días a la misma temperatura (Duque, 2006). Por ello, el tiempo de retención para extraer el máximo biogás de la fermentación de lodos es de 40 días. Para las PTAR esto puede representar un problema, ya que la cantidad de lodos generados es usualmente alta y continua, y no se pueden tener los lodos almacenados más de 20 días (Akerlund, 2008); un almacenamiento mayor implicaría un aumento en el tamaño de los digestores, del sistema y, por lo tanto, una inversión mayor.

En el caso del biogás obtenido a partir de la digestión anaeróbica de lodos residuales el contenido de  $\text{CH}_4$  es del 60% al 70% (Cisneros, 2005; Duque, 2006; Arthur, 2010; Gilroyed, 2010) cantidad que se verá afectada por las condiciones y parámetros mencionados en el Cuadro V.

El biogás es un gas biocombustible, limpio y barato, por lo que puede utilizarse como fuente para la generación de energía eléctrica (Malik, 2009). De acuerdo con el reporte técnico de Infantes (2007) el potencial de generación de biogás es de  $0.31 \text{ m}^3$  por kilogramo de lodos residuales, por lo que  $1 \text{ m}^3$  de biogás tiene el potencial de generación de 5.5-6 kilowatt hora (Kwh) (Guardado, 2006); el potencial de generación de energía eléctrica dependerá del porcentaje de gas metano que contenga el biogás (Infantes, 2007).

Otros estudios sobre la producción de biogás como el de Arthur (2010) indican que la producción de biogás varía de acuerdo con el tiempo de retención y la temperatura de digestión. Esta relación para 31 días de retención va desde  $0.10 \text{ m}^3/\text{kg}$  hasta  $0.30 \text{ m}^3/\text{kg}$ . Adicionalmente otras fuentes de información (WEF&ASCE, 1998; IDAE, 2007; Álvarez, 2010) indican que los parámetros internos de control del proceso de digestión son indispensables para lograr la eficiencia de producción de biogás y que con una temperatura de  $37.5^\circ\text{C}$  y un tiempo de retención de 30 días se logra obtener desde  $0.29$  hasta  $0.35 \text{ m}^3/\text{kg}$ .

Para aprovechar mejor el biogás como fuente para la producción de energía eléctrica, es necesario limpiar el biogás, quitando principalmente el contenido de  $\text{CO}_2$  y de  $\text{H}_2\text{S}$ , con la finalidad de obtener  $\text{CH}_4$  casi puro y aumentar la eficiencia energética. El potencial de generación de  $1 \text{ m}^3$  de  $\text{CH}_4$  es de 9.8-10.4 Kwh (Cuadro VI).

De acuerdo con la información anterior, el empleo de biogás libre de impurezas tendría el potencial de producir suficiente energía para abastecer los requerimientos del propio sistema de digestión anaerobio y los requerimientos energéticos de una PTAR con capacidad de 500 litros por segundo y un gasto energético anual promedio de 350,000 kwh.

Cuadro VI. Potencial de generación de energía eléctrica el biogás y del metano (información extraída de Guardado 2006, Infantes 2007, Arthur 2010).

Gases.	Valor térmico (MJ/m <sup>3</sup> ).	Potencial energético (Kwh/m <sup>3</sup> ).
Biogás	21.5	5.5-6*
Metano	37.78	9.8-10.4*

\*Factor de conversión 1Kwh=3.6MJ

En el Cuadro VII se presentan los cálculos para la producción de energía eléctrica de acuerdo con los diferentes procesos mediante los cuales se puede llevar a cabo la digestión anaerobia, considerando el tiempo de retención como características principal para la obtención de biogás/metano.

Cuadro VII. Procesos de digestión anaerobia y su eficiencia para la producción de biogás y potencial de generación de energía eléctrica (información extraída de Rubia, 2002; Jiménez y Wang, 2006; Rizzardini, 2009; Arthur, 2010).

Proceso	Temperatura (°C)	Tiempo de retención (días)	Biogás por m <sup>3</sup> de lodos (m <sup>3</sup> )	Metano por m <sup>3</sup> de biogás (%)	Energía producida biogás (kwh)	Energía producida metano (kwh)	Energía generada para una PTAR de 500 lps (kwh)
Mesofílico	25-37	15-25	0.31	60-65	5.5-6	9.8-10.4	335,430
Termofílico	38-65	20-30	0.36	65-70	5.5-6	9.8-10.4	400,838

### 1.9 Diseño de Tanques Digestores Anaerobios.

Como se ha señalado, el incorporar un sistema de digestión anaerobia para tratar los lodos residuales generados por las PTAR permite disminuir su volumen, capturar el biogás para producir energía eléctrica y degradar la materia orgánica y otros contaminantes presentes. Los biosólidos resultantes pueden ser

aprovechados como fertilizantes agrícolas, restauradores de suelos elaboración de composta y como aditamento para materiales de la construcción.

El diseño de los reactores o digestores anaerobios dependen del tiempo requerido para que los lodos residuales sometidos a digestión se estabilicen, reduzcan su volumen y generen el máximo potencial de biogás. Por ello es necesario considerar el tiempo de retención suficiente como parte del diseño de los tanques reactores y controlar las condiciones y parámetros (presentados en el Cuadro V) que intervienen durante su operación (Deublein y Steinhauer, 2011).

En el caso del diseño de digestores anaerobios con flujo continuo o semi-continuo se requiere determinar la tasa de carga de lodos residuales ( $B_v$ ), el tiempo de retención deseado TR (días) para alcanzar la producción máxima de biogás (los datos se presentan en el Cuadro VII), la cantidad de diaria de lodos que se desean digerir Q ( $m^3/d$ ), la concentración de sólidos volátiles por metro cúbico de lodos  $C_0$  ( $kg/m^3$ ) y V el volumen del tanque reactor ( $m^3$ ).

$$B_v = \frac{QC_0}{V} = \frac{C_0}{TR}$$

\*Deublein y Steinhauer, 2011

Para determinar el volumen:

$$V_D = C_f (\text{l/día}) \times TR (\text{días})$$

\*Solari, 2004b

Donde  $V_D$  es el volumen del digestor ( $m^3$ ),  $C_f$  la cantidad diaria de lodos residuales y TR el tiempo de retención deseado.

Para el diseño de digestores anaerobios tipo “batch” o por lote, la consideración que se tiene que tomar es que el volumen total del digestor debe ser suficiente para contener la cantidad de lodos residuales que se requiera fermentar y considerar que el 25% del volumen debe ser ocupado por los lodos residuales y dejar un 75% de espacio para albergar el biogás producido (Duque, 2006).

Para el diseño de digestores anaerobios ya sean de flujo continuo o por lote, debe considerarse que para obtener la cantidad de biogás máxima producida la mezcla del sustrato debe de tener entre un 11-13% de fase sólida, el resto debe ser fase líquida y considerar que el factor de producción de biogás para un tiempo

de retención de 25 días es de 1.35 (Q/V) y depende del volumen del digester en  $m^3$  (V), el volumen de biogás producido por día esta expresado de la siguiente manera:

$$V_B = Q/V \times V$$

\*Duque, 2006

El depósito de almacenamiento del gas debe de estar dimensionado de tal manera que pueda dar cabida al gas generado diariamente. Para los sistemas de digestión anaerobia la relación digester/depósito de gas suele ser de 1:1 hasta 3:1; sin embargo, la relación puede ser mayor en función de la capacidad de producción de biogás (Solari, 2004b).

### **1.10 Sistema para generación de energía eléctrica.**

Un sistema de digestión anaerobia puede ser de una etapa o de dos etapas. Los sistemas más convencionales para la digestión de lodos residuales son los de dos etapas debido a que en el primer tanque los lodos residuales permanecen menor tiempo durante la fase de hidrólisis y acidogénesis, y un segundo tanque para las fases de acetogénesis y metanogénesis (WEF & ASCE, 1998).

Posterior a la fase de digestión es necesario colocar filtros de  $CO_2$  y de  $H_2S$  y eliminar el vapor de agua, con la finalidad de purificar el biogás para aumentar la obtención del porcentaje total de  $CH_4$ , con la finalidad de potencializar la producción de energía eléctrica y de que los equipos donde se lleve a cabo la combustión del gas y la generación de energía eléctrica tengan mayor tiempo de vida. Además, el  $CO_2$  inhibe la combustión, por lo que disminuye en un 50% la capacidad del motor donde esta se realice. Por su parte, el  $H_2S$  es sumamente corrosivo por lo que al no extraerlo del biogás e introducirlo en el motor de combustión el tiempo promedio de vida del equipo es de 4 meses a 1 año, dependiendo de la cantidad de  $H_2S$  que contenga el biogás (Coelho, 2004; Coelho, 2006a; Coelho, 2006b).

Existen diversas tecnologías para la depuración del biogás pero el más utilizado es la del carbón activado, ya que es sencillo de utilizar y eficiente en su tasa de remoción (Relea, 2009).

Una vez que el biogás es depurado se inyecta en un moto generador, en turbinas de gas o micro turbinas (para cualquiera de estos equipos la eficiencia de producción de energía eléctrica varía del 20-40% de eficiencia), pudiéndose aumentar la eficiencia si se utilizan sistemas de cogeneración donde se combine la producción de calor y electricidad (Coelho, 2006a).

Para determinar el equipo adecuado a utilizar, es necesario calcular el potencial de generación eléctrica mediante la siguiente fórmula (Coelho, 2006b):

$$\eta = \frac{W}{Mb \times LHV}$$

\*Coelho, 2006b.

Donde W es la potencia estimada del equipo, Mb el consumo de biogás o de metano (según este operando el sistema) del equipo, y LHV el poder calórico del biogás o del metano (ver Cuadro VI).

Un sistema de digestión anaerobia con recuperación de biogás para generación de energía eléctrica está constituido por las siguientes partes (Solari, 2004b):

- Tanque recolector: se mezcla el material de fermentación con agua, para obtener la proporción de mezcla deseada.
- Reactor (digestor): las bacterias, al consumir la materia orgánica presente, producen biogás.
- Depósito de gas: se acumula el biogás o el CH<sub>4</sub>.
- Tanque receptor: depósito para el lodo residual ya fermentado (biosólidos) que es desplazado por el biogás.
- Filtros de CO<sub>2</sub> y de H<sub>2</sub>S: localizados hacia el sitio de consumo o depósito de biogás.
- Moto generador (motor que funciona con CH<sub>4</sub> y que hace girar un generador transformando la energía mecánica del motor en energía eléctrica).
- Tablero de fuerza y control.
- Tablero de distribución.

Además de la obtención de un recurso energético renovable, los beneficios de una planta de biogás son (Deublein y Steinhäuser, 2011):

- La energía producida por el biogás y/o el metano puede ser utilizada para abastecer de energía a la planta y a la comunidad que vive a su alrededor, ya que en muchos países es permitido este tipo de distribución de energía eléctrica.
- Se disminuyen los costos de operación por manejo y disposición de lodos residuales en las PTAR.
- El biogás puede ser utilizado para su venta en tanques para su uso en estufas y calentadores domésticos de poblaciones rurales.
- Contribución a la reducción de emisión de GEI.
- Reducción de efectos nocivos a la salud de los habitantes de la zona donde se ubica la PTAR.

De acuerdo con el Instituto de Investigaciones Eléctricas, en México existe un potencial de generación de energía eléctrica de 3,000 MW proveniente de la utilización de biogás y de metano obtenido a partir de la digestión de residuos animales, residuos sólidos urbanos y tratamiento de aguas residuales mediante la captura de los gases generados durante el sistema de tratamiento y de los lodos residuales resultantes (IMTA, 2012).

### **1.11 Simulación dinámica de sistemas.**

La simulación dinámica de sistemas permite visualizar su arquitectura, las interacciones que existen entre sus elementos y su operatividad; esto facilita la toma de decisiones, cuando se tienen diferentes escenarios y existe la duda sobre la funcionalidad de cada uno de ellos (Santopetro, 2009).

La simulación dinámica en específico con la utilización del software STELLA (de ISEE Systems) se ha utilizado para evaluar sistemas y proyectos de distinta naturaleza como: sistemas biológicos, migración poblacional, cambio climático, sistemas de disposición de residuos de la construcción y valoración de tecnologías para la generación de energía, entre otros (Hao, 2007; Johnson, 2010; Izquierdo, 2011; Neve, 2011; Rader, 2011; Alotto, 2013).

El empleo de simulaciones dinámicas de sistemas permite comparar la factibilidad de dos o más escenarios y seleccionar el que represente la mejor opción tanto de eficiencia operativa, como de costos o de interacción con diferentes componentes o subsistemas.

### **1.12 Impacto ambiental generado por los lodos residuales.**

La descomposición de los lodos residuales depositados como relleno en tierra a cielo abierto genera bióxido de carbono y metano (Beecher, 2008) considerados como los principales gases de efecto invernadero (GEI). Adicionalmente, otro efecto de contaminación por mal manejo de lodos residuales es la generación de olores (EPA, 2000), riesgos ambientales y posibles riesgos a la salud al ser utilizados como fertilizantes agrícolas. Paradójicamente, al ser más estrictos los controles de tratamiento de aguas residuales, es mayor la cantidad de contaminantes que se encuentran en los lodos residuales (Núñez, 2002). Por ello, como parte del tratamiento de las aguas residuales se tiene que considerar el tratamiento de sus lodos para que de esta forma se reduzca la contaminación ambiental que pudieran generar y se incremente su calidad con la finalidad de poder ser aprovechados de manera benéfica.

La composición de los gases emitidos por la descomposición de los lodos residuales llamado biogás está compuesto de 40%-75%  $\text{CH}_4$ , 25%-40%  $\text{CO}_2$  y en menor cantidad otros gases como  $\text{H}_2\text{S}$ , N, O, H, CO y vapor de agua como se puede observar en el Cuadro VIII (Dohányos, 2001; Deublein y Steinhauser, 2011).

El gas metano es 23 veces más eficaz para capturar el calor de la atmósfera en comparación con el dióxido de carbono. Sin embargo, el aprovechamiento del primero permite disminuir en menor tiempo el impacto ambiental pues su vida atmosférica es de solamente 12 años (Cuadro IX) por lo que su aprovechamiento para producir energía es el medio más efectivo para disminuir el calentamiento global a corto plazo, además de poder ser utilizado como fuente de energía renovable (biocombustible) (EPA & Methane to Markets, 2008).

Cuadro VIII. Gases más importantes en la composición del biogás (información extraída de Dohányos, 2001; Arthur, 2010; Deublein y Steihauser, 2011).

Gases.	Porcentaje (%)
CH <sub>4</sub>	40-75
CO <sub>2</sub>	25-40
H <sub>2</sub> S	0.1-0.5
H	1-3
N	0.5-2.5

De acuerdo con la EPA y la asociación Methane to Markets, en 2005 las emisiones mundiales de gas metano (CH<sub>4</sub>) fueron equivalentes a 6,407 millones de toneladas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) de las cuales el 60% provienen de fuentes antropogénicas siendo los países más contaminantes Estados Unidos, China, Unión Europea, Rusia, India, Brasil, México, Ucrania e Indonesia, responsables de casi la mitad de todas las emisiones antropogénicas mundiales de metano.

Así pues, la reducción de emisiones de metano tiene beneficios energéticos, ambientales y económicos, puesto que constituye una fuente de combustible renovable para la recuperación energética, mejorando la calidad ambiental de las comunidades locales cercanas a las PTAR (EPA & Methane to Markets, 2008).

Cuadro IX. Gases de efecto invernadero (GEI) y su potencial de calentamiento (información extraída de INE, 2006; EPA & Methane to Markets, 2008).

Gas de efecto invernadero	Potencial de calentamiento (CO <sub>2</sub> -eq)*	Años de vida en la atmósfera (años)
CO <sub>2</sub>	1	200 a 450
CH <sub>4</sub>	23	12 a 15

\*Unidad de medición utilizada para indicar el potencial de calentamiento global de los GEI en comparación con el CO<sub>2</sub>.

### **1.13 Emisión de GEI por lodos residuales en México.**

Las actividades relacionadas con las aguas residuales generan a nivel mundial el 9% del gas metano emitido a la atmósfera. Se estima que México emitió 4,637 millones de toneladas de CH<sub>4</sub> en 2006 de las cuales el 13.5% se debió a las actividades relacionadas con aguas residuales municipales (Arvizu, 2008), dando como resultado que el promedio de emisión para el país fuese de 1.767 kg de CH<sub>4</sub> por habitante por año (Mantilla, 2008). Por su parte, de acuerdo con el Protocolo de Kyoto (2005) las emisiones de CO<sub>2</sub> en México fueron 4,032 millones de toneladas, del cual el 6.8% es por actividades relacionadas con el tratamiento de aguas residuales (INE, 2006).

Las emisiones de metano se han incrementado en una tasa promedio anual del 2%. De 1990 a 2006 se incrementó en un 56% el tratamiento de aguas residuales municipales (Arvizu, 2008) lo que produjo un aumento del 215.5% en las cantidades de lodos residuales generados. Dicho aumento se debió al volumen de aguas residuales tratadas en nuestro país y a las nuevas políticas públicas establecidas con la finalidad de remover eficientemente la materia orgánica y contaminantes presentes en el agua (INE, 2006). Sin embargo, aún no se ha considerado incluir en las PTAR sistemas de digestión anaerobia que permitan la recuperación del gas metano para su aprovechamiento como biocombustible, ya sea para uso doméstico o como fuente para la producción de energía eléctrica.

En total, los tratamientos de digestión anaerobia, aerobia, composteo y depositación de lodos residuales como relleno en tierra a cielo abierto, contribuyeron con el 10.5% de los GEI generados en el país en 2007 (Mantilla, 2008).

En este sentido, México tiene la oportunidad de adoptar y generar tecnología para el aprovechamiento de lodos residuales y su recuperación energética disminuyendo la cantidad de GEI emitidos a la atmósfera y producir energía eléctrica renovable.

### **1.14 Utilización de ACV para determinar el impacto ambiental de sistemas.**

La metodología de análisis de ciclo de vida (ACV) es una herramienta que permite evaluar el impacto ambiental generado por uno o más sistemas, con la finalidad de conocer cuál es el que contribuye en menor escala al deterioro del medio ambiente (Hoof, 2008). La metodología de ACV analiza cualquier tipo de sistema desde la “cuna a la tumba”, es decir, desde que inicia el sistema hasta los residuos que genera, y como es que estos se disponen.

Como la realización de ACV permite conocer los impactos potenciales de distintos sistemas, permite realizar la toma de decisiones sobre el equipo idóneo a instalar con la finalidad de que durante su operación genere el menor impacto posible (Perilhon, 2012).

Adicionalmente este tipo de análisis permite valorar ambientalmente diferentes propuestas de proyectos, con la finalidad de elegir el mejor o de rediseñar el proyecto con la finalidad de que no solo impacte negativamente al ambiente durante la fase de construcción, sino también durante su operación (Machado, 2007).

El ACV se ha utilizado para la evaluación de diferentes tratamientos y disposición final de lodos residuales, como es el caso del estudio en China, donde se estudio el impacto ambiental de la digestión anaerobia mesofílica y su uso para la agricultura y como materia prima para la producción de cemento, dando como resultado que los sistemas de digestión anaerobia disminuyen la emisión de GEI y el consumo energético asociado a su manejo; también su utilización en la agricultura y como materia prima para fabricación de cemento, pues el biosólido resultante es rico en nutrientes y bajo en concentraciones de metales pesados, patógenos y parásitos (Murray, 2008).

Otros ACV realizados por Peters (2002, 2003 y 2009) para valorar la carga ambiental del tratamiento de biosólidos indican que la digestión anaerobia tiene un menor impacto, pues se puede aprovechar el biogás generado para la generación de energía eléctrica.

El ACV también ha permitido valorar el potencial de generación de energía eléctrica a través de la utilización del metano como biocombustible en diferentes

partes del mundo, pues incrementa la eficiencia de recuperación energética, pues tan solo su utilización en Europa equivaldría a 9 megatoneladas de petróleo (Tilche, 2008).

### **1.15 Percepción social y riesgos a la salud.**

Como ya se mencionó con anterioridad, los lodos resultantes del tratamiento de aguas residuales contienen materia orgánica, metales pesados, compuestos orgánicos tóxicos, aceites, emulsiones, productos químicos y contaminantes emergentes como productos de limpieza, productos de cuidado personal y medicamentos en diferentes cantidades (Misra, 2005). Dependiendo del tratamiento que reciban los lodos residuales será su capacidad de generar afectaciones a la salud humana. De acuerdo con Cardoso *et al.* (2000) los lodos que reciben un tratamiento mediante la digestión anaerobia son biosólidos de buena calidad, con concentraciones reducidas de materia orgánica, metales pesados y materia inorgánica, por lo que se reducen los riesgos a la salud.

La aceptación social para el aprovechamiento de los lodos residuales es importante, debido a que de esto depende su aceptación para ser reusado. De acuerdo con un estudio de percepción realizado en Estados Unidos en 2002 (Beecher, 2005) se detectó que la gente no tiene conocimiento sobre la existencia de los lodos residuales y desconocen que estos lodos al ser estabilizados y convertirse en biosólidos pueden ser reutilizados.. En este mismo estudio la gente indica que necesita informarse e investigar sobre los biosólidos y sus diferentes aprovechamientos, así como sus ventajas y desventajas con la finalidad de poder emitir una opinión sobre su aceptación a ser reutilizados.

En promedio el 71% de los lodos residuales generados en países desarrollados recibe un tratamiento de estabilización, sin embargo el 30% de estos biosólidos son depositados en vertederos o en rellenos a cielo abierto, lo que implica que, según Renner (2002), los residentes dentro de aproximadamente 1 kilómetro a la redonda de las PTAR (zona de influencia) y de donde se depositan lodos residuales o biosólidos, se quejan de erupciones en la piel, irritación en los ojos y garganta, y problemas pulmonares. También se encontró que los

pobladores cercanos a las PTAR y vertederos de lodos/biosólidos son 25 veces más propensos a padecer enfermedades ocasionadas por microorganismos, dando lugar a padecimientos que van desde infecciones en la piel leves, dermatitis aguda, asma e infecciones gastrointestinales.

Un estudio realizado en 2005 en la PTAR del Norte de Cd. Juárez, Chihuahua indicó la preocupación de los habitantes de la zona de influencia sobre su salud, ya que han experimentado enfermedades crónicas tales como: alergias, problemas de las vías respiratorias, falta de aliento, asma, dolores de cabeza y dificultad para concentrarse; además de la preocupación del deterioro de calidad de vida y de la reducción en el valor de sus propiedades (ATSDR, 2005).

No solamente los residentes de las zonas aledañas a las PTAR y vertederos de lodos residuales/biosólidos tienen afectaciones a la salud, también los trabajadores de las mismas, ya que están expuestos directamente a compuestos orgánicos, metales pesados, compuestos inorgánicos y gases tales como dióxido de carbono, metano, y dióxido de azufre. Los trabajadores no solamente pueden sufrir las afectaciones a la salud antes mencionadas, sino que el 38.4% de los trabajadores de los rellenos en tierra a cielo abierto de lodos residuales/biosólidos tienen una percepción del gusto y olor alterada (Dzaman, 2009).

En el caso de los olores emitidos por las PTAR y los vertederos de lodos residuales y biosólidos, estos pueden disminuirse si los lodos residuales son digeridos de manera anaerobia y se incorpora hierro a la mezcla de digestión. El hierro, al adherirse a las proteínas presentes en los lodos, genera reacciones químicas internas que disminuyen la cantidad de compuestos orgánicos volátiles de azufre causantes del mal olor (Zeynep, 2008).

Aunque los efectos nocivos a la salud de los residentes puede verse disminuido por la incorporación de sistemas de digestión anaerobia que estabilice los lodos residuales y los aproveche para la producción de energía, es importante que los residentes de las zonas donde se encuentran ubicadas las PTAR acepten que un riesgo seguirá existiendo, pues las instalaciones de los sistemas de

digestión anaerobia conlleva la producción y concentración de gases que pueden ser explosivos.

La percepción social sobre el riesgo a vivir cerca de una fuente generadora de energía radica en la confianza que la sociedad tenga sobre la eficiencia de operación del sistema. Un ejemplo es el estudio de percepción realizado a los residentes de Hong Kong sobre la operación de la planta nuclear de Daya Bay, la cual indica que solamente el 34.5% de los entrevistados se sienten confiados sobre la eficiencia operativa. Tal confianza se debe al conocimiento del plan de emergencia y la responsabilidad que el gobierno de China ha tenido para con la operación de la planta, adicionalmente indican que en caso de fuga se mudarían inmediatamente del lugar (Chung, 2013).

En un estudio de percepción hecho en Suiza sobre las plantas de biogás localizadas en el país indica que la aceptación de los habitantes cercanos a estas es de 4.86 (en una escala del 1 al 6, donde 6 es sumamente positivo), marcando una diferencia entre los habitantes que perciben olores como provenientes de la planta de un 4.4 y los que no lo perciben un 5.13. Aunque se tiene una alta aceptación social de este tipo de instalaciones, esta depende en gran medida de la confianza que los habitantes le tengan a la empresa encargada de la operación. Adicionalmente el hecho de que acepten este tipo de instalaciones ha sido debido a que se les ha mantenido informados de lo concerniente a la planta de biogás, desde su construcción hasta su operación, incluyendo los niveles de riesgo y los planes para acciones preventivas y que la participación directa o el involucramiento de los habitantes en la toma de decisiones no afecta en su aceptación a la instalación de este tipo de sistemas (Soland, 2013). Sin embargo, es de suma importancia que la información sobre el proyecto o las nuevas instalaciones sobre en proyectos con carácter social, implementados por dependencias gubernamentales, se dé en tiempo y forma para que la comunidad crezca con el proyecto y se considere parte de él (Mirumachi, 2012).

Otros factores determinantes para lograr la aceptación e instalación de plantas de biogás son: nivel educativo, mujeres jefas de familia, difusión con la comunidad de la operación, de los beneficios económicos, sociales y ambientales

que se presentan al instalar una planta de biogás por organizaciones no gubernamentales (Kabir, 2013).

La percepción del riesgo se basa en cómo las personas entienden el riesgo. Una parte importante de cómo las personas lo entienden depende de la capacidad de los responsables políticos y de los gobernantes de transmitir la información, de manera oportuna.

Se ha sugerido que la sociedad selecciona sus riesgos, por lo tanto estos los exageran o minimizan de acuerdo con su contexto social, cultural, moral y experiencia personal. Adicionalmente la gente adopta el nivel de riesgo dependiendo de qué tan seguro se sienta, es decir, mientras mayor presencia de medidas de seguridad existan y estas estén visibles la gente tiende a minimizar el factor de riesgo (Botterill, 2004).

Es importante mencionar que una vez que la gente determina o selecciona su nivel de riesgo, esto es difícil de modificar, especialmente en los casos en que la gente cree saber sobre el tema, ya que es poco influenciable por los expertos. Aún así, el nivel de riesgo puede cambiarse si se muestran los beneficios que trae consigo la construcción de nuevos proyectos (Botterill, 2004).

Por lo anterior, la comunicación del riesgo es fundamental, aunque no es nada fácil pues se tienen muchos públicos distintos con percepciones del riesgo diferentes. Sin embargo en sociedades democráticas debe encontrarse la manera de colocar el conocimiento especializado al servicio de la sociedad, con la finalidad de que la sociedad conozca el riesgo, lo identifique y lo acepte (Powell, 1996).

De acuerdo con EPA (2007) la definición para comunicación de riesgo es:

*“Es el proceso de informar a la gente acerca de los posibles riesgos para su persona, propiedad o comunidad. Estudiosos del tema definen la comunicación de riesgos como un enfoque basado en la ciencia para la comunicación efectiva en situaciones de mucho estrés, preocupantes o controversia. Desde la perspectiva del gestor de riesgos, el propósito de la comunicación de riesgos es ayudar a los residentes de las comunidades afectadas a que comprendan los procesos de evaluación y gestión de riesgos, para formar una percepción científicamente válida de los posibles peligros, y de participar en la toma de decisiones sobre cómo debe manejarse el riesgo”.*

La contundencia de conocer la percepción de la sociedad consiste en que conozcan el riesgo y que estén dispuestos a aceptar la construcción y operación de un sistema de digestión anaerobia, que disminuya los riesgos para su salud.

### **1.16 Factibilidad financiera de aprovechamiento de lodos residuales como fuente de energía.**

Como se mencionó con anterioridad, el tratamiento y disposición de los lodos residuales y biosólidos es un problema económico y serio a nivel mundial que se incrementa proporcionalmente al crecimiento demográfico. Por ello es un reto generar y encontrar formas de solucionar los problemas derivados de este residuo que sean innovadoras, costeables y eficientes principalmente ya que en un futuro las restricciones de calidad de los lodos serán mayores y el grado de tratamiento deberá ser mejorado (Hall, 2000).

De acuerdo con Rittman *et al.* (2008), el aprovechamiento del biogás producido por la digestión anaerobia de lodos residuales tiene beneficios económicos debido a que existe una reducción en los costos por manejo y disposición de los biosólidos (aprox. \$250 usd/ton/año) y una reducción en los gastos de energía eléctrica al utilizar el biogás como fuente de energía (aprox. \$12,000 usd/año) por lo que se considera que los ahorros anuales en los gastos de operación son entre 40-60%. Lo anterior implica que la inversión para una instalación típica se recupera en aproximadamente tres años en una PTAR de tipo estándar con una capacidad de tratamiento de entre 500-1,000 litros por segundo y una producción de 380 t/d de lodos residuales.

Como parte de la viabilidad económica para la instalación de un sistema de digestión anaerobia con recuperación energética, se debe considerar que la producción mínima por hora de CH<sub>4</sub> debe ser de 5 m<sup>3</sup> (Grupo Aqua Limpia, 2011).

### **1.17 Importancia de los análisis costo-impacto.**

En el caso de los programas y proyectos sociales, lo más adecuado es utilizar el Análisis Costo-Impacto (ACI). El ACI se basa en una relación entre los costos (dinero) y el impacto (indicadores de las metas que se quieren alcanzar), es

decir, calcular el costo por unidad de impacto. Lo anterior implica analizar la eficiencia y optimizar el uso de los recursos dependiendo del impacto que estos generan a cierta población objetivo (CEPAL, 2005).

Por lo general los ACI se llevan a cabo para proyectos de salud pública donde se tiene que realizar una inversión y no se genera un producto que pueda ser vendido para recuperar lo invertido, como es el caso del análisis realizado por Barragán (2011), con la finalidad de evaluar la implementación de sistemas de información radiológica en un hospital de Bogotá, Colombia y del estudio realizado por Calderón (2004) para el programa de *Teniasis Cisticercosis* en Lima, Perú.

Adicionalmente Collins (2012), realizó un análisis para valorar el impacto social de la instalación de un nuevo sistema de producción de energía renovable mediante generadora eólicos, en comparación con el impacto de la utilización de carbón.

Por lo anterior fue importante que para el presente estudio se realizara un ACI, con la finalidad de determinar los costos y el impacto asociados a la instalación y manejo de un sistema de digestión anaerobia con recuperación energética en comparación con el seguir con el sistema actual de manejo.

## **2. OBJETIVOS.**

### **2.1 Objetivo General.**

Elaborar un proyecto que valore los tres ejes de la sustentabilidad para el aprovechamiento de los lodos residuales de la PTAR “El Naranja” como materia prima para la recuperación energética en Ensenada, Baja California.

### **2.2 Objetivos Específicos.**

1. Determinar la calidad de los lodos residuales para su utilización como materia prima.
2. Elaborar prototipo de digestor anaerobio y realizar tres experimentos para conocer la factibilidad de aprovechar los lodos residuales para la recuperación energética.
3. Llevar a cabo la modelación del sistema de digestión de lodos residuales con planta de biogás.
4. Realizar el análisis de ciclo de vida para determinar el impacto ambiental del sistema.
5. Realizar estudio de percepción social de los actores involucrados en la operación de la PTAR “El Naranja”.
6. Realizar el análisis costo-impacto del sistema propuesto.

### **3. HIPÓTESIS.**

Es factible aprovechar los lodos residuales de la PTAR “El Naranja” de la ciudad de Ensenada, B. C. como materia prima para la recuperación energética, mediante la incorporación de un sistema de digestión anaerobia para cubrir el requerimiento energético de la PTAR, disminuyendo el impacto ambiental y social, así como los costos de operación que genera el manejo actual de estos lodos.

#### 4. METODOLOGIA.

El sistema de digestión anaerobia con recuperación energética fue planeado como un proyecto sustentable, es decir, que no solamente contemple un análisis de factibilidad desde una perspectiva meramente ingenieril, sino también desde otros aspectos que deben de tomarse en cuenta, como son el aspecto ambiental, social y financiero.

Para comprender mejor el marco metodológico bajo el cual se realizó el proyecto de tesis se presenta la Figura 9.

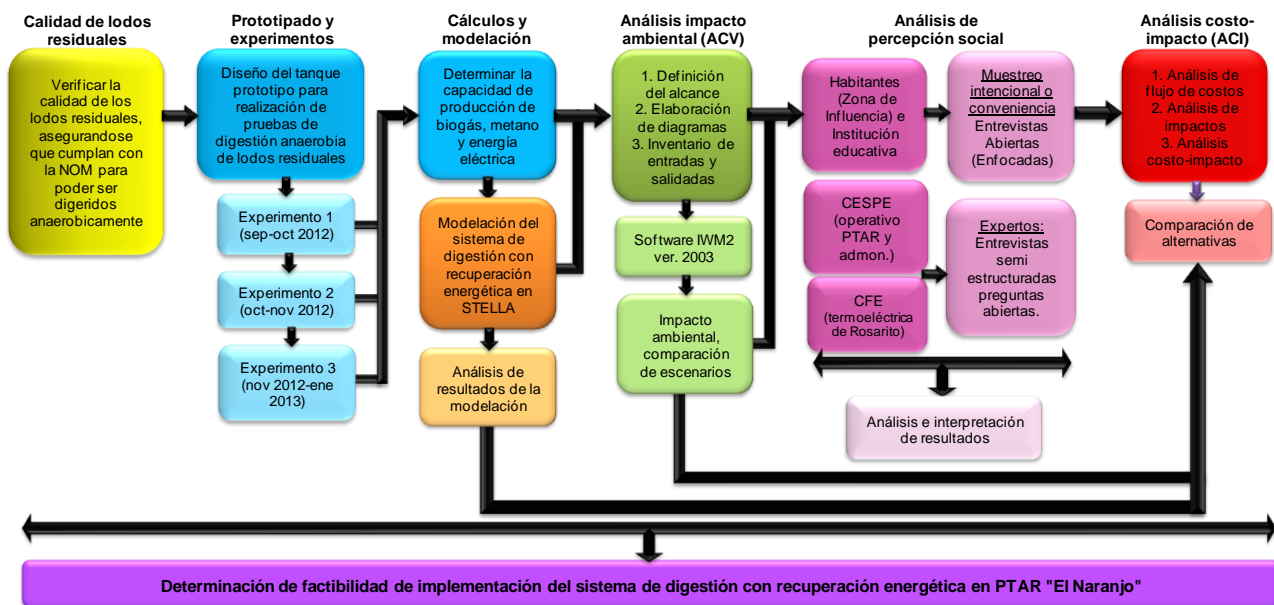


Figura 9. Marco metodológico que sirvió como base para la desarrollo del proyecto de tesis (Elaboración propia).

#### 2.1 Determinación de la calidad de los lodos residuales para su utilización como materia prima para la recuperación energética.

Como primer paso, se verificó la calidad de los lodos residuales para asegurarse que cumplan con la normatividad aplicable con la finalidad de que sean aptos para poder ser digeridos anaeróbicamente y que los biosólidos resultantes puedan ser aprovechados benéficamente.

La información sobre los análisis de calidad realizados a los lodos residuales fue proporcionada por CESPE (2011a), los años de análisis fueron 2005, 2008 y 2011, por lo que se hizo la comparación entre los límites máximos

permisibles por la normatividad, para metales pesados, parásitos y patógenos, y humedad.

Una vez que se realizó el análisis comparativo se determinó su calidad y por lo tanto el tipo de aprovechamiento de acuerdo con lo establecido por la NOM-004-SEMARNAT-2002.

## **2.2 Prototipado y diseño de experimento.**

Con la finalidad de calcular el potencial de recuperación energética de los lodos residuales generados por la PTAR “El Naranja” (28,800 ton/año) al ser sometidos a un proceso de digestión anaerobia, se diseñó un tanque digestor de acuerdo con la teoría de diseño para digestores (Deublein y Steinhauser, 2011).

Se decidió emplear un digestor anaerobio tipo “batch” o por lote para lo cual fueron tomados en cuenta para su diseño el volumen total del digestor, que debe ser suficiente para contener la cantidad de lodos residuales y el biogás, considerando que el 25% del volumen debe ser ocupado por los lodos y el 75% restante, para albergar el biogás producido (Duque, 2006).

La forma considerada para el prototipo fue con flujo de pistón horizontal, es decir, tanque reactor en posición horizontal, con cúpula en la parte superior, donde los lodos entran por un extremo y salen digeridos por la parte inferior del otro. El biogás es acumulado en la cúpula para ser transportado a los filtros o quemadores (Deublein y Steinhauser, 2011; Nakasima, 2011). El diseño del tanque con 30 litros de capacidad se presenta en la Figura 10.

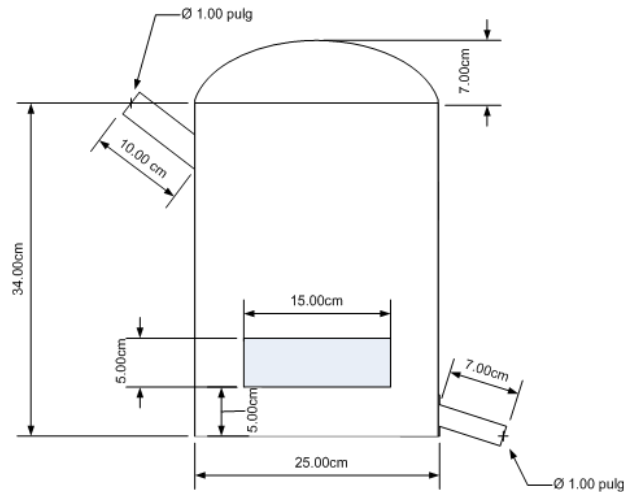


Figura 10. Diseño de tanque digestor para realización de experimentos (Elaboración propia).

De acuerdo con las especificaciones de diseño se fabricó un digestor anaerobio en acero inoxidable (Figura 11), con instrumentos de medición necesarios para el monitoreo de 3 parámetros: temperatura interna de los lodos, temperatura interna del biogás y presión interna del tanque.



Figura 11. Prototipo experimental de digestor anaerobio fabricado en acero inoxidable con termómetros para biogás y lodos residuales, así como válvula de seguridad y llave de drenado (Fotografía propia).

Para la operación del digestor anaerobio se realizaron 3 experimentos de septiembre de 2012 a enero de 2013. Los lodos residuales se sometieron al proceso de degradación en una sola exhibición retirándose después del tiempo de retención de 31 días, esto de acuerdo con el trabajo de Agler *et al.* (2010) en el que el tiempo de retención óptimo para lograr una producción de biogás constante es de 15 a 32 días.

Para realizar el monitoreo de los parámetros se elaboró un formato de registro (Figura 12), y se monitoreó la temperatura externa/ambiente. La lectura del manómetro se realizó con la finalidad de que la operación se efectuara bajo condiciones seguras.


CONTROL DE PARAMETROS DIGESTOR ANAEROBIO PROTOTIPO			
FECHA		HORA	
TERMOMETRO 1 (LODOS)			
TERMOMETRO 2 (BIOGAS)			
MANOMETRO		Señalización	
			
Lectura			

Figura 12. Formato para el monitoreo y registro de los parámetros de los experimentos de digestión anaerobia (Elaboración propia).

Para los 3 experimentos se pesaron los lodos iniciales y finales de cada digestión con la intención de conocer la masa y el volumen digerido (Figura 13).



Figura 13. Pesaje, alimentación y drenado de lodos residuales para los experimentos realizados (Fotografías propias).

Una vez que se analizaron los datos obtenidos de los 3 experimentos se procedió a calcular la cantidad de biogás producido considerando los resultados del experimento 1 (tiempo de retención de 31 días a una temperatura de 25°C), ya que de acuerdo con Agler *et al.* (2010) la temperatura mínima a la que se produce biogás es de 22°C, la ecuación utilizada para el cálculo fue:

$$V_B = Q/V \times V$$

\*Duque, 2006

donde:

$V_B$ = volumen de biogás producido.

$Q/V$ = factor de producción con los parámetros establecidos es de 1.35

$V$ = volumen del digestor en  $m^3$ .

En el caso del biogás obtenido a partir de la digestión anaerobia de lodos residuales el contenido de  $CH_4$  es de 45-75% (WEF & ASCE, 1998; Cisneros, 2005; Duque, 2006; Nabaneethan, 2009; Arthur, 2010; Gilroyed, 2010; Onyeche, 2011; Deublein y Steinhauser, 2011), por lo que se consideraron 3 escenarios para el contenido de  $CH_4$  (A = 50%, B = 60% y C = 70%) con la finalidad de realizar los cálculos correspondientes del potencial de generación de energía.

Para poder transformar el CH<sub>4</sub> en energía se propuso la utilización de un moto generador de 60 Hz, trifásico, potencia nominal de 132 kw, factor de potencia de 0.8, voltaje nominal 220 y requerimiento de combustible (CH<sub>4</sub>) de 78 m<sup>3</sup>/hr (Grupo Aqua Limpia, 2011). Lo anterior sirvió como base para realizar el cálculo de la eficiencia del motor la cual está dada por:

$$\eta = \frac{W}{Mb \times LHV}$$

\*Coelho, 2006b.

donde:

$\eta$  = eficiencia del moto generador.

W= potencia nominal.

Mb= requerimiento de combustible (m<sup>3</sup>/hr).

LHV = potencial térmico del combustible (CH<sub>4</sub>=0.3778 MJ/kg).

Posteriormente se determinó el porcentaje de cobertura del requerimiento energético de la PTAR “El Naranja” si se instalara un sistema de digestión anaerobia con recuperación energética.

### **2.3 Modelación del sistema de digestión anaerobia con recuperación energética.**

Se elaboró el diagrama de operación del sistema propuesto, el cual sirvió como base para llevar a cabo la programación del modelo y poder simular el comportamiento del sistema de digestión anaerobia con recuperación energética.

Para la modelación del sistema se utilizó el programa STELLA ver. 7.0 de ISEE Systems. STELLA es un programa de simulación dinámica, que permite visualizar el comportamiento de un sistema, bajo condiciones de prueba. La modelación del sistema propuesto se realizó con la finalidad de poder observar cómo se comportará el sistema una vez que se encuentre operando, durante su periodo de vida útil (25 años) (Empresa ACZIA, 2012), considerando las diferentes variables que intervienen en la digestión, en la generación de biogás y en la producción de energía eléctrica.

El modelo abarcó desde la recepción de aguas residuales de las diferentes PTAR de la ciudad hasta la recuperación energética y su incorporación al

funcionamiento operativo de la PTAR “El Naranja” y se realizó para los 3 escenarios propuestos en el apartado anterior.

Parte de la información necesaria para realizar la programación del modelo fue proporcionada por CESPE (CESPE, 2011b y 2011c). Adicionalmente se incorporó la información generada a partir de los experimentos realizados con el digester prototipo y los cálculos realizados para conocer el potencial de generación de biogás y de recuperación energética.

Para la realización de los análisis de ciclo de vida y costo-impacto, se utilizó únicamente los resultados obtenidos del escenario B (CH<sub>4</sub> 60%), esto debido a que experimentos realizados (Cisneros, 2005; Duque, 2006; Nabaneethan, 2009; Arthur, 2010; Gilroyed, 2010; Onyeche, 2011), donde la medición en sitio del contenido exacto de CH<sub>4</sub> del biogás fue medido, bajo condiciones similares al presente proyecto es del 60-65% por lo que se consideró el valor mínimo de manera conservativa y por lo tanto el escenario correspondiente a este valor.

#### **2.4 Análisis de impacto ambiental.**

Con el fin de evaluar el impacto ambiental del manejo de lodos actual y el sistema que se propone, se procedió a llevar a cabo un análisis de ciclo de vida (ACV), cuyo detalle de la metodología se presenta en la Figura 14.



Figura 14. Metodología del ACV realizada en el presente estudio basado en Hoof (2008),  
Elaboración propia.

La determinación del objetivo y alcance es fundamental pues el análisis solamente hará referencia al inicio y final del ciclo del o los sistemas que se incluirán en el estudio, esto con la finalidad de poder comparar los resultados posteriormente.

La información y los datos necesarios fueron recolectados mediante visitas de campo a la PTAR “El Naranja”, documentos proporcionados por CESPE (2011b, 2011c y 2012b) y los cálculos generados a partir de los experimentos realizados.

Para el caso del presente ACV se determinó que los escenarios a analizar serian:

- *Escenario 1:* Es el sistema de manejo actual, desde la generación de los lodos residuales en cada PTAR de la ciudad hasta su tratamiento y disposición en la PTAR “El Naranja”.
- *Escenario 2b:* Es el sistema de digestión anaerobia con recuperación energética con una producción de CH<sub>4</sub> de 60%; considerando desde los lodos residuales generados en cada PTAR de la ciudad hasta su tratamiento y disposición en la PTAR “El Naranja”.

Con la finalidad de poder comparar de manera real los escenarios, evitando una interpretación errónea, el ACV evalúa la carga ambiental del sistema completo (denominado “de la cuna a la tumba”), es decir, las entradas y salidas de materiales y energía, así como los procesos internos (Perilhon, 2012).

Por lo anterior se construyeron los diagramas de flujo de los escenarios 1 y 2b. Una vez elaborados, se realizó el inventario que consistió en cuantificar todas las entradas y salidas de materiales y energía para cada escenario (McDougall, 2003).

Como apoyo para la realización del inventario y del ACV para cada escenario se utilizó el software especializado para sistemas de manejo y disposición de residuos sólidos “Integrated Solid Waste” (IWM2 ver.2003) el cual arroja como resultado las cantidades normalizadas en kg/año de las diferentes salidas (materiales, gases y energía) que genera cada escenario.

Posteriormente se realizó la comparación de los escenarios para determinar el que representa un menor impacto sobre el medio ambiente (ver sección Resultados) y cuáles son los impactos potenciales.

Esta metodología ha servido para conocer el impacto potencial de equipo para generación de energía renovable y seleccionar el idóneo, con la finalidad de que durante su operación genere el menor impacto posible (Perilhon, 2012).

Los resultados del análisis del potencial de recuperación energética y del impacto ambiental del sistema propuesto se integraron a los resultados del análisis costo-impacto con el fin de evaluar la relación entre los costos de implementación y el impacto social estimado adecuadamente (CEPAL, 2006).

## **2.5 Análisis de percepción social.**

La operación de las PTAR no sólo debe considerar el tratamiento de las aguas residuales para cumplir con la normatividad y que estas puedan ser descargadas al medio natural o ser reutilizadas, sino que se debe considerar la operación como un todo, es decir, incluyendo los problemas sociales y ambientales que se generan, con la finalidad de buscar y proponer posibles soluciones.

La PTAR “El Naranja” se encuentra ubicada en la zona habitacional Praderas del Ciprés II, en Ensenada, B.C. Según Renner (2002), en una PTAR los residentes mayormente influenciados por la operación de la planta son los que se encuentran aproximadamente a 1 km a la redonda (zona de influencia). Luego de consultar datos del INEGI (2012), la zona de influencia de la PTAR “El Naranja” consta de 121 casas habitación con un total de 436 habitantes (Figura 15).



Figura 15. Vista panorámica de la ubicación de la PTAR “El Naranja” y la zona de influencia (Fotografía tomada de Google Earth, 2012).

Con la finalidad de poder visualizar el crecimiento poblacional alrededor de la PTAR “El Naranja”, se analizaron las fotografías aéreas de la zona disponibles en Google Earth (2012), la cual permitió visualizar el incremento de casas habitación en la zona de influencia desde el 2004 hasta 2012. Posteriormente se elaboró una línea de tiempo para mostrar que aunque la PTAR fue construida inicialmente fuera de la zona urbana, el crecimiento poblacional llegó hasta donde se encuentra actualmente.

Por lo anterior la importancia de conocer la opinión de los habitantes de la zona desde un análisis de la teoría social fenomenológica, es decir aquella que

pretende entender las relaciones sociales desde la perspectiva de los actores (Taylor y Bodgan, 1987).

Por ello, se realizó un análisis de percepción social con el fin de conocer la opinión y sentir de la gente que vive alrededor de la PTAR “El Naranja” y la manera en que visualiza el crecimiento de la PTAR. A su vez, se conoció el punto de vista de los otros actores que son CESPE y CFE con respecto a la instalación de un sistema de digestión anaerobia con recuperación energética.

Es importante mencionar que, como lo señala Sampieri (2003), los estudios cualitativos no generalizan sus resultados, ni obtienen muestras representativas, no buscan ser replicados; pues son procesos inductivos descriptivos que generan perspectivas de los actores involucrados.

Por lo tanto, el objeto de realizar un análisis de percepción social consiste en conocer el sentir y pensar de los habitantes de la zona de influencia, así como de las instituciones públicas encargadas de la administración de la PTAR y de la energía eléctrica, con la finalidad de que el proyecto de la utilización de lodos residuales como materia prima para la recuperación energética valore los 3 ejes de la sustentabilidad, es decir, que además de la componente ambiental y financiera, se incorpore la componente social y el punto de vista de las instituciones que serán las encargadas de administrar y gestionar para que se implemente el sistema propuesto.

Adicionalmente se pretende conocer la opinión de la gente sobre la valoración porcentual de los beneficios que se tienen al incorporar un sistema de digestión anaerobia con recuperación energética, que permita desarrollar el ACI.

Para el presente estudio cualitativo se utilizó el marco metodológico que se detalla en la Figura 16.

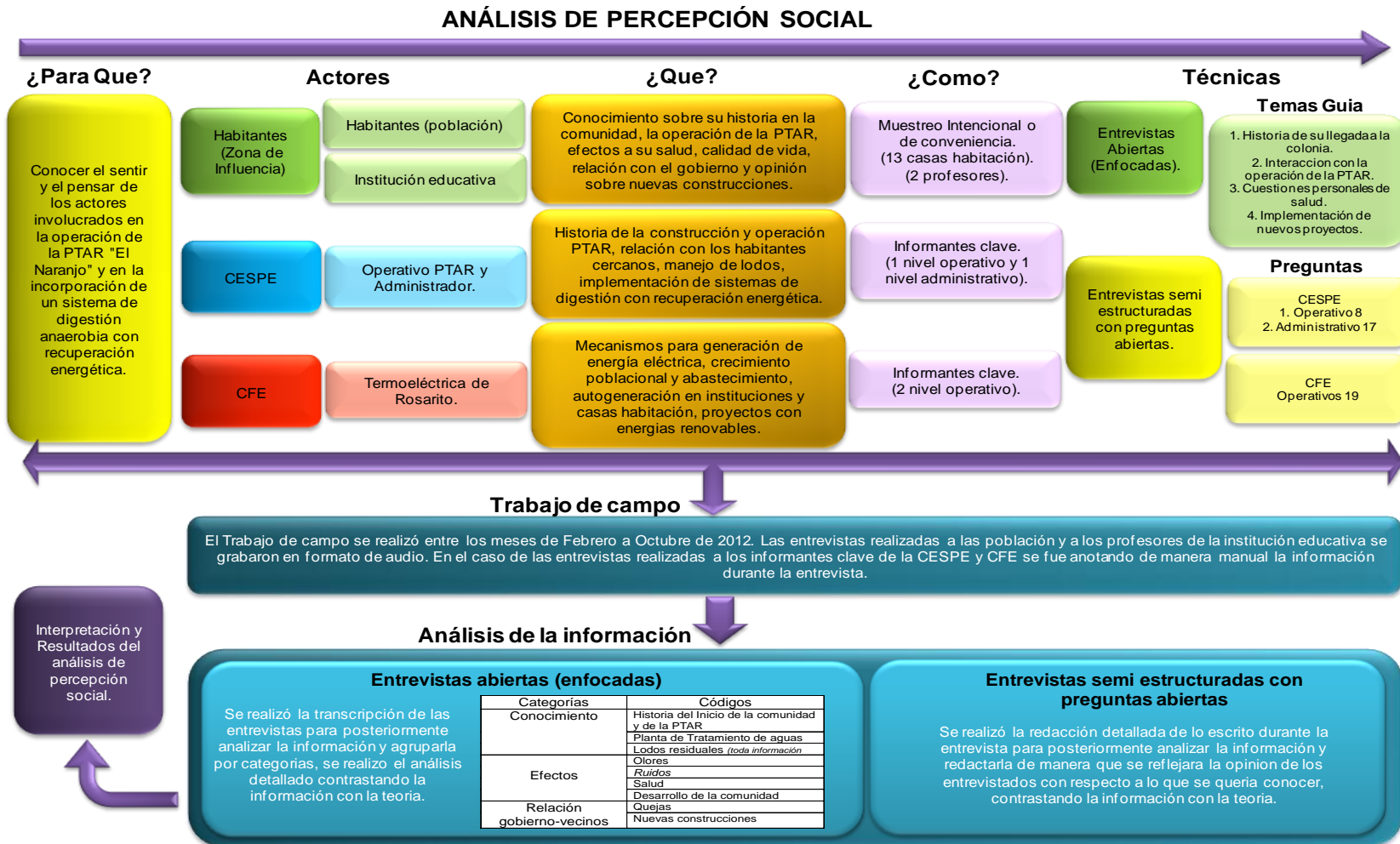


Figura 16. Marco metodológico para la realización del análisis de percepción social (Elaboración propia con datos tomados de Sierra, 1998; Casal, 2003; Duro, 2008).

### **2.5.1 Diseño del estudio cualitativo y trabajo de campo.**

En el diseño del estudio de percepción social se deben de considerar el involucramiento de todos los actores, ya que en todo estudio cualitativo todos los escenarios y personas son dignos de considerarse (Taylor y Bodgan, 1987).

Por lo anterior es que se determinó que el hablar con la población de la zona de influencia de la PTAR, era clave para obtener información sobre su vida cotidiana y su interrelación con la operación de la PTAR.

Se eligió el muestreo intencional o de conveniencia, el cual se caracteriza por un esfuerzo deliberado de obtener información con aquellos individuos a los que se tiene fácil acceso, es decir cualquier habitante de la zona de influencia que quiera participar en el estudio es considerado (Casal, 2003).

Se determinó la utilización de la entrevista, debido a que es uno de los instrumentos a través del cual es posible obtener información por medio de un diálogo interactivo en el que el entrevistado tiene la libertad de expresar sus pensamientos y emociones sobre algún tema en específico, pues la tarea del entrevistador es escuchar lo que el entrevistado tiene que decir (Duro, 2008).

Para las entrevistas dirigidas a los habitantes de la zona se seleccionó la entrevista abierta enfocada, pues se encuentra definida conceptualmente, es decir el individuo nos interesa porque se sabe que sus vivencias y su relación con el objeto de estudio son estrechas. El entrevistador emplea temas-guías que harán enfocar el dialogo a obtener información sobre estos tópicos (Sierra, 1998).

En el caso del presente estudio los temas guías fueron:

1. Historia de su llegada a la colonia.
2. Conocimiento sobre la operación de la PTAR.
3. Cuestiones personales de salud.
4. Desarrollo de la colonia.
5. Implementación de nuevos proyectos.

En el caso de la información que se pretendía obtener de los otros actores (CESPE y CFE), se decidió por entrevistar a Informantes clave, que son individuos que poseen conocimientos únicos o detallados sobre un tema y que para este

caso en particular pueden otorgar datos o información a la que no se tiene libre acceso (Goetz, 1988).

La técnica utilizada fue la entrevista semi estructurada con preguntas abiertas, pues se lleva una relación de preguntas que se desean formular pero existe flexibilidad, es decir, se puede modificar su orden si es necesario e incluso se pueden añadir nuevas a fin de indagar sobre algún aspecto que no fue considerado desde el inicio (Duro, 2008). Las entrevistas semi estructuradas permiten obtener información clave con la inversión de menor tiempo.

Una vez que se definieron las técnicas a utilizar se procedió a la realización de las entrevistas en el periodo de febrero a octubre de 2012.

Las entrevistas realizadas a los habitantes de la zona de influencia se dividieron en 2 grupos: Habitantes (población) y Profesores de institución educativa, pues al llegar al sitio de estudio se observó que dentro de la zona de influencia se encuentra una escuela secundaria. En total se pudieron realizar 13 entrevistas a los habitantes y 2 entrevistas a profesores de la institución educativa (Figura 17).

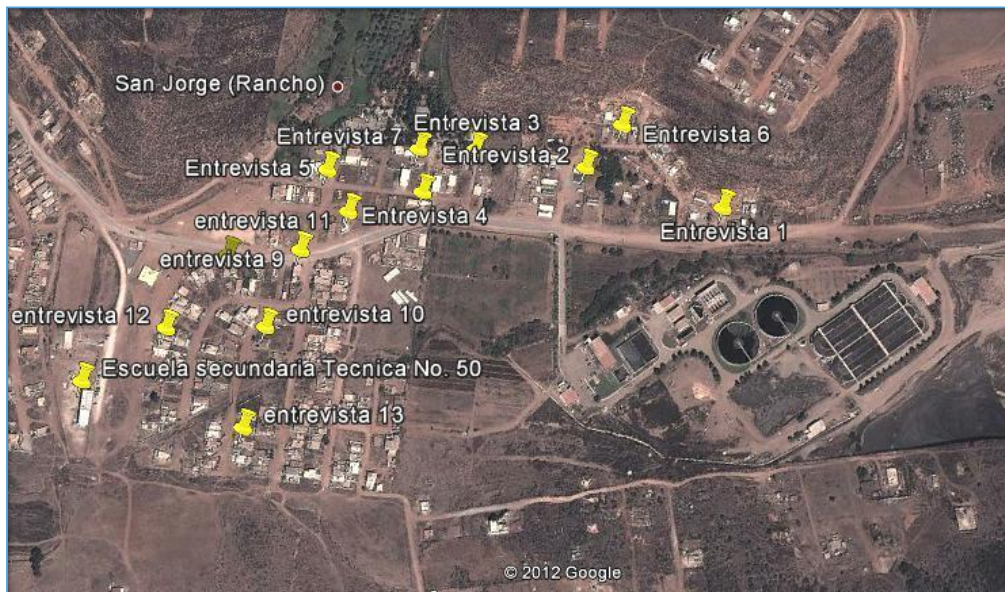


Figura 17. Ubicación de las entrevistas realizadas a los habitantes de la zona y a los profesores de la institución educativa. Elaboración propia con fotografía de Google Earth, 2012).

En el caso de las entrevistas realizadas a los informantes claves de CESPE y CFE, las preguntas se muestran en el Cuadro X.

Cuadro X. Preguntas abiertas para la realización de las entrevistas semi estructuradas a informantes clave de CESPE y CFE.

Informantes claves	Puesto	Preguntas
CESPE	Operativo de las PTAR de la ciudad de Ensenada.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Cuénteme la historia sobre la construcción e inicio de operaciones de la planta de tratamiento “El Naranja”.</li> <li>2. ¿Los vecinos han manifestado algún tipo de queja ante la CESPE, por el ruido, olores u otros daños que sienten les afecta por vivir cerca de la Planta de tratamiento “El Naranja”?</li> <li>3. ¿La CESPE ha tenido algún acercamiento con los vecinos de la planta con la finalidad de brindarles algún tipo de beneficios, en cuanto a servicios públicos se refiere?</li> <li>4. ¿Cuál es el procedimiento que la planta lleva a cabo para el tratamiento de los lodos residuales y donde se depositan?</li> <li>5. ¿Tienen algún problema con el consumo eléctrico de la Planta “El Naranja”?</li> <li>6. ¿Qué piensa sobre las plantas de biogás que permiten aprovechar los lodos residuales para producir energía eléctrica?</li> <li>7. ¿Qué piensa sobre la factibilidad de que en la planta de “El Naranja” se instalara una planta de biogás y que la energía producida sea utilizada para cubrir sus requerimientos energéticos?</li> <li>8. ¿Qué nuevos proyectos le interesa a CESPE implementar para el aprovechamiento o reutilización de los lodos residuales?</li> </ol>
	Administrador de oficinas principales CESPE.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Cuénteme la historia sobre la construcción e inicio de operaciones de la Planta de tratamiento “El Naranja”.</li> <li>2. ¿Cómo ha sido el desarrollo del proyecto, qué retos han enfrentado en su operación?</li> <li>3. ¿Qué diferencias presenta la operación de la planta “El Naranja” en comparación a otras plantas de tratamiento?</li> <li>4. ¿La presencia de una población cercana, ha impactado en el desarrollo de la planta?</li> <li>5. ¿Qué piensa usted sobre los impactos que puede generar una planta de tratamiento ubicada dentro de una zona urbana?</li> <li>6. ¿Cuál es la relación que CESPE mantiene con los habitantes de la zona?</li> <li>7. ¿Cuál es el procedimiento que la planta lleva a cabo para el tratamiento de los lodos residuales y donde los deposita?</li> <li>8. ¿Han considerado implementar cambios para modificar y mejorar el manejo de los lodos?</li> <li>9. ¿Cómo se maneja el consumo de energía eléctrica de la planta con CFE? (periodicidad, convenios, etc).</li> <li>10. ¿Han pensado en algún tipo de convenio o intercambio de servicios?</li> <li>11. ¿Han considerado generar su propia energía eléctrica para abastecerse?, Si es así de qué maneras lo</li> </ol>

		<p>visualizan?</p> <p>12. ¿Qué ha escuchado hablar sobre las plantas de biogás?</p> <p>13. ¿Qué ventajas encuentra en este tipo de instalación?</p> <p>14. ¿Qué desventajas encuentra en este tipo de instalación?</p> <p>15. ¿Considera factible la instalación de una planta de biogás para “El Naranja”? ¿porqué?</p> <p>16. ¿Qué se necesitaría para poder impulsar la instalación de este tipo de proyectos en la planta de tratamiento “El Naranja”?</p> <p>17. ¿Qué nuevos proyectos le interesa que CESPE implementara para el aprovechamiento o reutilización de los lodos residuales?</p>
<p><b>CFE</b></p>	<p>Operativos de termoeléctrica de Rosarito división generación.</p>	<p>1. Cuénteme sobre las fuentes para generación de energía con las que cuenta CFE.</p> <p>2. ¿Cómo ha sido el desarrollo de los proyectos enfocados a la producción de energía?</p> <p>3. ¿Qué retos han enfrentado para la producción y distribución de energía eléctrica?</p> <p>4. ¿Cual es el porcentaje de utilización de las diferentes fuentes utilizadas para la generación de energía?</p> <p>5. De las fuentes de generación de energía utilizados ¿Cuál es el más eficiente? y ¿Por qué?</p> <p>6. De las fuentes de generación de energía utilizados ¿Cuál es el menos eficiente? y ¿Por qué?</p> <p>7. ¿Como ha impactado el crecimiento poblacional en el suministro y generación de energía eléctrica?</p> <p>8. ¿Qué piensa usted sobre los impactos que puede generar la utilización de las fuentes de energía actuales con el medio ambiente?</p> <p>9. ¿Ha oído hablar sobre las fuentes de energía renovables?</p> <p>10. ¿Cuáles de las fuentes de generación de energía con las que cuenta CFE son renovables?</p> <p>11. ¿Qué tipo de proyectos tiene considerados CFE para la incorporación de fuentes de energía renovables para la generación de energía?</p> <p>12. ¿Cómo se maneja la utilización de fuentes de energía propias (casa habitación, instituciones o empresas) para su consumo o uso propio?</p> <p>13. ¿Cuántas empresas, instituciones o personas han hecho esta solicitud o generan su propia energía?</p> <p>14. ¿Qué ventajas encuentra en este tipo de manejo (que las personas y empresas produzcan su propia energía)?</p> <p>15. ¿Qué desventajas encuentra en este tipo de manejo (que las personas y empresas produzcan su propia energía)?</p> <p>16. ¿Considera factible que la CFE promueva la autogeneración de energía eléctrica, principalmente en empresas e instituciones? ¿Por qué?</p> <p>17. ¿Considera factible que CFE a corto, mediano y largo plazo incremente el uso de fuentes de energía renovables? ¿Por qué?</p> <p>18. ¿Qué se necesitaría para poder impulsar este tipo de</p>

	<p>proyectos? 19. ¿Qué nuevos proyectos le interesa o le gustaría que CFE implementara para la producción eficiente de energía considerando nuevas fuentes de generación energética?</p>
--	--

Una vez realizado el trabajo de campo se procedió a efectuar el análisis de las entrevistas.

### 2.5.1. Análisis de entrevistas abiertas enfocadas.

Una vez que se realizaron las entrevistas, las grabaciones se transcribieron, utilizando para ello el procesador de texto Microsoft Office Word.

Ya transcritas se procedió a realizar el análisis, para lo cual se especificaron los códigos y categorías, para poder agrupar los datos (Cuadro XI).

Cuadro XI. Descripción de los códigos y categorías utilizados para la agrupación de los datos.

Categorías	Códigos
<b>Conocimiento</b>	<b>Historia del Inicio de la comunidad y de la PTAR</b> (toda la información sobre los orígenes de la comunidad, habitantes y los inicios de la construcción de la PTAR).
	<b>Planta de Tratamiento de aguas residuales</b> (toda información donde digan cosas sobre la planta de tratamiento ya sean buenas o malas)
	<b>Lodos residuales</b> (toda información donde digan cosas sobre los lodos residuales ya sean buenas o malas)
<b>Efectos</b>	<b>Olores</b> (cuando mencionan sobre olores y sus consecuencias).
	<b>Ruidos</b> (cuando aparezca alusión a los ruidos generados por la planta).
	<b>Salud</b> (cuando se hace mención sobre enfermedades o problemas como irritación de los ojos y garganta u otras, puede ser que digan que no sienten efectos a su salud)
	<b>Desarrollo de la comunidad</b> (donde mencionen si afecta a los negocios o al empleo etc.) y (cuando se mencionan sobre los servicios públicos, ya sean calles, agua, luz o drenaje o la carencia de estos o problemas con estos)
<b>Relación gobierno-vecinos</b>	<b>Quejas</b> (si han emitido quejas a la planta o con los mismos vecinos)
	<b>Nuevas construcciones</b> (lo que piensan sobre la instalación de mas construcciones o de nuevos sistemas como el de digestión anaerobia y aprovechamiento del gas para producir energía).

Adicionalmente se identificaron las partes de la entrevista donde los habitantes de la zona emitían sus sentimientos y su actitud sobre vivir cerca de una PTAR.

Por último era importante conocer la opinión de la gente sobre la implementación de nueva infraestructura, en este caso el sistema de digestión anaerobia con recuperación energética.

Posteriormente se realizó el análisis con la finalidad de redactar de forma fluida la percepción de los entrevistados, para poder ser contrastada con la teoría encontrada sobre el tema.

### **2.5.2. Análisis de entrevistas semi estructuradas con preguntas abiertas.**

Una vez que se realizaron las entrevistas, las respuestas fueron transcritas. Posteriormente se identificó la información relevante con la finalidad de redactar de forma fluida el punto de vista de los entrevistados, para poder ser contrastada con la teoría encontrada sobre el tema.

Para ambos tipos de entrevistas se redactaron los párrafos finales por categoría y se elaboraron los diagramas de percepción (ver Resultados).

## **2.6 Análisis costo-impacto (ACI) y de valor económico.**

De la misma forma que para el ACV, se trabajó con dos alternativas: La alternativa 1 fue el sistema actual de gestión de lodos residuales (no hacer nada), mientras que la alternativa 2b consistió en la incorporación de un sistema de digestión anaerobia con recuperación energética.

La importancia de realizar un análisis de costo e impacto se debe a que no todos los proyectos tiene como finalidad el vender un producto, sino tener un beneficio económico propio. A su vez estos proyectos benefician a la población que se encuentra alrededor del área en la que se implementarían este tipo de proyectos.

El ACI es la metodología que permite seleccionar la alternativa que maximiza el impacto social al menor costo posible.

### 2.6.1 Análisis de costos para cada alternativa.

El tiempo de vida útil considerado para el sistema de digestión con recuperación energética fue de 25 años (Grupo Aqua limpia, 2011; Empresa ACZIA, 2012). Adicionalmente el ejercicio se corrió a 10 años por ser este el periodo en el que se deprecia en su totalidad la infraestructura y equipo de la alternativa 1. Para la determinación de la depreciación anual del equipo e infraestructura se tomó como base la lista publicada por el Diario Oficial de la Federación (DOF) del 15 de agosto de 2012 y la Ley del Impuesto sobre la Renta (LISR) para el 2012 (Cuadro XII).

Cuadro XII. Depreciación anual asignada a la infraestructura y equipo para la alternativa 1 y 2 de acuerdo con el DOF, 2012 y LISR, 2012 (Elaboración propia).

Alternativa 1		Alternativa 2b	
Edificio Filtros Banda	5%	Infraestructura (obra civil)	5%
		Equipo electromecánico	10%
		Equipo de filtrado de biogás	10%
		Moto generador de biogás	10%

Los datos para determinar todos los costos asociados a cada una de las alternativas fueron proporcionados por CESPE (2012a y 2012b) y el Grupo Aqua Limpia (2011).

Para la alternativa 1 los costos que se consideraron fueron los siguientes:

**Costo de inversión:** Estos costos son el desembolso que debe hacerse para la ejecución de la alternativa. Para este caso se consideró el valor actual del edificio donde se encuentran ubicados los filtros banda (se realizó la depreciación anual desde el año 1999, año en el que comenzó operaciones la PTAR hasta el año 2012) (DOF, 2012).

**Costo de mantenimiento:** Son los costos necesarios para mantener las condiciones óptimas de funcionamiento del equipo para el manejo de lodos residuales.

**Costo de operación:** Es la adquisición de bienes o el pago de servicios con la finalidad de que el sistema opere adecuadamente se dividen en:

- Costos directos: Con la finalidad de determinar estos costos se consideraron los sueldos y salarios de los operadores, consumo energético de los filtros banda, renta de maquinaria y equipo para el manejo de los lodos y la adquisición de poliacrilamina para su deshumidificación (CESPE, 2012b).
- Costos indirectos: Dentro de estos costos se tomó en consideración los sueldos y salarios de los empleados administrativos de la PTAR, papelería y generales, y el consumo de energético de las oficinas administrativas (CESPE, 2012a).

Costo de habitantes de la zona: En los proyectos donde el beneficio económico no se ve reflejado directamente en la población, es necesario determinar los costos en los que incurrirán indirectamente los habitantes cercanos a la instalación del proyecto. Para este caso se consideró un 25% adicional en los gastos promedio por medicamentos de la población cercana a la PTAR asociados con dolor de cabeza, irritación de ojos y garganta, ya que de acuerdo con Renner *et. al* (2002) este es el porcentaje en el que la población cercana a una PTAR que deposita sus lodos residuales como relleno a cielo abierto es mayormente propensa. Adicionalmente se consideró el riesgo por incendio o explosión (UDLAP, 2007) por vivir cerca de una PTAR. Se consideró un incremento poblacional y de vivienda del 3% y 2.5% anual respectivamente.

Para la alternativa 2b los costos que se consideraron fueron los siguientes:

Costo de inversión: Los costos necesarios para construir el sistema de digestión anaerobia con recuperación energética, la adquisición del equipo electromecánico para el buen funcionamiento de los digestores, los filtros de CO<sub>2</sub> y de H<sub>2</sub>S y un moto generador con capacidad de 78 m<sup>3</sup>/hr de CH<sub>4</sub> (Grupo Aqua limpia, 2011).

Costo de mantenimiento: Los costos por mantenimiento fueron calculados como un porcentaje del valor del costo de inversión (Cuadro XIII).

Cuadro XIII. Porcentajes del costo de inversión considerados para determinar el costo por mantenimiento. Grupo Agua limpia (2011). Elaboración propia.

Infraestructura (obra civil)	1.5%
Equipo electromecánico	3%
Equipo de filtrado de biogás	5%
Moto generador de biogás	10%

Costo de operación: Al igual que en la alternativa 1 se determinaron:

- Costos directos: Se consideraron los sueldos y salarios de los operadores, consumo energético del sistema de digestión con recuperación energética y renta de maquinaria y equipo para el manejo de los lodos (CESPE, 2012b).
- Costos indirectos: Dentro de estos costos se tomó en consideración los sueldos y salarios de los empleados administrativos de la PTAR, papelería y generales, y el consumo de energético de las oficinas administrativas (CESPE, 2012a).

Costo de habitantes de la zona: Para esta alternativa se estimó que la afectación a la salud de los habitantes cercanos a la PTAR disminuye el 25% adicional en gastos por medicamentos (Renner, 2002). Sin embargo, el riesgo por incendio o explosión calculado (UDLAP, 2007) se incrementó en un 45% por el riesgo que conlleva el manejo del biogás y su combustión, considerando una afectación de 500 m a la redonda. Se consideró un incremento poblacional y de vivienda del 3% y 2.5% anual respectivamente.

Una vez que se elaboraron los flujos de costos para cada una de las alternativas fue necesario actualizar los costos por periodo al momento del análisis con la finalidad de determinar su valor presente (VP) y poder realizar su comparación, las fórmulas utilizadas fueron las siguientes:

$$P_i = F_i \frac{1}{(1+i)^n}$$

\*CEPAL, 2006.

$P_i$ = valor actualizado de la inversión realizada en el periodo.

$F_i$ = valor futuro en el periodo.

$i$ = tasa de descuento (para el caso de proyectos sociales se maneja el 12% anual).

$n$ = periodo para el cual se realiza la actualización.

$$VP = I_0 + \sum_{i=1}^n \frac{F_i}{(1+i)^n}$$

\*CEPAL, 2006.

donde:

VP= valor presente del total de periodos que contempla la alternativa.

I<sub>0</sub>= valor de inversión (realizada en el periodo 0).

F<sub>i</sub>= valor futuro en cada periodo de operación de la alternativa.

i= tasa de descuento (para el caso de proyectos sociales se maneja el 12% anual).

n= cantidad de periodos entre el presente y cada año de operación de la alternativa.

Para el caso de la corrida a los 10 años para la alternativa 2b para determinar el VP se consideró el valor de salvamento (VS) de la infraestructura y equipo tenido en el año 10, de acuerdo con la fórmula:

$$VP = I_0 + \sum_{i=1}^n \frac{F_i}{(1+i)^n} - \left[ I_0 - \frac{VS}{(1+i)^n} \right]$$

\*Baca-Urbina, 2010.

donde:

VP= valor presente del total de periodos que contempla la alternativa.

I<sub>0</sub>= valor de inversión (realizada en el periodo 0).

F<sub>i</sub>= valor futuro en cada periodo de operación de la alternativa.

i= tasa de descuento (para el caso de proyectos sociales se maneja el 12% anual).

n= cantidad de periodos entre el presente y cada año de operación de la alternativa.

VS= valor de salvamento para el último año de de la corrida del ejercicio.

Una vez que se calculó el VP, se determinó el costo total anual (CTA) de cada alternativa, es decir, la sumatoria de los costos anuales actualizados (CEPAL, 2006).

En la valoración de proyectos con beneficio social, se debe determinar el costo por habitante del proyecto (CUP), para este caso en particular se consideró el costo por habitante de la zona de influencia de la PTAR, la cual es de 1 km a la redonda (Renner, 2002). Así pues, los habitantes afectados o beneficiados por cada alternativa (SAP) considerada para este análisis fue de 436 (INEGI, 2012).

$$CUP = \frac{CTA}{SAP}$$

\*CEPAL, 2006.

donde:

CUP=costo por habitante.

CTA= costo total de la alternativa.

SAP= número de habitantes beneficiados o afectados por la alternativa.

Una vez que se realizaron los cálculos anteriores se elaboró la matriz general de costos (ver Resultados) con la finalidad de poder comparar el flujo de costos para las alternativas 1 y 2.

### 2.6.2 Análisis de impacto para cada alternativa.

En los análisis ACI, no sólo es importante determinar los costos asociados para cada alternativa, sino que es necesario evaluar el impacto que tienen esas alternativas en la sociedad, con la finalidad de determinar si las alternativas producen cambios en la dirección de los fines perseguidos y estimar la magnitud de dichos cambios (CEPAL, 2006).

Por lo anterior se definieron las metas que se pretenden alcanzar por ambas alternativas (Cuadro XIV) que para este análisis en particular son las que resultaron de la realización del ACV, a las cuales se les asignó un valor de importancia (el cual fue asignado por los habitantes de la zona durante las entrevistas realizadas para el análisis de percepción social) para poder calcular el impacto total ponderado (ITP) de cada una de las alternativas, es decir, el nivel de importancia de cada meta perseguida con respecto al impacto que generaron.

Cuadro XIV. Metas por alcanzar al implementar cada una de las alternativas (Elaboración propia).

Metas perseguidas para las alternativas
1. Disminuir los residuos sólidos que provocan riesgos a la salud
2. Disminuir las emisiones GEI que favorecen el calentamiento global
3. Disminuir el riesgo por vivir cerca de una PTAR

La fórmula que se utilizó para el cálculo del ITP para cada alternativa es:

$$ITP = \sum_{i=1}^n OB * p$$

\*CEPAL, 2006.

ITP= impacto total ponderado.

OB= valor del impacto de cada meta.

p= nivel de importancia de cada meta expresado en decimal.

Una vez que se analizaron los costos para cada una de las alternativas así como sus impactos, se determinó la relación costo-impacto (CUI), es decir el costo

que hay que afrontar en cada alternativa para lograr el impacto deseado de cada meta.

El presente análisis consideró tres metas para las alternativas (Cuadro XIV), por lo que se tienen tres diferentes CUI por alternativa. Para determinar el CUI se utilizó la fórmula:

$$CUI = \frac{CTA}{(OBI*100)}$$

\*CEPAL, 2006.

CUI= costo por unidad de impacto de cada meta para cada alternativa.

CTA= costo total anual de cada alternativa.

OBI= impacto de la meta para cada alternativa (nivel de importancia /número de periodos).

Posteriormente se determinó el costo-impacto total de cada alternativa (CUI<sub>A</sub>) el cual se determinó mediante:

$$CUI_A = \frac{CTA}{(ITP*100)}$$

\*CEPAL, 2006.

CUI<sub>A</sub>= costo-impacto total de la alternativa.

CTA= costo total anual de la alternativa

ITP= impacto total ponderado.

A continuación se realizó la comparación entre las alternativas (1 y 2b) con la finalidad de determinar la alternativa que representó un menor costo-impacto, es decir, el que representó menores costos de operación y disminuyó el impacto negativo a la sociedad.

### **2.6.3 Análisis de valor económico.**

Para el análisis de valor económico se determinó cuales son los productos vendibles que genera cada alternativa considerando su valor en el mercado. Adicionalmente se consideraron los costos operativos: costos de mantenimiento (CM), costos directos (CD), costos indirectos (CI) y otros gastos (OG). También se consideró la depreciación anual de la infraestructura y equipo necesarios para su producción (se consideró la misma que para el análisis costo-impacto, con la finalidad de determinar el flujo anual por alternativa mediante la fórmula:

$$FA= Ve-Co+Dep$$

\*Baca-Urbina, 2010.

FA= Flujo anual de la alternativa.

Ve= Valor económico anual de la alternativa.

Co= Costos operativos anuales de la alternativa (CM+CD+CI+OG).

Dep= Depreciación anual para cada alternativa.

Para la alternativa 1 se consideró un horizonte de 10 años debido a que es el periodo en el que se deprecia en su totalidad la infraestructura y equipo que existe actualmente. Para la alternativa 2 se consideró un horizonte de 25 años, ya que este es el periodo de vida del sistema propuesto (Empresa AZCIA, 2012).

Tanto para la alternativa 1 y 2 se consideró como inversión inicial los costos de inversión del análisis costo-impacto.

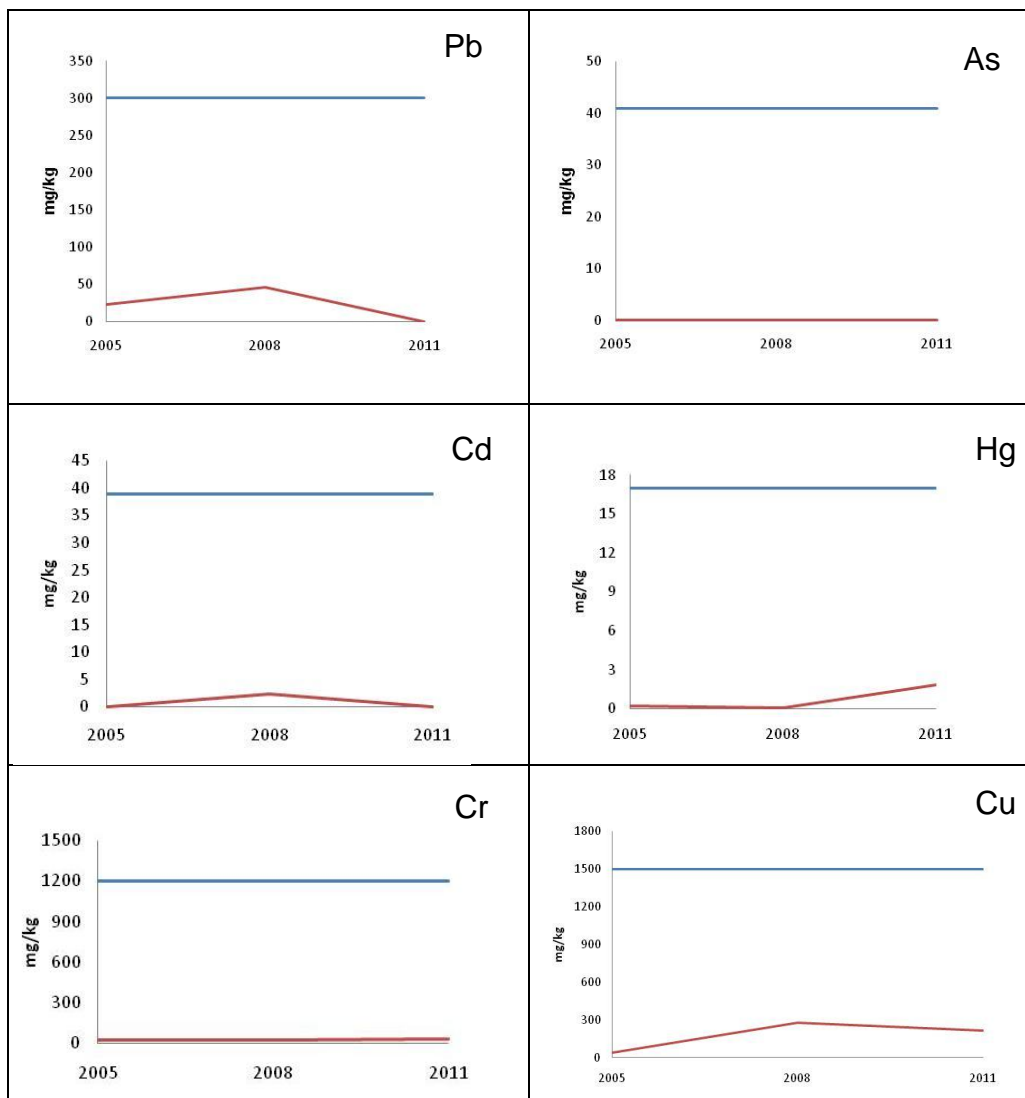
Posteriormente se realizaron los cálculos de VAN y TIR para cada alternativa utilizando las funciones financieras del software Microsoft Excel 2007, se determinó el periodo de retorno de la inversión. Igual que para el análisis costo-impacto se consideró una tasa del 12% anual por ser un proyecto con carácter social (CEPAL, 2006).

Una vez hechos los cálculos se procedió a realizar el análisis comparativo de las alternativas.

### 3. RESULTADOS.

#### 3.1 Calidad de lodos residuales PTAR “El Naranjo”.

Como resultado de la comparación de los análisis de lodos residuales proporcionados por CESPE (2011a) con lo indicado por la normatividad aplicable para metales pesados se tiene la Figura 18. En donde la línea en color azul representa lo establecido por la NOM-004-SEMARNAT-2002 y la línea en rojo indica el resultado de los análisis realizados a los lodos de la PTAR “El Naranjo” para los años 2005, 2008 y 2011.



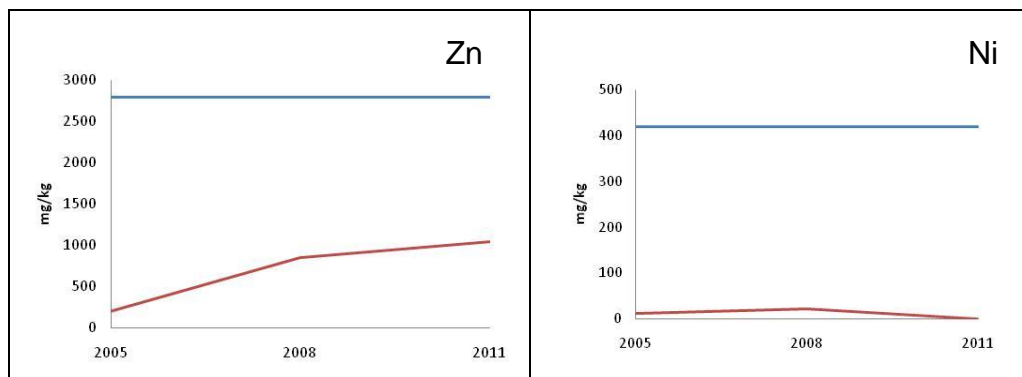


Figura 18. Comparativo de la normatividad aplicable para concentración de metales pesados en los lodos residuales de la PTAR “El Naranja” (Elaboración propia).

El análisis indica que los lodos generados por la PTAR “El Naranja” cumplen con la normatividad para metales pesados, pues el contenido de estos en las muestras analizadas se encuentra por debajo de los límites máximos permisibles, lo que los clasifica como **Tipo Excelente**.

El resultado de la revisión del cumplimiento con la norma de los análisis realizados para patógenos y parásitos se presenta en el Cuadro XV.

Cuadro XV. Comparativo del cumplimiento con la NOM-004-SEMARNAT-2002 de límites máximos permisibles para patógenos y parásitos de lodos residuales de la PTAR “El Naranja” (Elaboración propia).

Año	Coliformes NMP/g		Salmonella NMP/g		Huevos de helmintos/g		Clase
	NOM	PTAR	NOM	PTAR	NOM	PTAR	
2005	<1000	23	<3	0	<1	0	A
2008	<2000,000	261,904	<3	0	<10	2.5	C
2011	<2000,000	674,460	<3	0	<1	0	C

Los lodos cumplen con los máximos permisibles por la norma para patógenos y parásitos clasificándose como **Clase C**.

La norma también establece que el nivel de humedad que deben contener los lodos residuales es máximo del **85%**; los resultados de CESPE se presentan en el Cuadro XVI.

Cuadro XVI. Porcentaje de humedad de los lodos residuales de la PTAR “El Naranja” de acuerdo con la NOM-004-SEMARNAT-2002 (Elaboración propia).

Año	Humedad %
2005	27.20
2008	87.40
2011	88.90

Aunque en el porcentaje de humedad no se cumpla con lo estipulado por la norma, los lodos residuales pueden aprovecharse para usos forestales, mejorador de suelos y usos agrícolas sin contacto público directo, por lo que pueden ser utilizados para ser digeridos. Adicionalmente el biosólido resultante de la digestión será **Clase B**, lo que permite su aprovechamiento para usos forestales, mejoramiento de suelos y usos agrícolas, sin contacto directo con el público.

### 3.2 Potencial energético del sistema.

Como resultado de los tres experimentos (ver Metodología, inciso ¿??) se presenta la media de las variables monitoreadas en el Cuadro XVII.

Cuadro XVII. Medición de las variables consideradas durante los experimentos realizados para determinar el potencial de recuperación energética a partir de la digestión de los lodos residuales de la PTAR “El Naranja” (Elaboración propia).

Experimento	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>E</sub>	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>
1	25	27	22	12.46	7.2	42	28
2	20	23	20	12.46	11.20	10.2	5
3	18	22	14	12.46	12.20	2.1	0

T<sub>1</sub>: Temperatura media interna lodos residuales (°C).

T<sub>2</sub>: Temperatura media interna biogás (°C).

T<sub>E</sub>: Temperatura media externa/ambiente (°C).

M<sub>1</sub>: Masa inicial de lodos residuales (kg).

M<sub>2</sub>: Masa final de lodos residuales/biosólidos (kg).

R<sub>1</sub>: Reducción de masa después de la digestión (%).

R<sub>2</sub>: Reducción de volumen después de la digestión (%).

Como se mencionó con anterioridad, la PTAR “El Naranja” maneja 28,800 ton/año de lodos residuales, por lo que si se instalara un sistema de digestión anaerobia con recuperación energética, de acuerdo con la fórmula de Duque (2006) la capacidad de producción de biogás es de **0.1059 m<sup>3</sup>/kg**; adicionalmente se reduciría el volumen de lodos residuales a manejar y el consumo de energía

eléctrica suministrada por CFE al convertirse en un sistema autosustentable. Como resultado de la aplicación de la fórmula para determinar la eficiencia del moto generador propuesto se tiene que la eficiencia es del **45%**.

Una vez que se calculó el potencial de generación de biogás se desarrolló la matriz principal (Cuadro XVIII) la cual presenta los resultados de efectuar los cálculos por todo un año de operación, para cada una de las PTAR de la ciudad de Ensenada y para cada uno de los escenarios que se consideraron en el presente estudio de acuerdo con la cantidad de CH<sub>4</sub> contenido en el biogás (A = 50%, B = 60% y C = 70%).

Cuadro XVIII. Matriz principal de cálculos realizados para determinar el potencial de producción de biogás, CH<sub>4</sub> y energía eléctrica por año para cada escenario (Elaboración propia).

#### Escenario A

PTAR	Capacidad (lps) 100%	Lodos totales PTAR (ton/año)	Biogás promedio (m <sup>3</sup> /año)	Metano promedio (m <sup>3</sup> /año)	Potencial promedio metano (MJ/año)	Energía producida promedio (kwh/año)
<b>Manadero</b>	30	1,009	100,935	50,467	1,906,654	529,626
<b>Noroeste</b>	56	1,884	188,411	94,206	3,559,088	988,636
<b>El Sauzal</b>	120	4,037	403,738	201,869	7,626,617	2,118,505
<b>El Gallo</b>	150	5,047	504,673	252,336	9,533,271	2,648,131
<b>El Naranja</b>	500	16,822	1,682,243	841,121	31,777,570	8,827,103
<b>Totales</b>		<b>28,800</b>	<b>2,880,000</b>	<b>1,440,000</b>	<b>54,403,200</b>	<b>15,112,000</b>
<b>Total energía eléctrica producida con eficiencia del 45%</b>						<b>6,800,400</b>

#### Escenario B

PTAR	Capacidad (lps) 100%	Lodos totales PTAR (ton/año)	Biogás promedio (m <sup>3</sup> /año)	Metano promedio (m <sup>3</sup> /año)	Potencial promedio metano (MJ/año)	Energía producida promedio (kwh/año)
<b>Manadero</b>	30	1,009	100,935	60,561	2,287,985	635,551
<b>Noroeste</b>	56	1,884	188,411	113,047	4,270,905	1,186,363
<b>El Sauzal</b>	120	4,037	403,738	242,243	9,151,940	2,542,206
<b>El Gallo</b>	150	5,046	504,673	302,804	11,439,925	3,177,757
<b>El Naranja</b>	500	16,822	1,682,243	1,009,346	38,133,084	10,592,523
<b>Totales</b>		<b>28,800</b>	<b>2,880,000</b>	<b>1,728,000</b>	<b>65,283,840</b>	<b>18,134,400</b>
<b>Total energía eléctrica producida con eficiencia del 45%</b>						<b>8,160,480</b>

### Escenario C

PTAR	Capacidad (lps) 100%	Lodos totales PTAR (ton/año)	Biogás promedio (m <sup>3</sup> /año)	Metano promedio (m <sup>3</sup> /año)	Potencial promedio metano (MJ/año)	Energía producida promedio (kwh/año)
<b>Manadero</b>	30	1,009	100,935	70,654	2,669,316	741,477
<b>Noroeste</b>	56	1,884	188,411	131,888	4,982,723	1,384,090
<b>El Sauzal</b>	120	4,037	403,738	282,617	10,677,264	2,965,907
<b>El Gallo</b>	150	5,047	504,673	353,271	13,346,579	3,707,383
<b>El Naranjo</b>	500	16,822	1,682,243	1,177,570	44,488,598	12,357,944
<b>Totales</b>		<b>28,800</b>	<b>2,880,000</b>	<b>2,016,000</b>	<b>76,164,480</b>	<b>21,156,800</b>
<b>Total energía eléctrica producida con eficiencia del 45%</b>						<b>9,520,560</b>

Los cálculos anteriores permiten verificar que es factible la generación de energía eléctrica para todos los escenarios propuestos, el resumen para cada escenario se presenta en el Cuadro XIX.

Cuadro XIX. Potencial de generación de energía eléctrica utilizando los lodos residuales de la PTAR “El Naranjo”, como materia prima para cada escenario (Elaboración propia).

Escenario	Lodos generados (ton/año)	CH <sub>4</sub> generado (m <sup>3</sup> /kg)	Potencial térmico del CH <sub>4</sub> (MJ/año)	Energía eléctrica generada (kwh/año)	Biosólidos finales a manejar (ton/año)
a	28,800	1,440,000	54,403,200	6,800,400	16,704
b	28,800	1,728,000	65,283,840	8,160,480	16,704
c	28,800	2,016,000	76,164,480	9,520,560	16,704

Se considera que el consumo energético del sistema de digestión anaerobia para todos los escenarios es de 50 kwh por tonelada de lodos residuales digeridos (Grupo Aqua Limpia, 2011), por lo que el requerimiento energético de la PTAR “El Naranjo” se incrementaría en un 18%. Sin embargo, la capacidad de recuperación energética del sistema propuesto alcanzará para abastecer el requerimiento energético del sistema y cubrir entre el 74%-103% del requerimiento energético actual de la PTAR, dependiendo de la cantidad de CH<sub>4</sub> contenido en el biogás generado (Cuadro XX).

Cuadro XX. Requerimiento energético de la PTAR “El Naranja”, del sistema de digestión anaerobio con recuperación energética propuesto y ahorro en energía suministrada por CFE para cada escenario (Elaboración propia).

Escenario	Requerimiento energético PTAR (kwh/año)	Requerimiento energético del sistema (kwh/año)	Requerimiento energético PTAR+Sistema (kwh/año)	Recuperación energética (kwh/año)	Cobertura energética (%)	Energía suministrada por CFE (kwh/año)
A	7,794,136	1,440,000	9,234,136	6,800,400	74	2,433,736
B	7,794,136	1,440,000	9,234,136	8,160,480	88	1,073,656
C	7,794,136	1,440,000	9,234,136	9,520,560	103	0

Lo anterior indica que el instalar un sistema de digestión anaerobia con recuperación energética en la PTAR “El Naranja” es factible en términos del manejo de lodos residuales y de la generación de energía eléctrica, ya que para los escenarios A y B se tienen ahorros energéticos considerables, mientras que el escenario C permite tener un excedente energético, es decir la PTAR tendría independencia energética.

### 3.3 Modelación del sistema de digestión con recuperación energética.

Para simular el comportamiento del sistema de digestión anaerobia con recuperación energética se elaboró el diagrama del sistema (Figura 19); que sirvió como base para la programación del modelo.

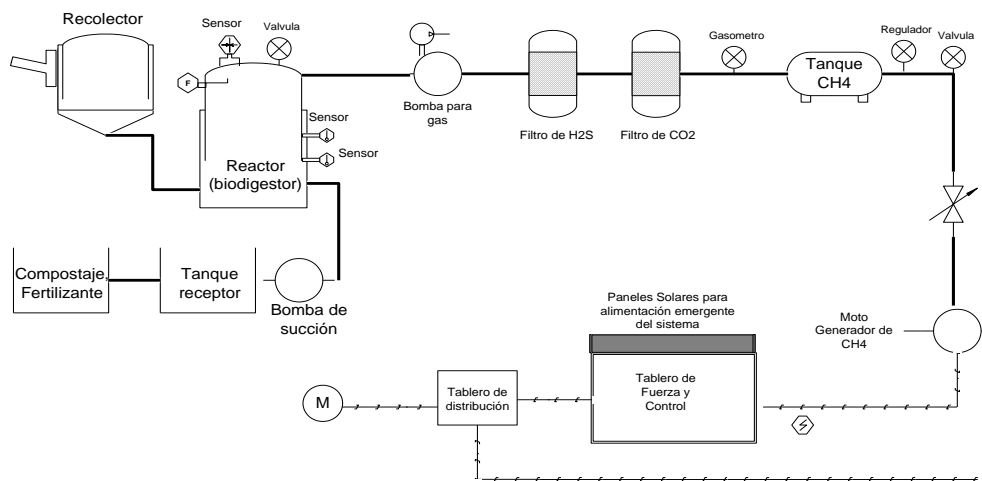


Figura 19. Sistema de digestión anaerobia con depuración de biogás para producción de energía eléctrica a partir de la combustión del metano (Elaboración propia).

La Figura 19 permite visualizar los componentes del sistema, cuya descripción para su implementación en la PTAR “El Naranja” se presentan en el Cuadro XXI con la finalidad de poder manejar las 28,800 ton/año de lodos residuales y realizar la recuperación energética.

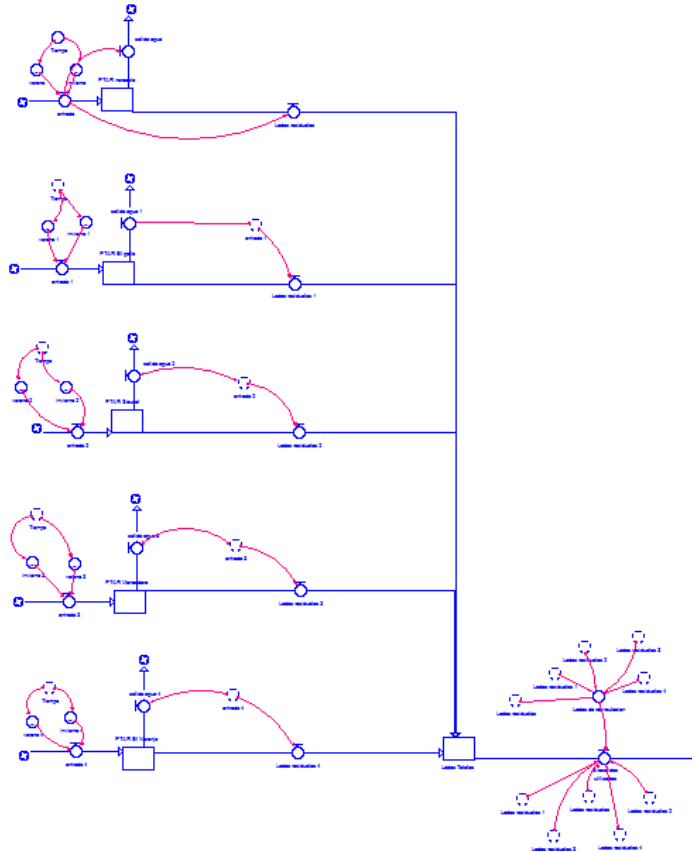
Cuadro XXI. Listado y descripción de infraestructura y equipo necesarios para la implementación del sistema de digestión con recuperación energética en la PTAR “El Naranja” (Elaboración propia con información proporcionada por Grupo Aqua Limpia, 2011).

EQUIPO	DESCRIPCION
<b>Obra Civil</b>	
1. Tanques de alimentación (recolectores)	Se necesita 1 por cada digestor para realizar la distribución de los lodos a los digestores.
2. Digestores	Se necesitan 4 digestores con capacidad de 1,500 m <sup>3</sup> .
3. Tanque receptor	Se necesita 1 tanque por digestor para la recepción de los biosólidos.
4. Exteriores (accesos y seguridad).	Es necesaria la instalación de accesos, caminos e instalaciones de seguridad para los equipos y los trabajadores.
<b>Equipo electromecánico para funcionamiento</b>	
1. Agitadores de lodos residuales en digestor	Cada digestor necesita 4 agitadores.
2. Sistema de calefacción	Cada digestor necesita 1 sistema de calefacción para mantener la temperatura constante a 25C°.
3. Bombas y mezcladores	Se necesita un mezclador para el tanque de alimentación a cada digestor y 2 bombas para el flujo de biosólidos y de gas.
4. Tableros de fuerza y control	Este equipo es necesario para captación y distribución de la energía generada.
<b>Equipo de Filtrado de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S</b>	Filtros para purificación de biogás y obtener CH <sub>4</sub> .
<b>Moto generador de biogás</b>	Moto generador de combustión de CH <sub>4</sub> con capacidad de 78 m <sup>3</sup> /h.

La información anterior junto con los datos de la matriz principal (Cuadro XVIII), sirvieron como base no solamente para el modelado del sistema, sino para la realización del análisis de ciclo de vida (ACV) y el análisis costo-impacto (ACI).

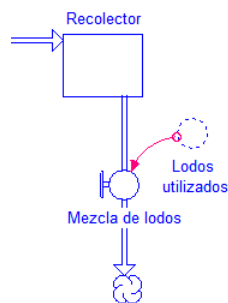
El modelo programado se divide por sectores:

- **Sector 1:** Recepción, tratamiento de aguas residuales y generación de lodos residuales (**Figura 20**).



**Figura 20.** Sector 1 dedicado a las operaciones de recepción de aguas residuales y la generación de lodos residuales (Elaboración propia en programa STELLA).

- **Sector 2:** Recolección y mezcla de lodos residuales en el recolector o tanques de alimentación (Figura 21).



**Figura 21.** Sector 2 dedicado a la recolección y mezcla de lodos residuales (Elaboración propia en programa STELLA).

- **Sector 3:** Sistema de digestión anaerobia para producción de biogás y producción de composta (Figura 22).

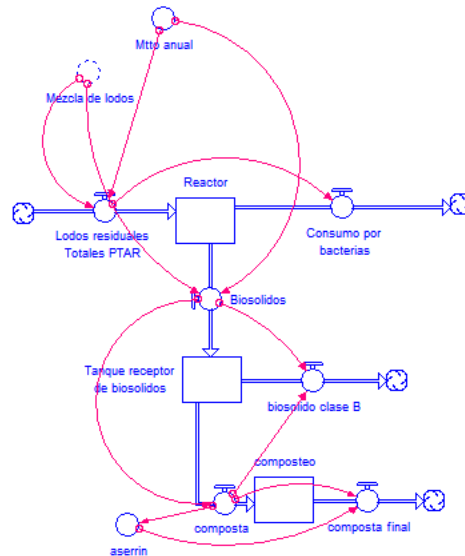


Figura 22. Sector 3 donde se realiza la digestión de lodos residuales con la finalidad de producir biogás y biosólidos clase B para la producción de composta (Elaboración propia en programa STELLA).

- **Sector 4:** Sistema de purificación de biogás para la obtención de  $CH_4$  (Figura 23).

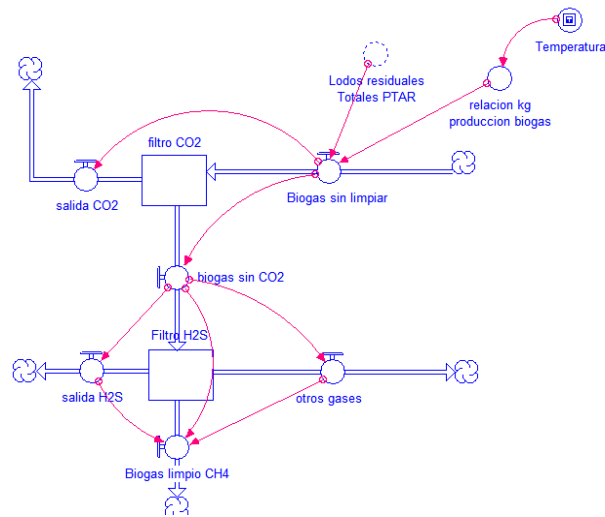


Figura 23. Sector 4 sistema de purificación de biogás para la obtención de  $CH_4$  (Elaboración propia en programa STELLA).

- **Sector 5:** Utilización de CH<sub>4</sub> como biocombustible para generación de energía por medio de su alimentación al moto generador (Figura 24).

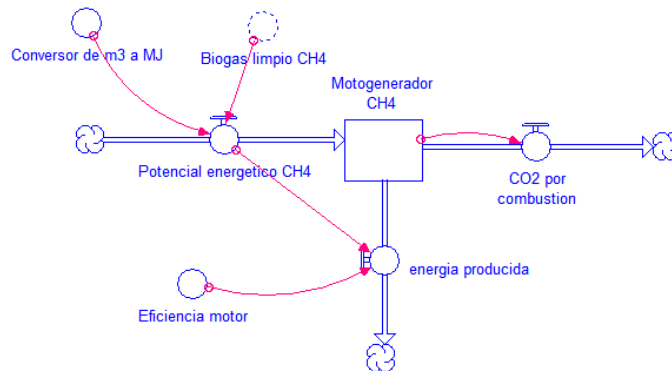


Figura 24. Sector 5 utilización de CH<sub>4</sub> como biocombustible para la generación de energía (Elaboración propia en programa STELLA).

- **Sector 6:** Sector energético, donde se visualiza la producción de energía eléctrica en kwh a partir de la combustión del CH<sub>4</sub> y su distribución al sistema eléctrico de la PTAR “El Naranja” (Figura 25).

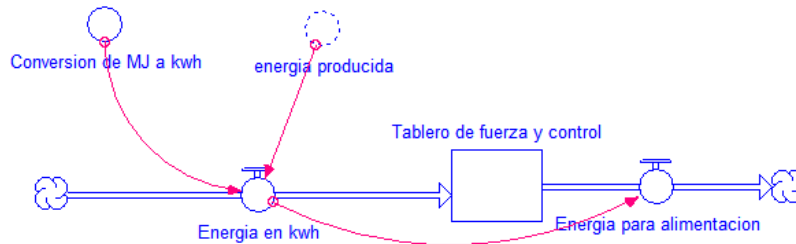


Figura 25. Sector 6 Energía producida para su distribución en el sistema eléctrico de la PTAR “El Naranja” (Elaboración propia en programa STELLA).

- **Sector 7:** Abastecimiento energético para cubrir con los requerimientos energéticos de la PTAR “El Naranja” (Figura 26).

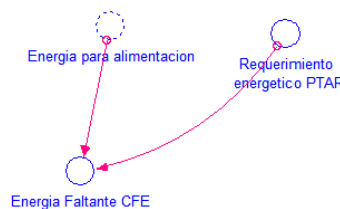


Figura 26. Sector 7 Energía eléctrica disponible para satisfacer los requerimientos energéticos de la PTAR “El Naranja” (Elaboración propia en programa STELLA).

- **Sector 8:** Manejo de lodos por medio de filtros banda (sistema actual) a emplearse anualmente durante el mantenimiento al sistema de digestión anaerobia PTAR “El Naranja” (Figura 27).

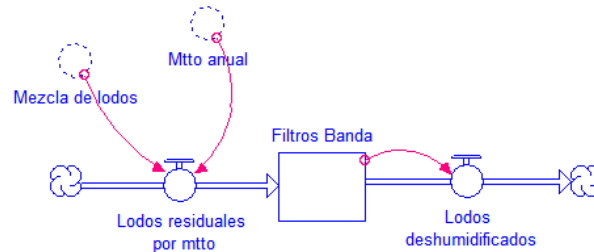


Figura 27. Sector 8 sistema actual de manejo de lodos residuales que se lleva a cabo actualmente en la PTAR “El Naranja” y que tendrá que operar cada año durante el mantenimiento del sistema de digestión anaerobia (Elaboración propia en programa STELLA).

Las variables independientes y dependientes para cada sector junto con su descripción se presentan en el Cuadro XXII.

Cuadro XXII. Variables independientes y dependientes utilizadas en cada sector la modelación del sistema con recuperación energética propuesto para la PTAR “El Naranja” (Elaboración propia).

Sector	Variables independientes	Variables dependientes	Descripción
1	Tiempo		Se considero debido a que la cantidad de aguas residuales que entran para su tratamiento no son fijas a lo largo del año, sino que varían, adicionalmente se utilizó para la operatización de las variables verano e invierno.
	Verano		Se consideraron los 6 meses del año donde se presenta una mayor temperatura ambiente.
	Invierno		Se consideraron los 6 meses del año donde se presenta una menor temperatura ambiente.
		Entrada	Es la cantidad de aguas residuales que reciben las PTAR para su tratamiento.
		Salida de agua	Es la cantidad de agua tratada que sale de las PTAR.
		Lodos residuales	Son los lodos residuales que se generan como resultado del tratamiento de las aguas residuales recibidas en las PTAR.
		Lodos recirculación	Son los lodos residuales que se tienen

			que recircular en el sistema de tratamiento de aguas residuales para mantener la estabilidad de materia orgánica.
		Lodos utilizados	Es la cantidad de lodos resultantes que se utilizan para la digestión.
2		Mezcla de lodos	Son los lodos mezclados con su adecuada proporción de agua (si se requiere) para lograr la mezcla de digestión correcta (11 a 13% de sólidos).
3	Lodos residuales Totales		Son los lodos que se ingresan al sistema de digestión.
	Aserrín		El aserrín es necesario para la realización de composta y es donada por madereras de la ciudad.
		Biosólidos clase B	Es el resultado de la digestión de los lodos, dependen de la cantidad de los lodos ingresados al sistema.
		Composta	Es la cantidad de biosólidos que son mezclados junto con el aserrín, la cantidad generada depende de la cantidad de aserrín donado.
4	Temperatura		Para que el sistema opere de forma mesofílica el sistema de digestión debe mantener a una temperatura de 25C°.
	Filtros de CO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> S		La cantidad de CH <sub>4</sub> depende de la eficiencia de los filtros, para que quede casi puro y se pueda producir mayor energía.
		Relación producción de biogás por kg de lodos	Esta relación dependerá de la temperatura de digestión a la que sean sometidos los lodos, y es la cantidad de biogás que puede generar un kg de lodos.
		CH <sub>4</sub> casi puro	Depende de la eficiencia de los filtros y de los escenarios propuestos.
5	Eficiencia del motor		Las características del moto generador de combustión a gas indican la eficiencia de quema del combustible.
		Potencial energético	Dependiendo de la cantidad de CH <sub>4</sub> que se ingrese al sistema de combustión y a la eficiencia del motor será la cantidad de energía producida.
6		Energía disponible para alimentación.	Es la energía resultante de la combustión del CH <sub>4</sub> y de su utilización como energía en el generador para producir electricidad.
7	Requerimiento energético PTAR		Es la cantidad de energía eléctrica que consumen los equipos y oficinas de la PTAR "El Naranja".

		Autoabastecimiento energético	Es la cantidad de energía eléctrica disponible para autoalimentarse una vez digeridos los lodos y aprovechado el CH <sub>4</sub> como combustible en el moto generador.
<b>8</b>	Mtto anual		Para que el sistema se mantenga en optimas condiciones de operación es necesario darle mantenimiento cada año
		Lodos deshumidificados	Lodos que deberán pasar por este proceso durante el periodo de mantenimiento al sistema de digestión.

Posteriormente se corrió el modelo en STELLA del sistema de digestión anaerobia con recuperación energética propuesto para poder obtener los gráficos correspondientes al comportamiento del sistema durante su vida útil (25 años) y para los 3 escenarios planteados.

El gráfico que presenta la relación de lodos residuales sometidos a digestión con respecto a los biosólidos clase B se muestra en la Figura 28, donde la línea en azul son los lodos sometidos a digestión, la línea roja representa los biosólidos resultantes.

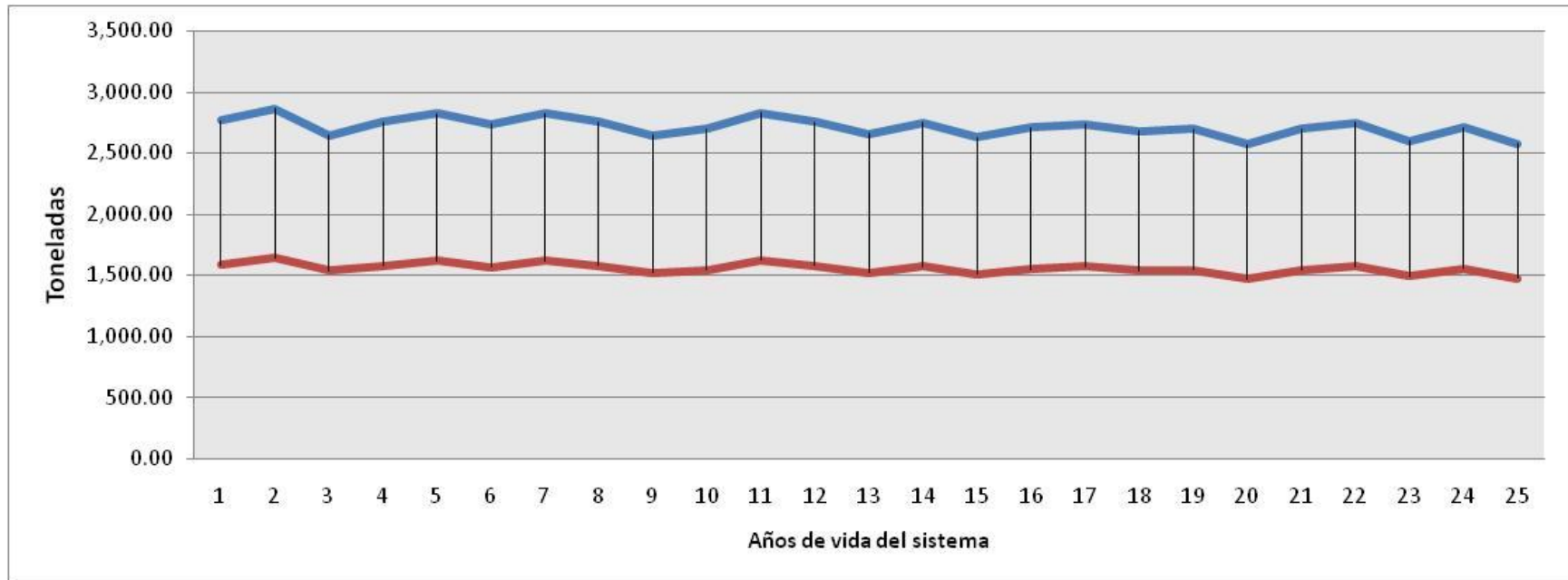


Figura 28. Gráfico de resultados que muestra la relación a 25 años de los lodos residuales generados y los biosólidos resultantes (Elaboración propia con información del modelo generado en STELLA).

En el gráfico anterior se observa que la cantidad de lodos residuales se disminuye al ser sometidos al proceso de digestión, convirtiéndose en biosólidos clase B, los cuales pueden ser aprovechados benéficamente como mejoradores de suelos sin contacto público directo. El área sombreada entre la línea de los lodos sometidos a digestión y los biosólidos generados, muestra su disminución en toneladas (Cuadro XXIII).

Cuadro XXIII. Promedio mensual a 25 años de disminución de lodos residuales a manejar de acuerdo con la modelación realizada en STELLA (Elaboración propia).

Promedio de lodos residuales (ton/mes)	Promedio de biosólidos (ton/mes)	Promedio disminución de masa (ton/mes)	Porcentaje promedio de disminución de masa (%)
2,716.28	1,556.54	1,159.74	42.70

Lo anterior indica que el modelo fue consistente con los datos obtenidos de la realización de los experimentos, por lo que se puede considerar que el modelo representa la realidad, y que este puede utilizarse como referente de cómo se llevará a cabo la operación del sistema.

También se elaboraron los gráficos para visualizar la capacidad de generación de energía eléctrica en comparación con los requerimientos energéticos de la PTAR “El Naranja” (Figura 29, 30 y 31), para cada uno de los escenarios propuestos, donde la línea en azul representa el requerimiento energético anual de la PTAR “El Naranja”, la línea roja la energía eléctrica generada por el sistema propuesto y la línea en verde la energía faltante que deberá ser suministrada por CFE.

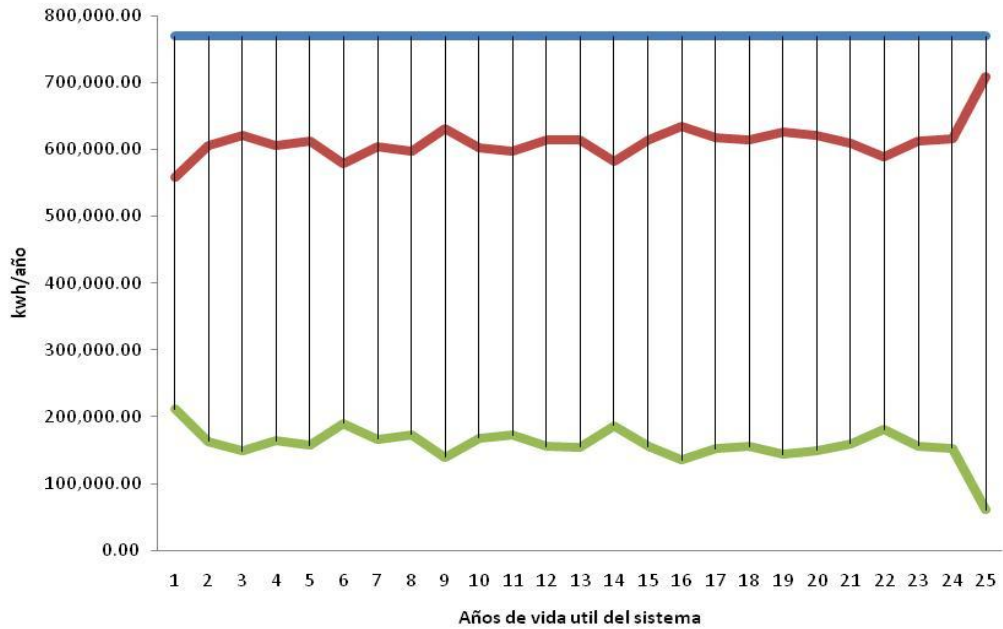


Figura 29. Gráfico de resultados que muestra el promedio anual de generación de energía eléctrica y su utilización para abastecer a la PTAR “EL Naranjo”, para un contenido de CH<sub>4</sub> del 50%.

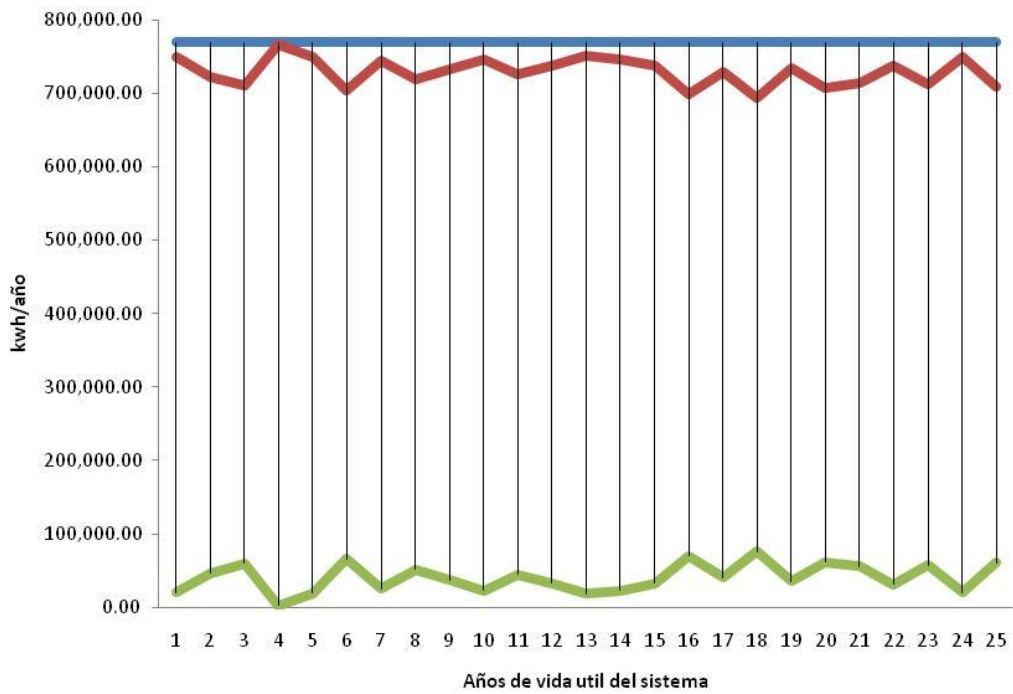


Figura 30. Gráfico de resultados que muestra el promedio anual de generación de energía eléctrica y su utilización para abastecer a la PTAR “El Naranjo”, para un contenido de CH<sub>4</sub> del 60%.

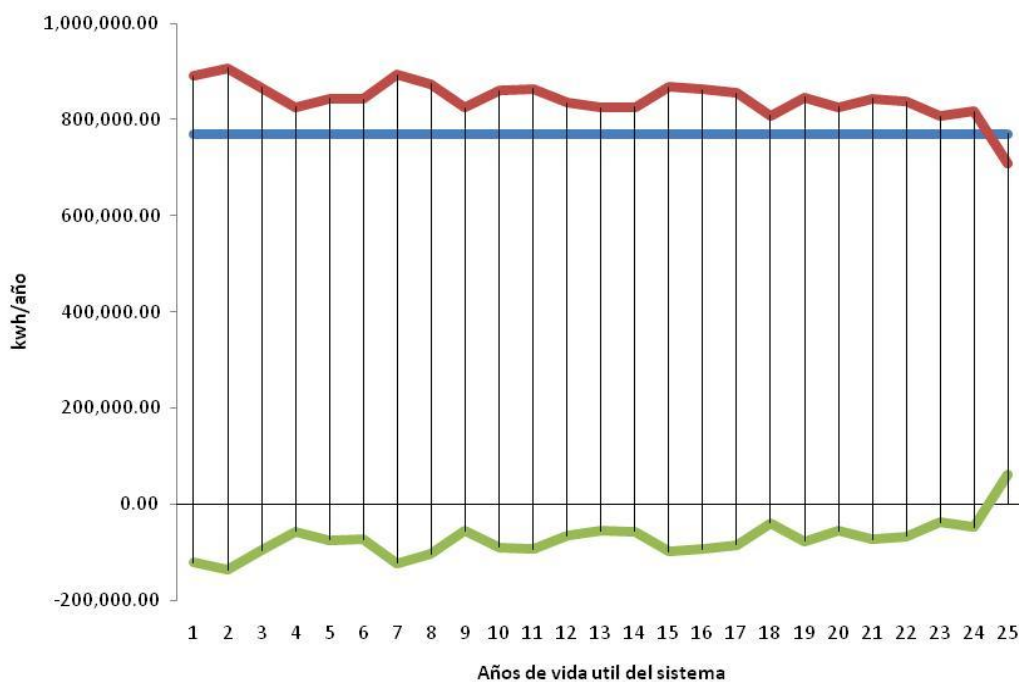


Figura 31. Gráfico de resultados que muestra el promedio anual de generación de energía eléctrica y su utilización para abastecer a la PTAR “El Naranja”, para un contenido de CH<sub>4</sub> del 70%.

En los gráficos (Figura 29, 30 y 31) se observa que la cantidad de energía eléctrica producida por el sistema de digestión anaerobia con recuperación energética en sus tres escenarios, contribuye al abastecimiento eléctrico de la PTAR “El Naranja”, es decir que no dependerá al 100% de la energía suministrada por CFE para satisfacer sus requerimientos energéticos (Cuadro XXIV).

Cuadro XXIV. Promedio mensual a 25 años de generación de energía eléctrica y del abastecimiento energético para la PTAR “El Naranja”, de acuerdo con la modelación realizada en STELLA (Elaboración propia).

Escenario	Promedio producción CH <sub>4</sub> (m <sup>3</sup> /mes)	Promedio requerimiento energético PTAR+ sistema (kwh/mes)	Promedio energía generada por el sistema (kwh/mes)	Porcentaje promedio de abastecimiento a PTAR (%)
A	130,382	769,511	611,262	79
B	155,517	769,511	728,885	92
C	181,325	769,511	842,043	109

Lo anterior indica que el modelo fue consistente con los datos obtenidos de la realización de los experimentos.

Es importante mencionar que aunque para la determinación del potencial de generación de energía se utilizaron tres escenarios, para la realización de los análisis de ACV y ACI, se consideraron únicamente los resultados obtenidos en el escenario B, pues de acuerdo con otros experimentos realizados bajo las mismas condiciones la cantidad obtenida de CH<sub>4</sub> es de 60%-65%.

La modelación demuestra la factibilidad de generación de energía eléctrica mediante la utilización de lodos residuales como materia prima, además de contar con beneficios adicionales como la disminución de GEI y por ende la disminución del impacto ambiental ocasionado por la gestión actual de estos lodos.

### **3.4 Impacto ambiental del sistema.**

El objetivo y alcance del ACV consistió en analizar el sistema de manejo de los lodos residuales de las PTAR de la ciudad de Ensenada, B. C. para los escenarios 1 y 2b, considerando desde que estos lodos se generan hasta su tratamiento y disposición en la PTAR “El Naranja”.

Las visitas de campo y la información resultante de los puntos 3.2 y 3.3, permitieron realizar el análisis del manejo de los escenarios con la finalidad de elaborar los diagramas de flujo para ambos escenarios.

En el manejo actual (escenario 1), los lodos residuales son transportados de las diferentes PTAR de la ciudad de Ensenada a la PTAR “El Naranja” donde son depositados en el espesador de lodos, junto con los lodos generados por esta PTAR; posteriormente son enviados a filtros banda donde se les añade poliacrilamina para su deshumidificación. El 1.3% de estos lodos deshumidificados son utilizados para elaborar composta y el resto son dispuestos en terrenos posteriores a la PTAR como relleno en tierra a cielo abierto, generando emisiones al aire (Figura 32).

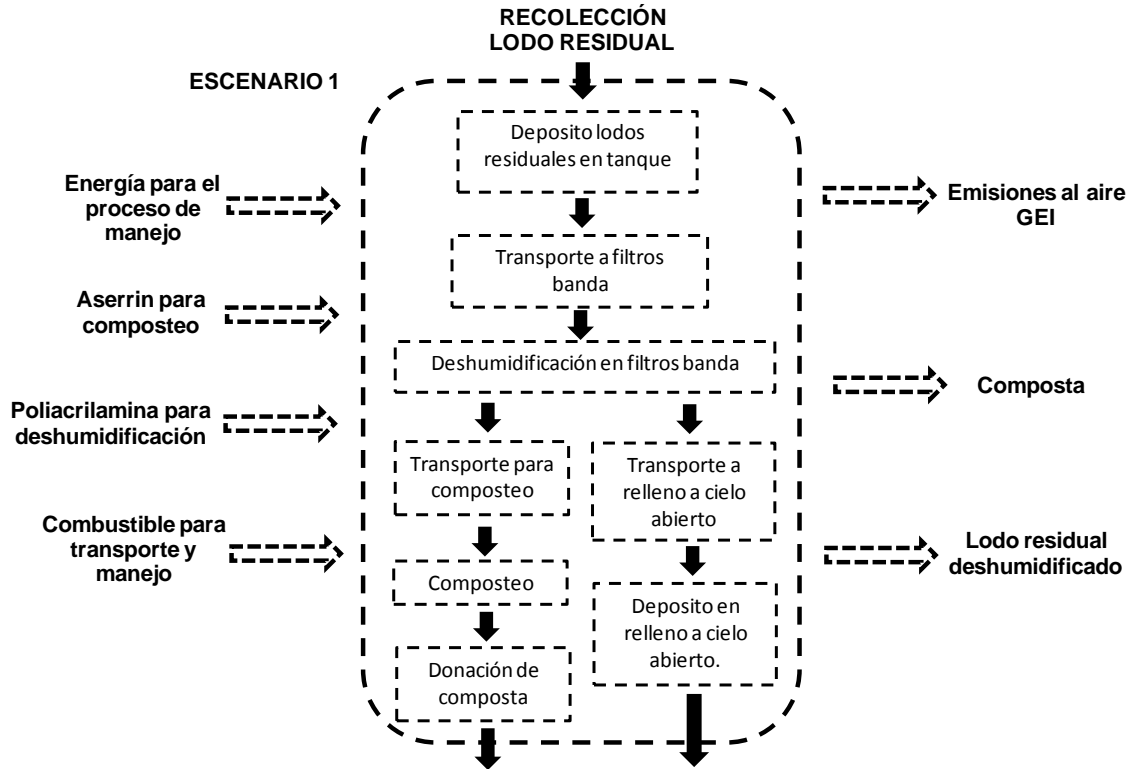


Figura 32. Diagrama de entradas, procesos y salidas para el sistema actual de gestión de lodos residuales en la PTAR “El Naranja” (Elaboración propia).

En el sistema de manejo propuesto (escenario 2b), los lodos residuales son transportados de las diferentes PTAR de la ciudad de Ensenada a la PTAR “El Naranja” donde son depositados en el espesador de lodos, junto con los lodos generados por esta PTAR. Posteriormente son enviados al digestor anaerobio, con la finalidad de digerirlos y producir la biogásificación. El 1.3% de los biosólidos resultantes son utilizados para elaborar composta y el resto puede ser aprovechado como fertilizante de cultivos ornamentales o bien depositado como relleno a cielo abierto puesto que, al haberse digerido, emitirán menos GEI. El biogás generado se limpia para eliminar el  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  y obtener  $\text{CH}_4$  casi puro, el cual es utilizado como combustible para generar energía eléctrica, y para abastecer los requerimientos energéticos de la PTAR (Figura 33).

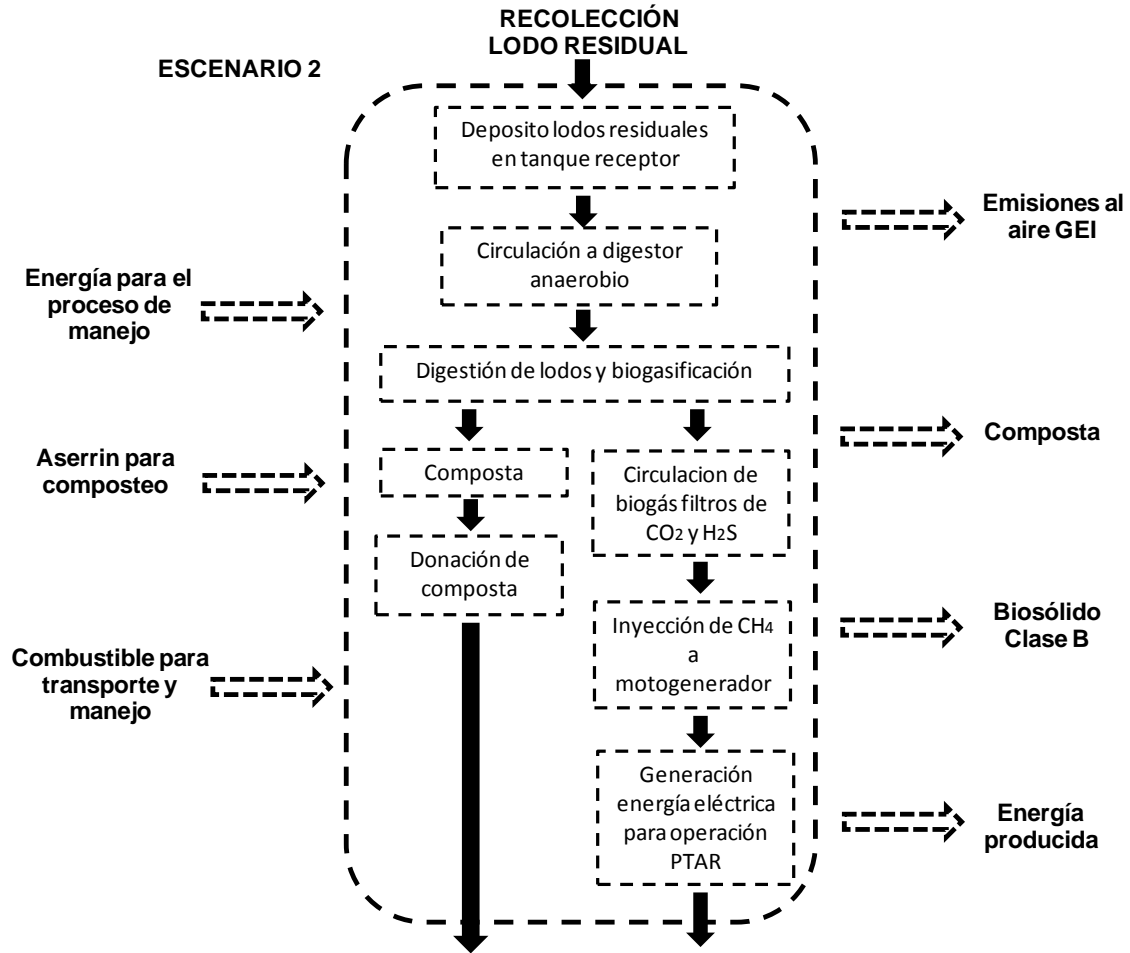


Figura 33. Diagrama de entradas, procesos y salidas para el sistema de digestión anaerobia con recuperación energética propuesto para la PTAR "El Naranja" (Elaboración propia).

Cabe mencionar que en Ensenada se trata el 100% de las aguas residuales recolectadas en el sistema de alcantarillado de la ciudad (CESPE, 2013), por lo que se consideró para ambos escenarios que la población total atendida es de 466,814 habitantes, con un total de 129,671 casas habitación cuyo promedio de habitantes por casa es de 3.6 (INEGI, 2012). Adicionalmente, como ya se ha mencionado, los lodos residuales generados anualmente son de 28,800 toneladas, lo que equivale a 62.7 kg por persona por año.

Con los datos anteriores, los cálculos realizados para este proyecto e información proporcionada por CESPE (2011b, 2011c y 2012b) se obtuvo el inventario para cada escenario (Cuadro XXV).

Cuadro XXV. Datos de entrada y salida para la realización del inventario y del ACV para los escenario 1 y 2b (Elaboración propia).

<b>Escenario 1</b>		<b>Escenario 2b</b>	
<b>Entradas</b>		<b>Entradas</b>	
Energía (manejo)	7,794,136 kwh/año	Energía (manejo)	9,234,136 kwh/año
Aserrín	90 ton/año	Aserrín	90 ton/año
Poliacrilamina	18,000 kg/año	-----	-----
Diesel (transporte)	28,953 litros/año	Diesel (transporte)	21,437 litros/año
<b>Salidas</b>		<b>Salidas</b>	
Emisiones al aire (GEI)	70,893,119 CO <sub>2</sub> -eq*	Emisiones al aire (GEI)	13,232,970 CO <sub>2</sub> -eq*
Composta	374 ton/año	Composta	374 ton/año
Lodos residuales deshumidificados	28,800 ton/año	Biosólido	16,704 ton/año
		Energía producida	8,160,480 kwh/año

\*Unidad de medición utilizada para indicar el potencial de calentamiento global de los GEI en comparación con el CO<sub>2</sub>.

Los datos del inventario al ser sometidos para su análisis al software IWM2 ver. 2003, arrojó como resultado las cantidades normalizadas en kg/año de las salidas del sistema (para ambos escenarios), clasificándolos por categorías (Residuos sólidos generados, Energéticos consumidos y GEI emitidos) (Cuadro XXVI).

Cuadro XXVI. Datos normalizados arrojados por el software IWM2, resultantes de la cantidad generada por categoría para el escenario 1 y 2b (Elaboración propia).

<b>Escenario 1</b>		<b>Escenario 2b</b>	
Residuos sólidos	294,360 kg/año	Residuos sólidos	170,300 kg/año
Energéticos	647,767 kg/año	Energéticos	212,132 kg/año
GEI	708,931 kg/año	GEI	132,330 kg/año

De acuerdo con los datos normalizados obtenidos del ACV mediante la utilización del software, se realizó la comparación por categoría con la finalidad de graficar los datos y observar el impacto para cada uno de los escenarios analizados (Figura 34).

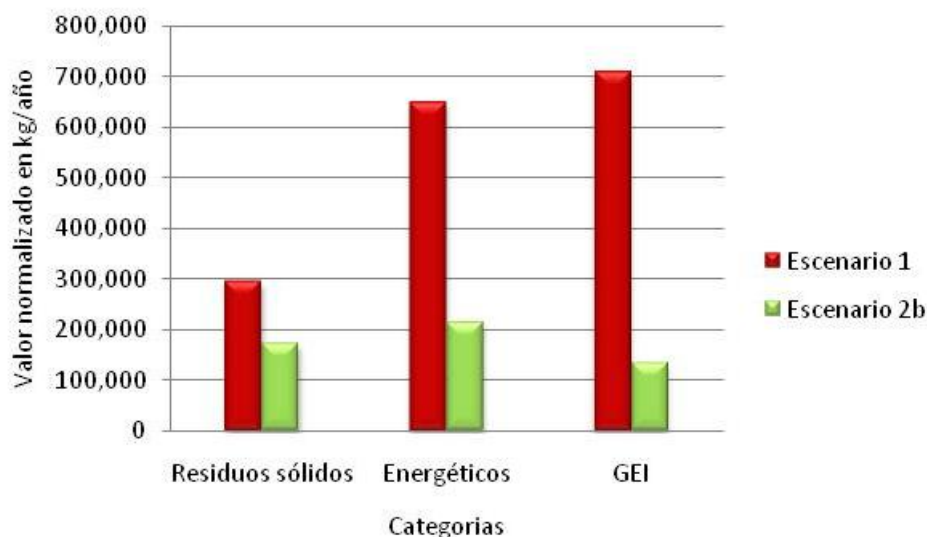


Figura 34. Gráfica comparativa de las cantidades en kg/año generadas por cada categoría para cada escenario (Elaboración propia).

Como se puede observar en la Figura 34, el escenario 2b consume menor cantidad de energéticos y genera menor cantidad de residuos sólidos y GEI que el escenario 1 (Cuadro XXVII).

Cuadro XXVII. Porcentaje de disminución para cada categoría del escenario 2b con respecto al escenario 1 (Elaboración propia).

Residuos sólidos	42%
Energéticos	67%
GEI	81%

Es importante mencionar que cada salida representada por una categoría constituye un impacto, es decir produce efectos nocivos sobre el medio ambiente (Cuadro XXVIII).

Cuadro XXVIII. Impacto que genera cada salida representada por una categoría (Información extraída de Renner, 2002; Hoof, 2008 y Perilhon, 2012).

Categoría	Impacto	Efecto nocivo
Residuos sólidos	Salud humana	Erupciones en la piel, irritación en los ojos y garganta, problemas pulmonares, asma e infecciones gastrointestinales.
	Calidad del ecosistema	Eco toxicidad, acidificación, eutrofización acuática y contaminación del suelo.
Energéticos	Agotamiento de los recursos naturales	Explotación no sustentable de fuentes energéticas no renovables.
GEI	Calentamiento Global	Efecto invernadero.

Para el caso del escenario 2b, al generar menor cantidad de residuos sólidos, disminuye los efectos nocivos a la salud que pudieran presentarse, así la calidad del ecosistema, contaminación del suelo y acidificación del océano por infiltraciones que pudieran presentarse. Adicionalmente el escenario 2b al generar su propia energía (energía renovable) mediante la utilización de biogás (biocombustible), disminuye la explotación de fuentes energéticas no sustentables y por ende la emisión de GEI, que se ve reflejado en la contribución al efecto invernadero.

Por lo anterior como resultado de la aplicación del ACV, el instalar un sistema de digestión anaerobia con recuperación energética representa una disminución en el impacto ambiental del **69%** con respecto al manejo actual de lodos residuales, ya que la implementación de este sistema disminuye la cantidad de residuos sólidos generados, la energía no renovable consumida para la realización de sus procesos y los GEI emitidos a la atmosfera.

### 3.5 Percepción social.

El análisis de percepción social, permitió estudiar la historia de la PTAR “El Naranjo” y el crecimiento población de la zona donde se encuentra ubicada; teniendo que en 1997, cuando la PTAR “El Naranjo” se comenzó a construir no existía población aledaña y los terrenos cercanos eran parcelas para siembra. En la Figura 35 se presenta una línea de tiempo donde se puede observar el crecimiento población alrededor de la PTAR de 2004 a 2011.



Figura 35. Línea de tiempo del crecimiento población alrededor de la PTAR "El Naranjo" de 2004 a 2011 (Fotografías tomada de Google Earth, 2012; Elaboración propia).

La línea de tiempo (Figura 35) nos muestra que aunque la PTAR fue construida inicialmente fuera de la zona urbana, el crecimiento poblacional llegó hasta donde se encuentra la PTAR y por lo tanto ahora existe una interrelación continúa entre su operación y los habitantes de la zona.

La realización de la línea de tiempo y del análisis poblacional, permite observar que del 2004 al 2012 hubo un incremento de casas habitación en la zona de influencia de un 47% (171 habitantes) lo que significa un incremento promedio anual del 6.7% que se traduce en 5 nuevas casas habitación por año con un total de 15 nuevos habitantes por año.

Lo anterior indica que existe una interacción de los habitantes de la zona de influencia con la operación de la PTAR “El Naranjo”, así como la participación de otros actores involucrado en la operación de la PTAR (Cuadro XXIX); para tener un análisis de percepción completo es necesario considerarlos a todos en el estudio.

Cuadro XXIX. Cuadro de actores involucrados en el sistema actual de la PTAR “El Naranjo” y el sistema de digestión anaerobia con recuperación energética propuesto.

<b>ACTORES</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>INTERRELACIÓN</b>
<b>Habitantes de la zona de influencia</b>	Se ven afectados por los olores y ruido generado por la operación de la PTAR y la generación de nuevos proyectos.	De acuerdo con Renner (2002), los habitantes de la zona de influencia se ven afectados o beneficiados por la eficiencia del manejo de la PTAR y de los sistemas que incorporen a sus procesos.
<b>CESPE</b>	Es el operador de las PTAR de la ciudad, incluyendo “El Naranjo”, ellos deciden la implementación de nuevos sistemas.	Deben de cuidar los aspectos sociales de la operación de la PTAR, así como de los sistemas que implementen para mejorar su manejo.
<b>CFE</b>	Son los administradores de la generación y utilización de la energía eléctrica, aprueban y regulan la autogeneración.	Aprueba que las instituciones o empresas sean autogeneradores y regulan la cantidad y uso de la energía eléctrica generada.

El resultado de analizar cada una de las entrevistas realizadas a los actores involucrados se presenta a continuación.

### 3.3.1 Categoría conocimiento.

Como ejemplo de las entrevistas para la categoría de conocimiento se presenta el siguiente extracto:

*“Todavía no funcionaba la planta de tratamiento, como que había ciertas cosas construidas ahí, pero ni si quiera sabíamos que iba a ser una planta de tratamiento pensamos que iban a ser unas maquilas o una nave industrial, nadie sabía de la gente de aquí ni tampoco nos dijeron cuando nos vendieron los terrenos, nada más nos vendieron y nos dijeron que iban a pasar una calle principal por ahí, cerca de la casa y ya, pero la calle principal pues ahorita es la que da a la planta esa de tratamiento que es la calle famosa esa principal que está llena de hoyos y baches”.*

El resultado de analizar la información proporcionada por los entrevistados es:

El Gobierno del estado de Baja California a través de la CESPE compró 20 hectáreas a un particular para la construcción de la PTAR “El Naranja” en 1992, con la finalidad de que la PTAR estuviese alejada del centro poblacional. En 1997 el dueño de los terrenos aledaños a la PTAR “El Naranja” comenzó a venderlos a particulares, principalmente a retirados de la guarnición militar del CIPRES. Los particulares que adquirieron esos terrenos no se percataron de que la construcción existente era una PTAR, pues solo se fijaron en el precio al que les ofrecían los terrenos (entre \$5,000 y \$8,000 pesos) y el vendedor no les mencionó nada sobre la existencia de la PTAR. Los habitantes de la zona se dieron cuenta de que era una PTAR debido a que comenzaron a pasar constantemente camiones de CESPE y por rumores de vecinos. Los habitantes de la zona de la PTAR desconocen el proceso de tratamiento de las aguas residuales y no se han puesto a pensar sobre cómo se llevara a cabo, ya que creen es responsabilidad de la CESPE, que las aguas residuales se traten adecuadamente. Tampoco saben con exactitud en qué utilizan el agua tratada, piensan la utilizan para regar las parcelas experimentales que tienen ahí o que con eso riegan los jardines y áreas verdes de los edificios del gobierno.

Los habitantes creen que es un beneficio que se trate el agua residual por que la limpian y esta puede reutilizarse, sin embargo no creen tener beneficio

alguno por vivir cerca de una PTAR, ya que no cuentan con drenaje y agua blanca independiente (cuentan con una toma comunal instalada por la CESPE).

Los habitantes saben que existe un tanque dentro de las instalaciones de la PTAR que dice peligro, creen que son químicos utilizados para el tratamiento del agua pero desconocen su peligrosidad y el tipo de reactivos químicos que sean.

Saben por los periódicos que el agua tratada ha querido ser enviada a los cultivos de Maneadero pero no se ha llegado a un acuerdo con los agricultores sobre el precio del agua.

Los habitantes de la zona no saben de la existencia de los lodos residuales, suponen que esos lodos es la tierra que se deposita en un terreno junto al cerro que se ve desde sus casas, porque siempre ven muchas máquinas moviendo tierra muy oscura. Creen que si esos lodos son depositados ahí es porque no generan efectos adversos al medio ambiente o a la salud.

Se ha visto que de uno de los tanques que está cerca de la calle en ocasiones sale agua espesa que creen tiene excremento y que cuando llueve se escurre por la calle principal y les preocupa que pueda perjudicar a su salud.

Los habitantes de la zona creen que sí deberían de poder reutilizar esos lodos para evitar escurrimientos que puedan afectar a sus casas y a su salud.

El mapa conceptual representativo de esta categoría se presenta en la Figura 36.

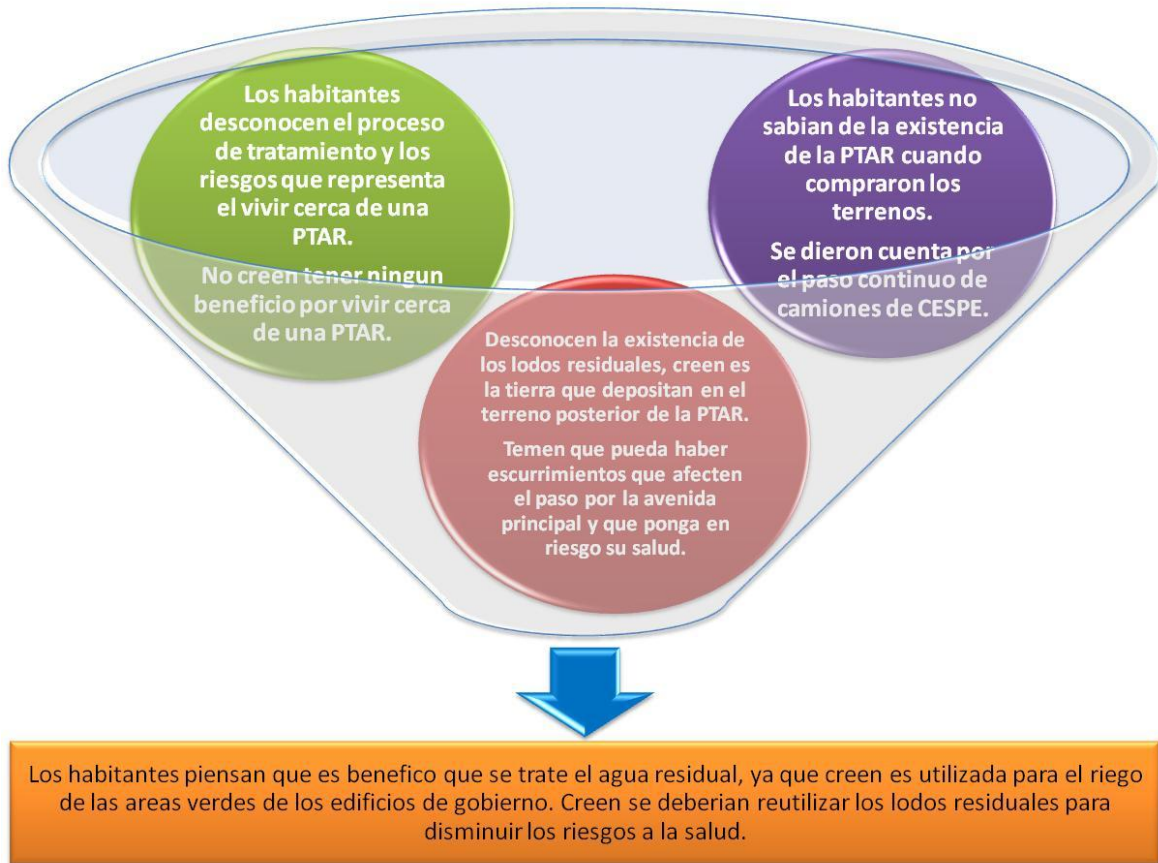


Figura 36. Marco conceptual resultante del análisis de percepción sobre la categoría de “Conocimiento” (Elaboración propia).

### 3.3.2 Categoría efectos.

Un ejemplo sobre la percepción de los entrevistados para la categoría efectos es el siguiente:

*“Pues la calidad de vida ha sido, pues no muy buena porque no hay pavimento para empezar, ya llevamos aquí viviendo como desde el 96, desde que empezamos a construir aquí nuestra casa, no hay pavimento no hay drenaje todavía tenemos fosa séptica y aparte de eso no hay, no hay este red de agua, tenemos poco tiempo con el agua que nos la pusieron, entonces pues ha sido muy precaria, muy baja la calidad de vida y luego con los olores que no los aguantamos ahí de la planta de tratamiento pues peor. Por lo regular en las tardes es cuando hueles mas la ropa se apesta se impregna el olor, huele como a cañería”.*

El resultado de analizar la información proporcionada por los entrevistados para esta categoría es:

Los habitantes consideran que los olores son muy fuertes (como a cañería), se impregna en su ropa y suele pasar en promedio dos semanas por mes, generalmente entre 6 y 9 de la noche y cuando existe mucha brisa o hace mucho calor. Aunque al principio lo percibían más, ya se han acostumbrado al olor y tratan de realizar sus actividades cotidianas sin prestarle demasiada atención. El olor también ha ocasionado que se presenten moscas o vectores.

Cuando el olor es más intenso es cuando los habitantes presentan dolores de cabeza, incluso algunos que dicen ser más sensibles sienten náuseas e irritación en sus ojos. Sin embargo creen ya ha disminuido los efectos pues su cuerpo se acostumbró con el paso del tiempo.

Han escuchado comentarios sobre que el olor no lo perciben nada más los habitantes cercanos a la PTAR sino que ocasionalmente también en colonias que se encuentran a más de 1 o 2 km de distancia de la PTAR.

Creen que las PTAR deberían estar alejadas de las zonas poblacionales y que deberían de consultar con el gobierno el desarrollo futuro de los centros habitacionales para evitar que afecte a los habitantes.

Piensan que la CESPE podría poner unos filtros que ayudaran a disminuir el olor, para que no les perjudicara.

Existen parcelas experimentales donde se cultiva flor, principalmente girasol y cuando realizan la fumigación el olor alcanza a llegar a las casas cercanas y afecta a los habitantes. También ha aumentado la irritación en los ojos por los agroquímicos que utilizan en la parcela experimental.

Desconocen si existe un efecto negativo para su salud al vivir cerca de una PTAR, inclusive dicen que puede haber la posibilidad de que cuando se enferman y atribuyen su padecimiento a otras cosas, pudiera ser por vivir cerca de una PTAR, sin embargo lo desconocen y tampoco han averiguado. Creen además de que el gobierno los alertaría de los riesgos si existieran.

Los habitantes consideran que sí les ha afectado a su salud el vivir cerca de una PTAR, pues sienten que la frecuencia de enfermedades leves es mayor ahora que cuando vivían en otro lugar.

Los habitantes consideran que más que el ruido de la operación de la PTAR, son el ruido de los camiones, pipas y vehículos de CESPE que pasan por la calle principal.

En ocasiones se alcanza a escuchar el ruido de los equipos con los que operan la PTAR, pero ya se acostumbraron y no le prestan atención.

Los habitantes consideran que al vivir cerca de una PTAR debieran de tener mayor acceso a los servicios públicos, sin embargo la calle principal (construida para acceder a la PTAR) es la única pavimentada pero se encuentra llena de baches (lo que afecta la ruta y disponibilidad del transporte) y el paso continuo de los vehículos de CESPE levanta mucho polvo. Tampoco cuentan con una toma individual de agua blanca (cuentan con una toma comunal) y aún no tienen drenaje, siendo que existe a menos de 500 metros una PTAR.

Creer que el que vivan cerca de una PTAR afecta a la economía de la colonia pues por los olores, moscas y ruido, han querido poner varios negocios incluyendo de comida, pero no han funcionado, solamente cuentan con una tienda de abarrotes pequeña y una papelería.

El mapa conceptual representativo de esta categoría se presenta en la Figura 37.

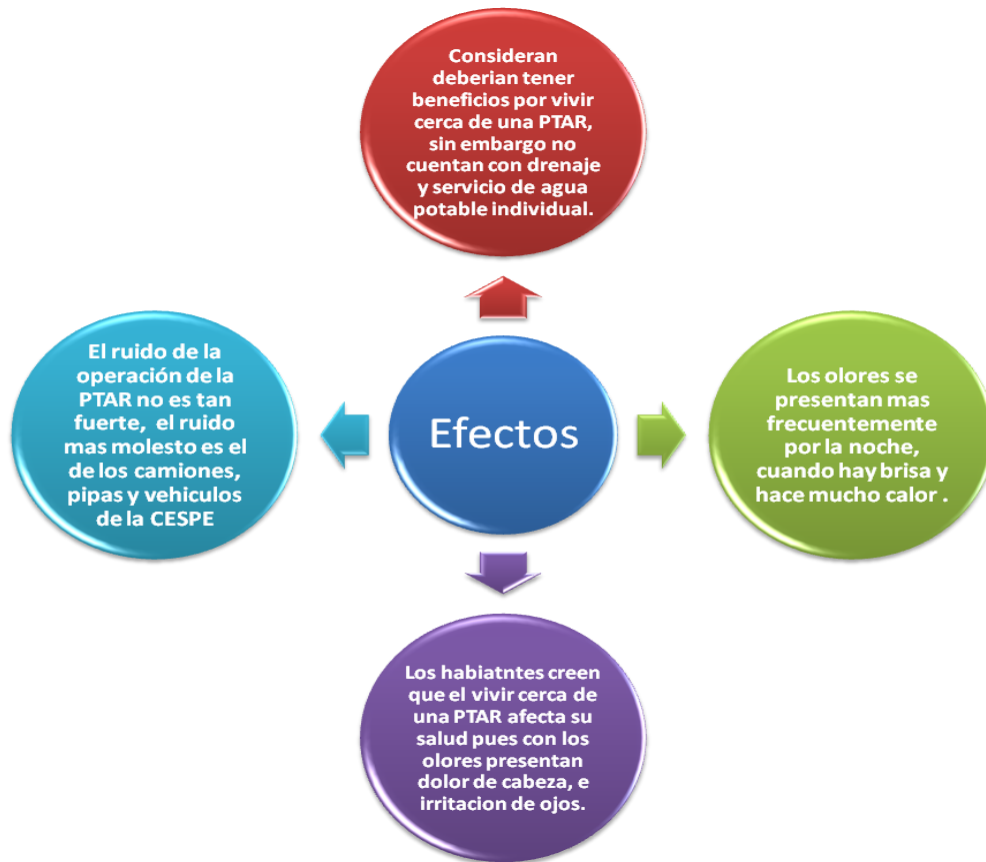


Figura 37. Marco conceptual resultante del análisis de percepción sobre la categoría de “Efectos” (Elaboración propia).

### 3.3.3 Categoría relación vecinos-gobierno.

En cuanto a la incorporación de un nuevo sistema en la PTAR uno de los entrevistados indicó:

*“Pues yo digo que estaría bien o sea bien si no afectará la vida de tanto o sea como usted dice que lo van a concentrar todo en un solo lugar para que no lo pongan en el monte ese, que se ve desde aquí y que tuvieran controlado el olor porque sí es muy desagradable pero pues yo digo que estaría bien no siento que sería una mala inversión”.*

El resultado del análisis para esta categoría es:

Cuando los habitantes se percataron de que vivían cerca de una PTAR se juntaron y designaron a un representante.

Elaboraron una carta de petición para que les dijeran los riesgos que implicaba vivir cerca de una PTAR. Llevaron la carta a las oficinas de CESPE pero nunca tuvieron respuesta, y ningún representante de CESPE se acercó a ellos para platicar sobre sus inconformidades y preocupaciones.

Después reunieron firmas y solicitaron la reubicación de la PTAR pues los olores eran muy fuertes, argumentando que por qué habían construido una PTAR tan cerca de una zona poblacional. CESPE contestó que ellos construyeron cuando no era una zona poblada y que no podían hacer nada para evitar que el dueño de los terrenos colindantes los vendiera a particulares.

Los habitantes han tenido problemas porque los trabajadores y camiones de CESPE pasan muy rápido sobre la calle principal, y han estado a punto de atropellar a gente u ocasionar accidentes con otros vehículos. Sin embargo no han expuesto su queja porque creen harán caso omiso las autoridades y les echarán la culpa a ellos.

Los habitantes no quisieran que se realizaran más construcciones (edificios grandes o sistemas nuevos), sin embargo están dispuestos a que el gobierno les presente el proyecto y si representa el aprovechar un residuo o el que disminuyan los olores, ruidos y riesgos para su salud y el ambiente, están dispuestos a aceptar una nueva construcción. Creen que de todas formas si CESPE decide realizar nuevas construcciones lo va a hacer aunque ellos no estén de acuerdo.

El mapa conceptual representativo de esta categoría se presenta en la Figura 38.

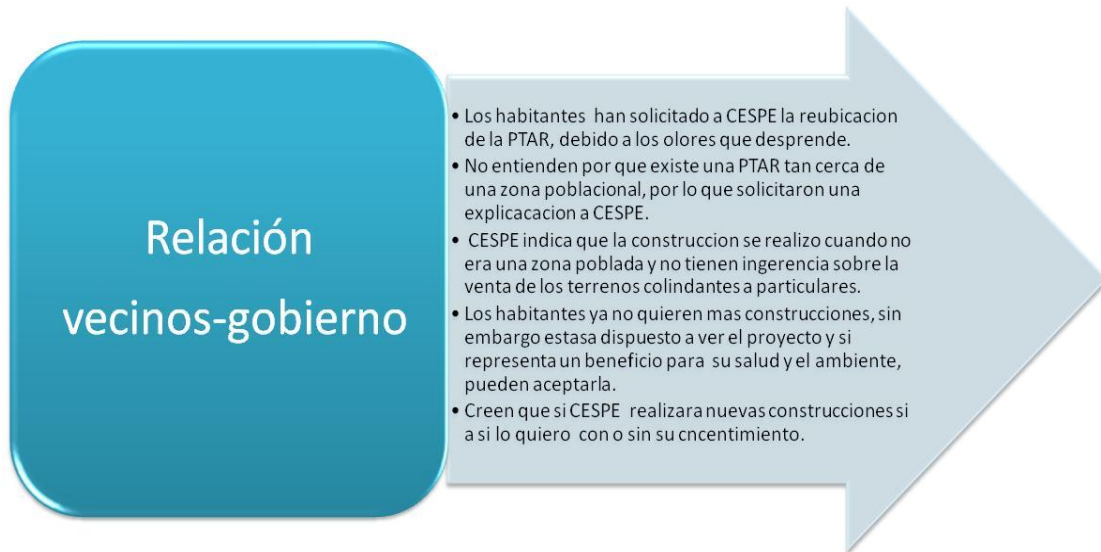


Figura 38. Marco conceptual resultante del análisis de percepción sobre la categoría de “Vecinos-gobierno” (Elaboración propia).

Una vez que se tienen todos los diagramas por categoría se elaboró el diagrama general de actores, en este caso el de Habitantes de la zona de influencia (Figura 39).

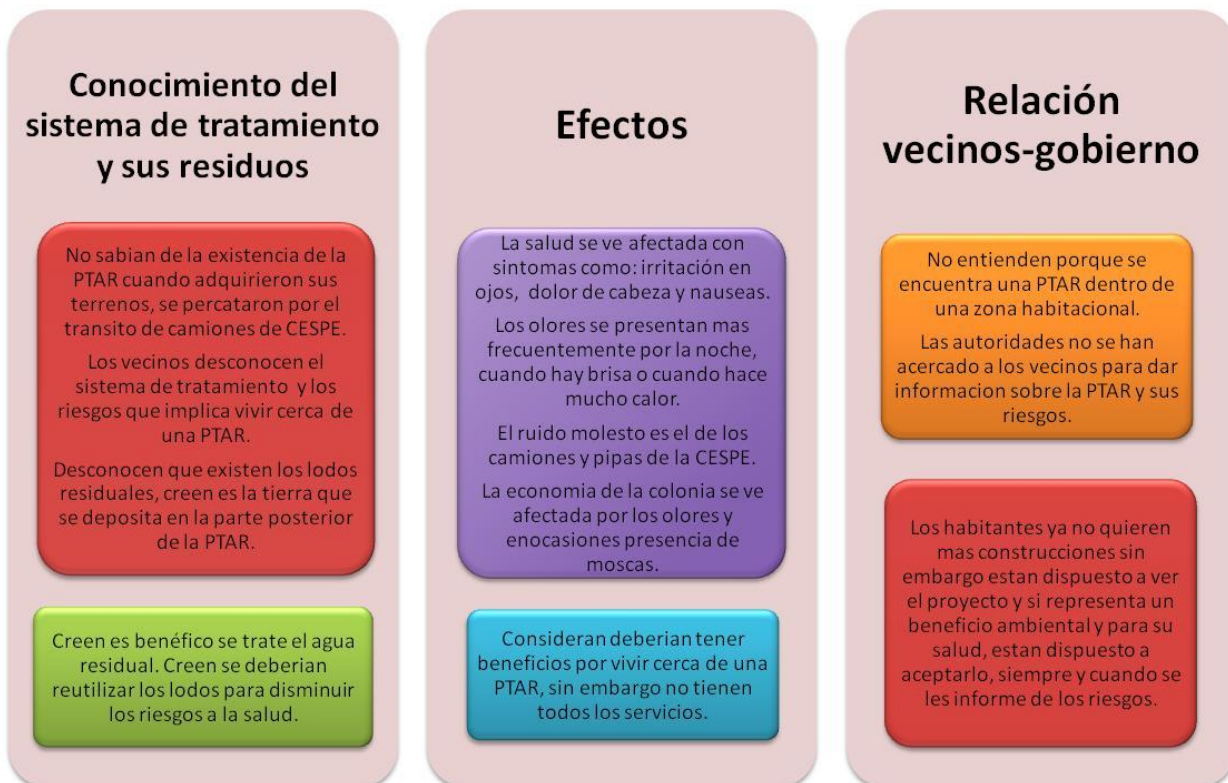


Figura 39. Marco conceptual resultante del análisis de percepción de actores Habitantes de la zona de influencia (Elaboración propia).

### **3.3.4 CESPE, CFE e Institución Educativa.**

#### **CESPE**

Cuando se comenzó con la construcción de la PTAR no existía población cercana por eso fue que se decidió colocarla en este sitio. Sin embargo, años después el propietario de los terrenos colindantes vendió los terrenos a particulares para la construcción de casas habitación. Actualmente la colonia adyacente se denomina Praderas del Ciprés II.

En el proyecto original, la PTAR estaba diseñada para generar un mínimo de lodos residuales que serían estabilizados mediante el composteo. Una vez que entró en operación, el funcionamiento no fue el esperado, por lo que tuvieron que adquirirse filtros banda y aprovechar el equipo para estabilizar los lodos de las otras PTAR de la ciudad. Actualmente una parte de los lodos se utiliza para hacer composta y la otra se deposita en terrenos posteriores, el cual desde 1999 a la fecha ha incrementado en 12 metros el nivel sobre terreno natural.

Los lodos residuales son un problema grave pues han ido en aumento e implica un gasto para su manejo y disposición.

Se ha platicado con un representante de los vecinos pues se quejan del ruido y del olor, sin embargo no es posible modificar el proceso de operación de la PTAR, por eso en un inicio se había puesto fuera de la ciudad, para evitar problemas con los habitantes. Sin embargo deben de ver que es un beneficio ambiental el que se trate el agua residual. La PTAR “El Naranja” es la más estable de las PTAR de la ciudad y no da problemas.

La PTAR no tiene nada que ver en la colocación de servicios públicos para los habitantes de la zona, ellos tienen que realizar su trámite en las oficinas correspondientes.

La PTAR colabora en diferentes proyectos para la generación de nuevo conocimiento, como la parcela experimental (producto flor riego con agua residual tratada) que comenzó en 2010 y sirvió como zona de amortiguamiento entre CESPE y los habitantes cercanos. En octubre de 2012 se terminó el proyecto y no se generó ningún riesgo o peligro para los habitantes.

No se tiene ningún convenio con CFE, el suministro eléctrico se paga mensualmente, adicionalmente se lleva un control del gasto y de la eficiencia de los equipos.

Se ha contemplado la instalación de deshidratadores para disminuir el volumen de los lodos y que sea más fácil manejarlos pero no se obtuvo el financiamiento del gobierno. En el caso de los digestores anaerobios son proyectos interesantes que presentan una solución; sin embargo, el problema es la inversión inicial, aun así la CESPE está dispuesta a verificar el proyecto que debe de contemplar la factibilidad financiera y social. Los proyectos que involucren los procesos sustentables son importantes para CESPE y más si se puede ahorrar consumo energético.

## **CFE**

CFE cuenta con tecnologías combinadas para la producción de energía eléctrica. El desarrollo de proyectos y el control de los retos de generación y distribución son controlados por CENACE (Centro Nacional para el Control de la Energía Eléctrica) que se encarga de verificar la compra-venta de energía, así como su demanda para distribución.

Actualmente el 11.74% de las fuentes utilizadas por CFE a nivel nacional para la generación de energía son fuentes renovables, además es importante considerar la eficiencia, ya que hay que esta depende de la perdida térmica, mantenimiento y operación de la tecnología utilizada.

CFE se encuentra en proceso de acreditación ISO 14000 pues pretende disminuir el impacto ambiental al momento de la generación y distribución de energía. Adicionalmente cuenta con programas que permitirán que la gente utilice mejor la energía.

CFE cuenta con el proyecto para la instalación de 25 aerogeneradores en el valle de Mexicali, lo que contribuirá a que se incrementen las fuentes de energía renovables utilizadas para la generación de energía eléctrica en el estado de Baja California.

Los propietarios de casas habitación pueden ser autogeneradores, es decir generar su propia energía eléctrica. Para poder ser autogeneradores tienen que

hacer una solicitud a CFE donde indiquen la fuente de energía a instalar y la capacidad de generación; se le coloca un medidor inverso para medir la cantidad de energía que consume de la fuente propia y la cantidad que consume de la CFE, cobrándole solamente el consumo de energía suministrada por CFE. No se ha dado el caso de ninguna casa habitación que produzca el 100% de la energía que necesita, pues la inversión es grande.

En el caso de empresas o instituciones el procedimiento de solicitud es el mismo. Cuando las empresas o industrias generan MW (mega watts) entonces se convierten en cogeneradores en donde no sólo se mide la energía que producen sino el excedente se reintegra a las líneas de CFE para ser distribuida.

Los casos de casas habitación en el país que generan su propia energía han sido aislados y por lo general son personas del área rural o de las periferias de ciudades. En el caso de empresas el ejemplo que se tiene aquí en Baja California es la de TOYOTA en Tecate quienes generan su propia energía y el excedente lo integran a las líneas de CFE.

Para que CFE utilice más fuentes renovables de energía es necesario contar con inversionistas pues la inversión inicial de este tipo de proyecto es elevada.

### **INSTITUCIÓN EDUCATIVA (Secundaria)**

Los Maestros entrevistados consideran que es benéfico que la escuela se encuentre cerca de una PTAR pues puede servir para llevar a los alumnos a una visita que ayude en el aprendizaje de temas de física y química.

Muchos de los alumnos viven en esta zona y algunos muy cerca de la PTAR, por lo que se les hace interesante que puedan entrar a la PTAR y conocer sobre su funcionamiento.

Creer que es un beneficio para la sociedad y el medio ambiente que se trate el agua residual, inclusive están dispuestos a apoyar la realización de nuevos proyectos. Piensan que podrían derivar en la pavimentación de las calles y la cobertura de servicios públicos, ya que actualmente no cuentan con drenaje.

Crean que si se instalara un proyecto de digestión para aprovechar los lodos residuales sería muy interesante y esto también ayudaría a que se pudieran organizar visitas a la PTAR para que los alumnos aprendieran sobre esos sistemas.

Piensen que si se instalara un sistema de digestión con recuperación energética, no solo derivaría en un beneficio ambiental sino también en un beneficio para la institución pues podrían ahorrar dinero en el pago de la electricidad, incluso los vecinos también podrían beneficiarse.

No han tenido quejas por parte de los alumnos o padres de familia por encontrarse tan cerca de una PTAR y durante el tiempo que duran las clases (turno matutino) no se percibe ningún olor ni se escucha ruido.

El resultado de percepción en conjunto se presenta en la Figura 40.



Figura 40. Marco conceptual resultante del análisis de percepción del actor Habitantes de la zona de influencia (Elaboración propia).

Por último se realizó el diagrama general donde se presentan los puntos de percepción comunes y los de cada actor (Figura 41).



Figura 41. Marco conceptual resultante del análisis de percepción de actores Habitantes de la zona de influencia (Elaboración propia).

Es importante recordar que durante el análisis de percepción también se incluyó la componente del sentir de la gente. Uno de los entrevistados comentó:

*“Pues lo único, lo único que me molesta de vivir aquí es el puro olor que sale de la planta y que por las noches es cuando más se huele, por lo demás estoy tranquilo, a gusto”.*

Por su parte otro de los entrevistados mencionó:

*“Aquí molesta el ruido y el olor no sé si afecta mi salud pero he vivido tranquilo aunque a los vecinos pues no les gusta que estén cerca una planta de tratamiento. Más bien lo que me preocupa es un tanque que se ve desde aquí que no se qué contenga que dice precaución, me da miedo que explote o algo así, pero la verdad no me he acercado a investigar y cuando llueve mucho se desbordan los tanques y sale como lodo o agua negra hacia la calle principal pero gracias a Dios nunca ha pasado nada”.*

Aunado a lo anterior un habitante indicó:

*“Me molesta que no tengamos un servicio constante e individual de agua, tenemos una toma comunitaria y es un problema con los vecinos porque no todos pagan a tiempo, tampoco tenemos drenaje, tenemos fosa séptica y pues se me hace bien ilógico que tengamos enfrente una planta de tratamiento de aguas residuales y no tengamos drenaje. Ah y también con sus pesticidas que le echan a los girasoles, es un horror porque huele muy feo y duele la cabeza eso sí es todo el día en la mañana, pero la fosa séptica casi nada mas en la tardes en la noche pero ahora sí que uno llega y no lo nota, a pesar de todo es un lugar tranquilo para vivir”.*

El sentir de la gente entrevistada resalta que viven tranquilos, sin embargo creen que podrían tener todos los servicios al estar cerca de una PTAR, no consideran tener beneficio alguno por vivir en esa zona y, aunque en ocasiones se incrementa el olor, ya se acostumbraron. Los habitantes consideran que ocasionalmente el dolor de cabeza e irritación de ojos se debe a la PTAR, pero no pueden confirmarlo pues ya se ha vuelto parte de su vida cotidiana.

Cabe mencionar que para la realización del ACI se preguntó a los habitantes de la zona sobre el nivel de importancia que representaba para ellos cada una de las metas planteadas, lo que demuestra que en los proyectos que se realizan bajo el marco de la sustentabilidad las vertientes de ambiente, sociedad y economía van íntimamente ligadas. A continuación se presentan los resultados del ACI.

### 3.6 Costo-impacto y valoración económica del sistema de digestión con recuperación energética.

Mediante el análisis de percepción social y el análisis de todos los costos implicados en el manejo actual de los lodos residuales (alternativa 1) y del sistema propuesto (alternativa 2b), se obtuvieron las tablas de flujo de costos para 10 años (Cuadro XXX y Cuadro XXXI) y 25 años (Cuadro XXXII y Cuadro XXXIII), para cada alternativa respectivamente.

Cuadro XXX. Flujo de costos a 10 años de la PTAR “El Naranja” para la alternativa 1 en pesos mexicanos (Información proporcionada por CESPE (2012a, 2012b; elaboración propia).

COSTOS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>COSTOS DE INVERSION</b>											
Edificio filtros banda	\$ 1,500,000.00										-\$ 750,000.00
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 1,500,000.00</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>-\$ 750,000.00</b>
<b>COSTOS DE MANTENIMIENTO</b>											
Mantenimiento edificio y filtros banda		\$ 224,670.77	\$ 234,780.95	\$ 245,346.10	\$ 256,386.67	\$ 267,924.07	\$ 279,980.65	\$ 292,579.78	\$ 305,745.87	\$ 319,504.44	\$ 333,882.14
<b>SUBTOTAL</b>		<b>\$ 224,670.77</b>	<b>\$ 234,780.95</b>	<b>\$ 245,346.10</b>	<b>\$ 256,386.67</b>	<b>\$ 267,924.07</b>	<b>\$ 279,980.65</b>	<b>\$ 292,579.78</b>	<b>\$ 305,745.87</b>	<b>\$ 319,504.44</b>	<b>\$ 333,882.14</b>
<b>COSTOS DIRECTOS</b>											
Sueldos y Salarios		\$ 230,522.06	\$ 492,887.44	\$ 517,531.82	\$ 266,858.10	\$ 280,201.01	\$ 294,211.06	\$ 308,921.61	\$ 324,367.69	\$ 340,586.07	\$ 357,615.38
Consumo de electricidad filtros banda		\$ 356,129.42	\$ 372,155.24	\$ 388,902.23	\$ 406,402.83	\$ 424,690.96	\$ 443,802.05	\$ 463,773.14	\$ 484,642.93	\$ 506,451.86	\$ 529,242.20
Polimeros (poliacrilamina)		\$ 1,374,051.01	\$ 1,435,883.31	\$ 1,500,498.06	\$ 1,568,020.47	\$ 1,638,581.39	\$ 1,712,317.55	\$ 1,789,371.84	\$ 1,869,893.57	\$ 1,954,038.79	\$ 2,041,970.53
Renta de maquinaria y equipo con operador		\$ 2,382,872.35	\$ 2,490,101.61	\$ 2,602,156.18	\$ 2,719,253.21	\$ 2,841,619.60	\$ 2,969,492.48	\$ 3,103,119.65	\$ 3,242,760.03	\$ 3,388,684.23	\$ 3,541,175.02
<b>SUBTOTAL</b>		<b>\$ 4,343,574.84</b>	<b>\$ 4,791,027.60</b>	<b>\$ 5,009,088.28</b>	<b>\$ 4,960,534.61</b>	<b>\$ 5,185,092.95</b>	<b>\$ 5,419,823.14</b>	<b>\$ 5,665,186.24</b>	<b>\$ 5,921,664.23</b>	<b>\$ 6,189,760.96</b>	<b>\$ 6,470,003.13</b>
<b>COSTOS INDIRECTOS</b>											
Sueldos y salarios administrativos		\$ 64,633.12	\$ 67,864.78	\$ 71,258.02	\$ 74,820.92	\$ 78,561.97	\$ 82,490.06	\$ 86,614.57	\$ 90,945.30	\$ 95,492.56	\$ 100,267.19
Papelaria y generales		\$ 41,086.09	\$ 42,934.96	\$ 44,867.04	\$ 46,886.05	\$ 48,995.92	\$ 51,200.74	\$ 53,504.77	\$ 55,912.49	\$ 58,428.55	\$ 61,057.84
Consumo energía administracion		\$ 372,146.72	\$ 388,893.32	\$ 406,393.52	\$ 424,681.23	\$ 443,791.89	\$ 463,762.52	\$ 484,631.84	\$ 506,440.27	\$ 529,230.08	\$ 553,045.44
<b>SUBTOTAL</b>		<b>\$ 477,865.94</b>	<b>\$ 499,693.07</b>	<b>\$ 522,518.58</b>	<b>\$ 546,388.21</b>	<b>\$ 571,349.78</b>	<b>\$ 597,453.33</b>	<b>\$ 624,751.18</b>	<b>\$ 653,298.06</b>	<b>\$ 683,151.20</b>	<b>\$ 714,370.46</b>
<b>COSTOS DE HABITANTES DE LA ZONA</b>											
Medicamentos por problemas salud		\$ 79,192.08	\$ 85,527.45	\$ 88,681.27	\$ 91,792.33	\$ 95,005.39	\$ 97,876.22	\$ 100,813.43	\$ 103,837.88	\$ 106,953.02	\$ 110,161.61
Riesgo por incendio o explosion		\$ 1,738,458.56	\$ 1,956,887.46	\$ 2,106,915.03	\$ 2,253,864.54	\$ 2,400,675.54	\$ 2,491,401.00	\$ 2,579,602.61	\$ 2,667,690.64	\$ 2,755,773.57	\$ 2,843,856.26
<b>SUBTOTAL</b>		<b>\$ 1,817,650.64</b>	<b>\$ 2,042,414.91</b>	<b>\$ 2,195,596.30</b>	<b>\$ 2,345,656.88</b>	<b>\$ 2,495,680.93</b>	<b>\$ 2,589,277.22</b>	<b>\$ 2,680,416.04</b>	<b>\$ 2,771,528.52</b>	<b>\$ 2,862,726.58</b>	<b>\$ 2,954,017.87</b>
<b>COSTOS ANUALES</b>		<b>\$ 6,863,762.18</b>	<b>\$ 7,567,916.53</b>	<b>\$ 7,972,549.26</b>	<b>\$ 8,108,966.36</b>	<b>\$ 8,520,047.73</b>	<b>\$ 8,886,534.34</b>	<b>\$ 9,262,933.24</b>	<b>\$ 9,652,236.68</b>	<b>\$ 10,055,143.17</b>	<b>\$ 10,472,273.60</b>

Cuadro XXXI. Flujo de costos a 10 años de la PTAR “El Naranja” para la alternativa 2b en pesos Mexicanos (Información proporcionada por Grupo Aqua Limpia, 2011; CESPE 2012a, 2012b; Elaboración propia).

COSTOS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>COSTOS DE INVERSION</b>											
Infraestructura (obra civil)	\$ 16,212,837.94										-\$ 8,917,060.87
<b>Equipamiento</b>											
Equipo electromecánico para funcionamiento	\$ 7,375,900.00										\$ -
Equipo de Filtrado de CO2 y H2S	\$ 700,954.65										\$ -
Motogenerador de biogas	\$ 1,377,520.00										\$ -
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 25,667,212.59</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>-\$ 8,917,060.87</b>
<b>COSTOS DE MANTENIMIENTO</b>											
Mantenimiento infraestructura		\$ 243,192.57	\$ 254,136.23	\$ 265,572.37	\$ 277,523.12	\$ 290,011.66	\$ 303,062.19	\$ 316,699.99	\$ 330,951.48	\$ 345,844.30	\$ 361,407.30
<b>Mantenimiento del equipo</b>											
Equipo electromecánico para funcionamiento		\$ 221,277.00	\$ 231,234.47	\$ 241,640.02	\$ 252,513.82	\$ 263,876.94	\$ 275,751.40	\$ 288,160.21	\$ 301,127.42	\$ 314,678.16	\$ 328,838.67
Equipo de Filtrado de CO2 y H2S		\$ 35,047.73	\$ 36,624.88	\$ 38,273.00	\$ 39,995.29	\$ 41,795.07	\$ 43,675.85	\$ 45,641.26	\$ 47,695.12	\$ 49,841.40	\$ 52,084.26
Motogenerador de biogas		\$ 137,752.00	\$ 143,950.84	\$ 150,428.63	\$ 157,197.92	\$ 164,271.82	\$ 171,664.05	\$ 179,388.94	\$ 187,461.44	\$ 195,897.20	\$ 204,712.58
<b>SUBTOTAL</b>		<b>\$ 394,076.73</b>	<b>\$ 411,810.19</b>	<b>\$ 430,341.64</b>	<b>\$ 449,707.02</b>	<b>\$ 469,943.83</b>	<b>\$ 491,091.31</b>	<b>\$ 513,190.41</b>	<b>\$ 536,283.98</b>	<b>\$ 560,416.76</b>	<b>\$ 585,635.52</b>
<b>COSTOS DIRECTOS</b>											
Sueldos y Salarios		\$ 469,416.61	\$ 492,887.44	\$ 517,531.82	\$ 543,408.41	\$ 570,578.83	\$ 599,107.77	\$ 629,063.16	\$ 660,516.32	\$ 693,542.13	\$ 728,219.24
Consumo electricidad sistema de digestion		\$ 1,440,290.00	\$ 1,505,103.05	\$ 1,572,832.69	\$ 1,643,610.16	\$ 1,717,572.62	\$ 1,794,863.38	\$ 1,875,632.24	\$ 1,960,035.69	\$ 2,048,237.29	\$ 2,140,407.97
Renta de maquinaria y equipo con operador		\$ 1,191,360.00	\$ 1,244,971.20	\$ 1,300,994.90	\$ 1,359,539.67	\$ 1,420,718.96	\$ 1,484,651.31	\$ 1,551,460.62	\$ 1,621,276.35	\$ 1,694,233.79	\$ 1,770,474.31
<b>SUBTOTAL</b>		<b>\$ 3,101,066.61</b>	<b>\$ 3,242,961.69</b>	<b>\$ 3,391,359.41</b>	<b>\$ 3,546,558.24</b>	<b>\$ 3,708,870.40</b>	<b>\$ 3,878,622.46</b>	<b>\$ 4,056,156.01</b>	<b>\$ 4,241,828.35</b>	<b>\$ 4,436,013.21</b>	<b>\$ 4,639,101.51</b>
<b>COSTOS INDIRECTOS</b>											
Sueldos y salarios administrativos		\$ 64,633.12	\$ 67,864.78	\$ 71,258.02	\$ 74,820.92	\$ 78,561.97	\$ 82,490.06	\$ 86,614.57	\$ 90,945.30	\$ 95,492.56	\$ 100,267.19
Papelaria y generales		\$ 41,086.09	\$ 42,934.96	\$ 44,867.04	\$ 46,886.05	\$ 48,995.92	\$ 51,200.74	\$ 53,504.77	\$ 55,912.49	\$ 58,428.55	\$ 61,057.84
Consumo energia administracion		\$ 372,146.72	\$ 388,893.32	\$ 406,393.52	\$ 424,681.23	\$ 443,791.89	\$ 463,762.52	\$ 484,631.84	\$ 506,440.27	\$ 529,230.08	\$ 553,045.44
<b>SUBTOTAL</b>		<b>\$ 477,865.94</b>	<b>\$ 499,693.07</b>	<b>\$ 522,518.58</b>	<b>\$ 546,388.21</b>	<b>\$ 571,349.78</b>	<b>\$ 597,453.33</b>	<b>\$ 624,751.18</b>	<b>\$ 653,298.06</b>	<b>\$ 683,151.20</b>	<b>\$ 714,370.46</b>
<b>COSTOS DE HABITANTES DE LA ZONA</b>											
Medicamentos por problemas salud		\$ 63,353.66	\$ 68,421.96	\$ 70,945.02	\$ 73,433.87	\$ 76,004.31	\$ 78,300.97	\$ 80,650.75	\$ 83,070.30	\$ 85,562.41	\$ 88,129.29
Riesgo por incendio o explosion		\$ 3,840,185.68	\$ 4,322,686.43	\$ 4,654,091.36	\$ 4,978,696.97	\$ 5,302,996.62	\$ 5,503,405.54	\$ 5,698,239.38	\$ 5,892,822.33	\$ 6,087,394.00	\$ 6,281,965.17
<b>SUBTOTAL</b>		<b>\$ 3,903,539.34</b>	<b>\$ 4,391,108.39</b>	<b>\$ 4,725,036.37</b>	<b>\$ 5,052,130.84</b>	<b>\$ 5,379,000.93</b>	<b>\$ 5,581,706.51</b>	<b>\$ 5,778,890.12</b>	<b>\$ 5,975,892.64</b>	<b>\$ 6,172,956.42</b>	<b>\$ 6,370,094.45</b>
<b>COSTOS TOTALES</b>		<b>\$ 7,876,548.63</b>	<b>\$ 8,545,573.33</b>	<b>\$ 9,069,256.00</b>	<b>\$ 9,594,784.30</b>	<b>\$ 10,129,164.94</b>	<b>\$ 10,548,873.61</b>	<b>\$ 10,972,987.73</b>	<b>\$ 11,407,303.03</b>	<b>\$ 11,852,537.58</b>	<b>\$ 12,309,201.94</b>

Cuadro XXXII. Flujo de costos a 25 años de la PTAR “El Naranja” para la alternativa 1 en pesos Mexicanos (Información proporcionada por CESPE 2012a, 2012b; elaboración propia).

COSTOS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>COSTOS DE INVERSION</b>													
Edificio filtros banda	\$ 1,500,000.00												
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 1,500,000.00</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>
<b>COSTOS DE MANTENIMIENTO</b>													
Mantenimiento edificio y filtros banda		\$ 224,670.77	\$ 234,780.95	\$ 245,346.10	\$ 256,386.67	\$ 267,924.07	\$ 279,980.65	\$ 292,579.78	\$ 305,745.87	\$ 319,504.44	\$ 333,882.14	\$ 348,906.83	\$ 364,607.64
<b>SUBTOTAL</b>		<b>\$ 224,670.77</b>	<b>\$ 234,780.95</b>	<b>\$ 245,346.10</b>	<b>\$ 256,386.67</b>	<b>\$ 267,924.07</b>	<b>\$ 279,980.65</b>	<b>\$ 292,579.78</b>	<b>\$ 305,745.87</b>	<b>\$ 319,504.44</b>	<b>\$ 333,882.14</b>	<b>\$ 348,906.83</b>	<b>\$ 364,607.64</b>
<b>COSTOS DIRECTOS</b>													
Sueldos y Salarios		\$ 230,522.06	\$ 492,887.44	\$ 517,531.82	\$ 266,858.10	\$ 280,201.01	\$ 294,211.06	\$ 308,921.61	\$ 324,367.69	\$ 340,586.07	\$ 357,615.38	\$ 375,496.15	\$ 394,270.95
Consumo de electricidad filtros banda		\$ 356,129.42	\$ 372,155.24	\$ 388,902.23	\$ 406,402.83	\$ 424,690.96	\$ 443,802.05	\$ 463,773.14	\$ 484,642.93	\$ 506,451.86	\$ 529,242.20	\$ 553,058.10	\$ 577,945.71
Polimeros (poliacrilamina)		\$ 1,374,051.01	\$ 1,435,883.31	\$ 1,500,498.06	\$ 1,568,020.47	\$ 1,638,581.39	\$ 1,712,317.55	\$ 1,789,371.84	\$ 1,869,893.57	\$ 1,954,038.79	\$ 2,041,970.53	\$ 2,133,859.20	\$ 2,229,882.87
Renta de maquinaria y equipo con operador		\$ 2,382,872.35	\$ 2,490,101.61	\$ 2,602,156.18	\$ 2,719,253.21	\$ 2,841,619.60	\$ 2,969,492.48	\$ 3,103,119.65	\$ 3,242,760.03	\$ 3,388,684.23	\$ 3,541,175.02	\$ 3,700,527.90	\$ 3,867,051.65
<b>SUBTOTAL</b>		<b>\$ 4,343,574.84</b>	<b>\$ 4,791,027.60</b>	<b>\$ 5,009,088.28</b>	<b>\$ 4,960,534.61</b>	<b>\$ 5,185,092.95</b>	<b>\$ 5,419,823.14</b>	<b>\$ 5,665,186.24</b>	<b>\$ 5,921,664.23</b>	<b>\$ 6,189,760.96</b>	<b>\$ 6,470,003.13</b>	<b>\$ 6,762,941.35</b>	<b>\$ 7,069,151.19</b>
<b>COSTOS INDIRECTOS</b>													
Sueldos y salarios administrativos		\$ 64,633.12	\$ 67,864.78	\$ 71,258.02	\$ 74,820.92	\$ 78,561.97	\$ 82,490.06	\$ 86,614.57	\$ 90,945.30	\$ 95,492.56	\$ 100,267.19	\$ 105,280.55	\$ 110,544.58
Papelera y generales		\$ 41,086.09	\$ 42,934.96	\$ 44,867.04	\$ 46,886.05	\$ 48,995.92	\$ 51,200.74	\$ 53,504.77	\$ 55,912.49	\$ 58,428.55	\$ 61,057.84	\$ 63,805.44	\$ 66,676.68
Consumo energia administracion		\$ 372,146.72	\$ 388,893.32	\$ 406,393.52	\$ 424,681.23	\$ 443,791.89	\$ 463,762.52	\$ 484,631.84	\$ 506,440.27	\$ 529,230.08	\$ 553,045.44	\$ 577,932.48	\$ 603,939.44
<b>SUBTOTAL</b>		<b>\$ 477,865.94</b>	<b>\$ 499,693.07</b>	<b>\$ 522,518.58</b>	<b>\$ 546,388.21</b>	<b>\$ 571,349.78</b>	<b>\$ 597,453.33</b>	<b>\$ 624,751.18</b>	<b>\$ 653,298.06</b>	<b>\$ 683,151.20</b>	<b>\$ 714,370.46</b>	<b>\$ 747,018.47</b>	<b>\$ 781,160.70</b>
<b>COSTOS DE HABITANTES DE LA ZONA</b>													
Medicamentos por problemas salud		\$ 79,192.08	\$ 85,527.45	\$ 88,681.27	\$ 91,792.33	\$ 95,005.39	\$ 97,876.22	\$ 100,813.43	\$ 103,837.88	\$ 106,953.02	\$ 110,161.61	\$ 113,466.46	\$ 116,870.45
Riesgo por incendio o explosion		\$ 1,738,458.56	\$ 1,956,887.46	\$ 2,106,915.03	\$ 2,253,864.54	\$ 2,400,675.54	\$ 2,491,401.00	\$ 2,579,602.61	\$ 2,667,690.64	\$ 2,755,773.57	\$ 2,843,856.26	\$ 2,931,938.94	\$ 3,020,021.63
<b>SUBTOTAL</b>		<b>\$ 1,817,650.64</b>	<b>\$ 2,042,414.91</b>	<b>\$ 2,195,596.30</b>	<b>\$ 2,345,656.88</b>	<b>\$ 2,495,680.93</b>	<b>\$ 2,589,277.22</b>	<b>\$ 2,680,416.04</b>	<b>\$ 2,771,528.52</b>	<b>\$ 2,862,726.58</b>	<b>\$ 2,954,017.87</b>	<b>\$ 3,045,405.40</b>	<b>\$ 3,136,892.08</b>
<b>COSTOS ANUALES</b>		<b>\$ 6,863,762.18</b>	<b>\$ 7,567,916.53</b>	<b>\$ 7,972,549.26</b>	<b>\$ 8,108,966.36</b>	<b>\$ 8,520,047.73</b>	<b>\$ 8,886,534.34</b>	<b>\$ 9,262,933.24</b>	<b>\$ 9,652,236.68</b>	<b>\$ 10,055,143.17</b>	<b>\$ 10,472,273.60</b>	<b>\$ 10,904,272.05</b>	<b>\$ 11,351,811.61</b>

COSTOS	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
<b>COSTOS DE INVERSION</b>													
Edificio filtros banda													\$ -
<b>TOTAL</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>
<b>COSTOS DE MANTENIMIENTO</b>													
Mantenimiento edificio y filtros banda	\$ 381,014.98	\$ 398,160.66	\$ 416,077.89	\$ 434,801.39	\$ 454,367.45	\$ 474,813.99	\$ 496,180.62	\$ 518,508.75	\$ 541,841.64	\$ 566,224.52	\$ 591,704.62	\$ 618,331.33	\$ 646,156.24
<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 381,014.98</b>	<b>\$ 398,160.66</b>	<b>\$ 416,077.89</b>	<b>\$ 434,801.39</b>	<b>\$ 454,367.45</b>	<b>\$ 474,813.99</b>	<b>\$ 496,180.62</b>	<b>\$ 518,508.75</b>	<b>\$ 541,841.64</b>	<b>\$ 566,224.52</b>	<b>\$ 591,704.62</b>	<b>\$ 618,331.33</b>	<b>\$ 646,156.24</b>
<b>COSTOS DIRECTOS</b>													
Sueldos y Salarios	\$ 413,984.50	\$ 434,683.73	\$ 456,417.91	\$ 479,238.81	\$ 503,200.75	\$ 528,360.79	\$ 554,778.83	\$ 582,517.77	\$ 611,643.66	\$ 642,225.84	\$ 674,337.13	\$ 708,053.99	\$ 743,456.69
Consumo de electricidad filtros banda	\$ 603,953.27	\$ 631,131.17	\$ 659,532.07	\$ 689,211.01	\$ 720,225.51	\$ 752,635.65	\$ 786,504.26	\$ 821,896.95	\$ 858,882.31	\$ 897,532.02	\$ 937,920.96	\$ 980,127.40	\$ 1,024,233.13
Polimeros (poliacrilamina)	\$ 2,330,227.60	\$ 2,435,087.84	\$ 2,544,666.79	\$ 2,659,176.80	\$ 2,778,839.75	\$ 2,903,887.54	\$ 3,034,562.48	\$ 3,171,117.79	\$ 3,313,818.09	\$ 3,462,939.91	\$ 3,618,772.20	\$ 3,781,616.95	\$ 3,951,789.72
Renta de maquinaria y equipo con operador	\$ 4,041,068.98	\$ 4,222,917.08	\$ 4,412,948.35	\$ 4,611,531.03	\$ 4,819,049.92	\$ 5,035,907.17	\$ 5,262,522.99	\$ 5,499,336.53	\$ 5,746,806.67	\$ 5,746,806.67	\$ 6,275,656.55	\$ 6,558,061.10	\$ 6,853,173.85
<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 7,389,234.35</b>	<b>\$ 7,723,819.81</b>	<b>\$ 8,073,565.12</b>	<b>\$ 8,439,157.64</b>	<b>\$ 8,821,315.93</b>	<b>\$ 9,220,791.15</b>	<b>\$ 9,638,368.56</b>	<b>\$ 10,074,869.04</b>	<b>\$ 10,531,150.73</b>	<b>\$ 10,749,504.44</b>	<b>\$ 11,506,686.85</b>	<b>\$ 12,027,859.44</b>	<b>\$ 12,572,653.39</b>
<b>COSTOS INDIRECTOS</b>													
Sueldos y salarios administrativos	\$ 116,071.81	\$ 121,875.40	\$ 127,969.17	\$ 134,367.62	\$ 141,086.00	\$ 148,140.30	\$ 155,547.32	\$ 163,324.69	\$ 171,490.92	\$ 180,065.47	\$ 189,068.74	\$ 198,522.18	\$ 208,448.29
Papelera y generales	\$ 69,677.13	\$ 72,812.61	\$ 76,089.17	\$ 79,513.19	\$ 83,091.28	\$ 86,830.39	\$ 90,737.75	\$ 94,820.95	\$ 99,087.90	\$ 103,546.85	\$ 108,206.46	\$ 113,075.75	\$ 118,164.16
Consumo energia administracion	\$ 631,116.72	\$ 659,516.97	\$ 689,195.23	\$ 720,209.02	\$ 752,618.42	\$ 786,486.25	\$ 821,878.13	\$ 858,862.65	\$ 897,511.47	\$ 937,899.49	\$ 980,104.96	\$ 1,024,209.69	\$ 1,070,299.12
<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 816,865.66</b>	<b>\$ 854,204.97</b>	<b>\$ 893,253.57</b>	<b>\$ 934,089.83</b>	<b>\$ 976,795.71</b>	<b>\$ 1,021,456.94</b>	<b>\$ 1,068,163.21</b>	<b>\$ 1,117,008.29</b>	<b>\$ 1,168,090.29</b>	<b>\$ 1,221,511.80</b>	<b>\$ 1,277,380.16</b>	<b>\$ 1,335,807.61</b>	<b>\$ 1,396,911.57</b>
<b>COSTOS DE HABITANTES DE LA ZONA</b>													
Medicamentos por problemas salud	\$ 120,376.56	\$ 123,987.86	\$ 127,707.50	\$ 131,538.72	\$ 135,484.88	\$ 139,549.43	\$ 143,735.91	\$ 148,047.99	\$ 152,489.43	\$ 157,064.11	\$ 161,776.04	\$ 166,629.32	\$ 171,628.20
Riesgo por incendio o explosion	\$ 3,108,104.31	\$ 3,196,186.99	\$ 3,284,269.68	\$ 3,372,352.36	\$ 3,460,435.04	\$ 3,548,517.73	\$ 3,636,600.41	\$ 3,724,683.09	\$ 3,812,765.78	\$ 3,900,848.46	\$ 3,988,931.14	\$ 4,077,013.83	\$ 4,165,096.51
<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 3,228,480.87</b>	<b>\$ 3,320,174.85</b>	<b>\$ 3,411,977.17</b>	<b>\$ 3,503,891.08</b>	<b>\$ 3,595,919.93</b>	<b>\$ 3,688,067.16</b>	<b>\$ 3,780,336.32</b>	<b>\$ 3,872,731.08</b>	<b>\$ 3,965,255.21</b>	<b>\$ 4,057,912.57</b>	<b>\$ 4,150,707.18</b>	<b>\$ 4,243,643.14</b>	<b>\$ 4,336,724.70</b>
<b>COSTOS ANUALES</b>	<b>\$ 11,815,595.86</b>	<b>\$ 12,296,360.30</b>	<b>\$ 12,794,873.76</b>	<b>\$ 13,311,939.95</b>	<b>\$ 13,848,399.02</b>	<b>\$ 14,405,129.24</b>	<b>\$ 14,983,048.71</b>	<b>\$ 15,583,117.16</b>	<b>\$ 16,206,337.87</b>	<b>\$ 16,595,153.33</b>	<b>\$ 17,526,478.81</b>	<b>\$ 18,225,641.52</b>	<b>\$ 18,952,445.89</b>

Cuadro XXXIII. Flujo de costos a 25 años de la PTAR “El Naranja” para la alternativa 2b en pesos Mexicanos (Información proporcionada por Grupo Aqua Limpia, 2011; CESPE 2012a, 2012b; elaboración propia).

COSTOS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>COSTOS DE INVERSION</b>													
Infraestructura (obra civil)	\$ 16,212,837.94												
<b>Equipamiento</b>													
Equipo electromecánico para funcionamiento	\$ 7,375,900.00												
Equipo de Filtrado de CO2 y H2S	\$ 700,954.65												
Motogenerador de biogas	\$ 1,377,520.00												
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 25,667,212.59</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>
<b>COSTOS DE MANTENIMIENTO</b>													
Mantenimiento infraestructura		\$ 243,192.57	\$ 254,136.23	\$ 265,572.37	\$ 277,523.12	\$ 290,011.66	\$ 303,062.19	\$ 316,699.99	\$ 330,951.48	\$ 345,844.30	\$ 361,407.30	\$ 377,670.62	\$ 394,665.80
<b>Mantenimiento del equipo</b>													
Equipo electromecánico para funcionamiento		\$ 221,277.00	\$ 231,234.47	\$ 241,640.02	\$ 252,513.82	\$ 263,876.94	\$ 275,751.40	\$ 288,160.21	\$ 301,127.42	\$ 314,678.16	\$ 328,838.67	\$ 343,636.41	\$ 359,100.05
Equipo de Filtrado de CO2 y H2S		\$ 35,047.73	\$ 36,624.88	\$ 38,273.00	\$ 39,995.29	\$ 41,795.07	\$ 43,675.85	\$ 45,641.26	\$ 47,695.12	\$ 49,841.40	\$ 52,084.26	\$ 54,428.06	\$ 56,877.32
Motogenerador de biogas		\$ 137,752.00	\$ 143,950.84	\$ 150,428.63	\$ 157,197.92	\$ 164,271.82	\$ 171,664.05	\$ 179,388.94	\$ 187,461.44	\$ 195,897.20	\$ 204,712.58	\$ 213,924.64	\$ 223,551.25
<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 394,076.73</b>	<b>\$ 411,810.19</b>	<b>\$ 430,341.64</b>	<b>\$ 449,707.02</b>	<b>\$ 469,943.83</b>	<b>\$ 491,091.31</b>	<b>\$ 513,190.41</b>	<b>\$ 536,283.98</b>	<b>\$ 560,416.76</b>	<b>\$ 585,635.52</b>	<b>\$ 611,989.12</b>	<b>\$ 639,528.63</b>	<b>\$ 669,528.63</b>
<b>COSTOS DIRECTOS</b>													
Sueldos y Salarios		\$ 469,416.61	\$ 492,887.44	\$ 517,531.82	\$ 543,408.41	\$ 570,578.83	\$ 599,107.77	\$ 629,063.16	\$ 660,516.32	\$ 693,542.13	\$ 728,219.24	\$ 764,630.20	\$ 802,861.71
Consumo electricidad sistema de digestion		\$ 1,440,290.00	\$ 1,505,103.05	\$ 1,572,832.69	\$ 1,643,610.16	\$ 1,717,572.62	\$ 1,794,863.38	\$ 1,875,632.24	\$ 1,960,035.69	\$ 2,048,237.29	\$ 2,140,407.97	\$ 2,236,726.33	\$ 2,337,379.01
Renta de maquinaria y equipo con operador		\$ 1,191,360.00	\$ 1,244,971.20	\$ 1,300,994.90	\$ 1,359,539.67	\$ 1,420,718.96	\$ 1,484,651.31	\$ 1,551,460.62	\$ 1,621,276.35	\$ 1,694,233.79	\$ 1,770,474.31	\$ 1,850,145.65	\$ 1,933,402.20
<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 3,101,066.61</b>	<b>\$ 3,242,961.69</b>	<b>\$ 3,391,359.41</b>	<b>\$ 3,546,558.24</b>	<b>\$ 3,708,870.40</b>	<b>\$ 3,878,622.46</b>	<b>\$ 4,056,156.01</b>	<b>\$ 4,241,828.35</b>	<b>\$ 4,436,013.21</b>	<b>\$ 4,639,101.51</b>	<b>\$ 4,851,502.18</b>	<b>\$ 5,073,642.93</b>	<b>\$ 5,307,642.93</b>
<b>COSTOS INDIRECTOS</b>													
Sueldos y salarios administrativos		\$ 64,633.12	\$ 67,864.78	\$ 71,258.02	\$ 74,820.92	\$ 78,561.97	\$ 82,490.06	\$ 86,614.57	\$ 90,945.30	\$ 95,492.56	\$ 100,267.19	\$ 105,280.55	\$ 110,544.58
Papelaria y generales		\$ 41,086.09	\$ 42,934.96	\$ 44,867.04	\$ 46,886.05	\$ 48,995.92	\$ 51,200.74	\$ 53,504.77	\$ 55,912.49	\$ 58,428.55	\$ 61,057.84	\$ 63,805.44	\$ 66,676.68
Consumo energia administracion		\$ 372,146.72	\$ 388,893.32	\$ 406,393.52	\$ 424,681.23	\$ 443,791.89	\$ 463,762.52	\$ 484,631.84	\$ 506,440.27	\$ 529,230.08	\$ 553,045.44	\$ 577,932.48	\$ 603,939.44
<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 477,865.94</b>	<b>\$ 499,693.07</b>	<b>\$ 522,518.58</b>	<b>\$ 546,388.21</b>	<b>\$ 571,349.78</b>	<b>\$ 597,453.33</b>	<b>\$ 624,751.18</b>	<b>\$ 653,298.06</b>	<b>\$ 683,151.20</b>	<b>\$ 714,370.46</b>	<b>\$ 747,018.47</b>	<b>\$ 781,160.70</b>	<b>\$ 812,145.80</b>
<b>COSTOS DE HABITANTES DE LA ZONA</b>													
Medicamentos por problemas salud		\$ 63,353.66	\$ 68,421.96	\$ 70,945.02	\$ 73,433.87	\$ 76,004.31	\$ 78,300.97	\$ 80,650.75	\$ 83,070.30	\$ 85,562.41	\$ 88,129.29	\$ 90,773.17	\$ 93,496.36
Riesgo por incendio o explosion		\$ 3,840,185.68	\$ 4,322,686.43	\$ 4,654,091.36	\$ 4,978,696.97	\$ 5,302,996.62	\$ 5,503,405.54	\$ 5,698,239.38	\$ 5,892,822.33	\$ 6,087,394.00	\$ 6,281,965.17	\$ 6,476,536.30	\$ 6,671,107.44
<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 3,903,539.34</b>	<b>\$ 4,391,108.39</b>	<b>\$ 4,725,036.37</b>	<b>\$ 5,052,130.84</b>	<b>\$ 5,379,000.93</b>	<b>\$ 5,581,706.51</b>	<b>\$ 5,778,890.12</b>	<b>\$ 5,975,892.64</b>	<b>\$ 6,172,956.42</b>	<b>\$ 6,370,094.45</b>	<b>\$ 6,567,309.47</b>	<b>\$ 6,764,603.80</b>	<b>\$ 6,962,703.80</b>
<b>COSTOS TOTALES</b>	<b>\$ 7,876,548.62</b>	<b>\$ 8,545,573.33</b>	<b>\$ 9,069,256.00</b>	<b>\$ 9,594,784.30</b>	<b>\$ 10,129,164.94</b>	<b>\$ 10,548,873.61</b>	<b>\$ 10,972,987.73</b>	<b>\$ 11,407,303.03</b>	<b>\$ 11,852,537.58</b>	<b>\$ 12,309,201.94</b>	<b>\$ 12,777,819.23</b>	<b>\$ 13,258,936.06</b>	<b>\$ 13,751,640.86</b>

COSTOS	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
<b>COSTOS DE INVERSION</b>													
Infraestructura (obra civil)													\$ -
<b>Equipamiento</b>													\$ -
Equipo electromecánico para funcionamiento													\$ -
Equipo de Filtrado de CO2 y H2S													\$ -
Motogenerador de biogas													\$ -
<b>TOTAL</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ -</b>
<b>COSTOS DE MANTENIMIENTO</b>													
Mantenimiento infraestructura	\$ 412,425.76	\$ 430,984.92	\$ 450,379.24	\$ 470,646.31	\$ 491,825.39	\$ 513,957.54	\$ 537,085.62	\$ 561,254.48	\$ 586,510.93	\$ 612,903.92	\$ 640,484.60	\$ 669,306.40	\$ 699,425.19
<b>Mantenimiento del equipo</b>													
Equipo electromecánico para funcionamiento	\$ 375,259.56	\$ 392,146.24	\$ 409,792.82	\$ 428,233.49	\$ 447,504.00	\$ 467,641.68	\$ 488,685.56	\$ 510,676.41	\$ 533,656.84	\$ 557,671.40	\$ 582,766.62	\$ 608,991.11	\$ 636,395.71
Equipo de Filtrado de CO2 y H2S	\$ 59,436.80	\$ 62,111.45	\$ 64,906.47	\$ 67,827.26	\$ 70,879.49	\$ 74,069.07	\$ 77,402.17	\$ 80,885.27	\$ 84,525.11	\$ 88,328.74	\$ 92,303.53	\$ 96,457.19	\$ 100,797.76
Motogenerador de biogas	\$ 233,611.06	\$ 244,123.56	\$ 255,109.12	\$ 266,589.03	\$ 278,585.53	\$ 291,121.88	\$ 304,222.37	\$ 317,912.37	\$ 332,218.43	\$ 347,168.26	\$ 362,790.83	\$ 379,116.42	\$ 396,176.66
<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 668,307.41</b>	<b>\$ 698,381.25</b>	<b>\$ 729,808.40</b>	<b>\$ 762,649.78</b>	<b>\$ 796,969.02</b>	<b>\$ 832,832.63</b>	<b>\$ 870,310.10</b>	<b>\$ 909,474.05</b>	<b>\$ 950,400.38</b>	<b>\$ 993,168.40</b>	<b>\$ 1,037,860.98</b>	<b>\$ 1,084,564.72</b>	<b>\$ 1,133,370.13</b>
<b>COSTOS DIRECTOS</b>													
Sueldos y Salarios	\$ 843,004.79	\$ 885,155.03	\$ 929,412.79	\$ 975,883.43	\$ 1,024,677.60	\$ 1,075,911.48	\$ 1,129,707.05	\$ 1,186,192.40	\$ 1,245,502.02	\$ 1,307,777.12	\$ 1,373,165.98	\$ 1,441,824.28	\$ 1,513,915.49
Consumo electricidad sistema de digestion	\$ 2,442,561.07	\$ 2,552,476.32	\$ 2,667,337.75	\$ 2,787,367.95	\$ 2,912,799.51	\$ 3,043,875.49	\$ 3,180,849.88	\$ 3,323,988.13	\$ 3,473,567.59	\$ 3,629,878.13	\$ 3,793,222.65	\$ 3,963,917.67	\$ 4,142,293.96
Renta de maquinaria y equipo con operador	\$ 2,020,405.30	\$ 2,111,323.54	\$ 2,206,333.10	\$ 2,305,618.09	\$ 2,409,370.91	\$ 2,517,792.60	\$ 2,631,093.26	\$ 2,749,492.46	\$ 2,873,219.62	\$ 3,002,514.50	\$ 3,137,627.66	\$ 3,278,820.90	\$ 3,426,367.84
<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 5,305,971.17</b>	<b>\$ 5,548,954.89</b>	<b>\$ 5,803,083.64</b>	<b>\$ 6,068,869.47</b>	<b>\$ 6,346,848.01</b>	<b>\$ 6,637,579.56</b>	<b>\$ 6,941,650.20</b>	<b>\$ 7,259,672.99</b>	<b>\$ 7,592,289.24</b>	<b>\$ 7,940,169.76</b>	<b>\$ 8,304,016.29</b>	<b>\$ 8,684,562.85</b>	<b>\$ 9,082,577.30</b>
<b>COSTOS INDIRECTOS</b>													
Sueldos y salarios administrativos	\$ 116,071.81	\$ 121,875.40	\$ 127,969.17	\$ 134,367.62	\$ 141,086.00	\$ 148,140.30	\$ 155,547.32	\$ 163,324.69	\$ 171,490.92	\$ 180,065.47	\$ 189,068.74	\$ 198,522.18	\$ 208,448.29
Papelaria y generales	\$ 69,677.13	\$ 72,812.61	\$ 76,089.17	\$ 79,513.19	\$ 83,091.28	\$ 86,830.39	\$ 90,737.75	\$ 94,820.95	\$ 99,087.90	\$ 103,546.85	\$ 108,206.46	\$ 113,075.75	\$ 118,164.16
Consumo energia administracion	\$ 631,116.72	\$ 659,516.97	\$ 689,195.23	\$ 720,209.02	\$ 752,618.42	\$ 786,486.25	\$ 821,878.13	\$ 858,862.65	\$ 897,511.47	\$ 937,899.49	\$ 980,104.96	\$ 1,024,209.69	\$ 1,070,299.12
<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 816,865.66</b>	<b>\$ 854,204.97</b>	<b>\$ 893,253.57</b>	<b>\$ 934,089.83</b>	<b>\$ 976,795.71</b>	<b>\$ 1,021,456.94</b>	<b>\$ 1,068,163.21</b>	<b>\$ 1,117,008.29</b>	<b>\$ 1,168,090.29</b>	<b>\$ 1,221,511.80</b>	<b>\$ 1,277,380.16</b>	<b>\$ 1,335,807.61</b>	<b>\$ 1,396,911.57</b>
<b>COSTOS DE HABITANTES DE LA ZONA</b>													
Medicamentos por problemas salud	\$ 96,301.25	\$ 99,190.29	\$ 102,166.00	\$ 105,230.98	\$ 108,387.91	\$ 111,639.54	\$ 114,988.73	\$ 118,438.39	\$ 121,991.54	\$ 125,651.29	\$ 129,420.83	\$ 133,303.45	\$ 137,302.56
Riesgo por incendio o explosion	\$ 6,865,678.58	\$ 7,060,249.72	\$ 7,254,820.85	\$ 7,449,391.99	\$ 7,643,963.13	\$ 7,838,534.26	\$ 8,033,105.40	\$ 8,227,676.54	\$ 8,422,247.68	\$ 8,616,818.81	\$ 8,811,389.95	\$ 9,005,961.09	\$ 9,200,532.23
<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 6,961,979.83</b>	<b>\$ 7,159,440.00</b>	<b>\$ 7,356,986.85</b>	<b>\$ 7,554,622.97</b>	<b>\$ 7,752,351.03</b>	<b>\$ 7,950,173.81</b>	<b>\$ 8,148,094.13</b>	<b>\$ 8,346,114.93</b>	<b>\$ 8,544,239.22</b>	<b>\$ 8,742,470.10</b>	<b>\$ 8,940,810.78</b>	<b>\$ 9,139,264.54</b>	<b>\$ 9,337,834.78</b>
<b>COSTOS TOTALES</b>	<b>\$ 13,753,124.07</b>	<b>\$ 14,260,981.12</b>	<b>\$ 14,783,132.46</b>	<b>\$ 15,320,232.04</b>	<b>\$ 15,872,963.77</b>	<b>\$ 16,442,042.94</b>	<b>\$ 17,028,217.63</b>	<b>\$ 17,632,270.26</b>	<b>\$ 18,255,019.13</b>	<b>\$ 18,897,320.07</b>	<b>\$ 19,560,068.21</b>	<b>\$ 20,244,199.73</b>	<b>\$ 20,950,693.78</b>

El resultado del cálculo del costo total VP para cada alternativa a 10 y 25 años se presenta en el Cuadro XXXVII y Cuadro XXXVIII, respectivamente.

Cuadro XXXIV. Costo total VP para las alternativas 1 y 2b a 10 años (Elaboración propia).

<b>ALTERNATIVAS</b>	<b>COSTO TOTAL VP EN PESOS MEXICANOS</b>
1. No hacer nada seguir con el manejo actual	\$ 46,929,526.86
2b. Sistema de digestión anaerobia con recuperación energética	\$ 49,556,143.82

Cuadro XXXV. Costo total VP para las alternativas 1 y 2b a 25 años (Elaboración propia).

<b>ALTERNATIVAS</b>	<b>COSTO TOTAL VP EN PESOS MEXICANOS</b>
1. No hacer nada seguir con el manejo actual	\$ 78,419,494.12
2b. Sistema de digestión anaerobia con recuperación energética	\$ 114,827,559.93

De acuerdo con los cuadros anteriores, la alternativa 1 tiene un menor VP, pues no es necesaria una inversión inicial, ya que se cuenta con el equipo desde que la PTAR “El Naranja” inició operaciones en 1999. La diferencia en el incremento del VP para 25 años se debe a que se contabilizan 15 años más de costos operativos.

De acuerdo con los VP calculados se tiene como resultado que el costo total anual para cada alternativa tanto para 10 como 25 años es la que se presenta en los Cuadros XXXVI y XXXVII.

Cuadro XXXVI. Costo total anual para las alternativas 1 y 2b a 10 años (Elaboración propia).

<b>ALTERNATIVAS</b>	<b>COSTO TOTAL ANUAL EN PESOS MEXICANOS</b>
1. No hacer nada seguir con el manejo actual	\$ 47,171,006.79
2b . Sistema de digestión anaerobia con recuperación energética	\$ 52,427,198.77

Cuadro XXXVII. Costo total anual para las alternativas 1 y 2b a 25 años (Elaboración propia).

<b>ALTERNATIVAS</b>	<b>COSTO TOTAL ANUAL EN PESOS MEXICANOS</b>
1. No hacer nada seguir con el manejo actual	\$ 76,919,494.12
2b . Sistema de digestión anaerobia con recuperación energética	\$ 89,160,347.34

Como resultado de la aplicación del cálculo para determinar el costo por habitante (CUP) a 10 y 25 años para cada alternativa es la que se presenta en el Cuadro XXXVIII y Cuadro XXXIX.

Cuadro XXXVIII. Costo por habitante durante la vida útil de las alternativas 1 y 2b a 10 años (Elaboración propia).

<b>ALTERNATIVAS</b>	<b>CUP PESOS MEXICANOS</b>
1. No hacer nada seguir con el manejo actual	\$ 108,190.00
2b. Sistema de digestión anaerobia con recuperación energética	\$ 120,246.00

Cuadro XXXIX. Costo por habitante durante la vida útil de las alternativas 1 y 2b a 10 años (Elaboración propia).

<b>ALTERNATIVAS</b>	<b>CUP PESOS MEXICANOS</b>
1. No hacer nada seguir con el manejo actual	\$ 176,421.00
2b. Sistema de digestión anaerobia con recuperación energética	\$ 204,496.00

Se puede observar en la comparación de ambas alternativas para los costos anuales a los que incurren los habitantes de la zona de influencia de la PTAR “El Naranja”, que la alternativa 2b es mayor que la alternativa 1, esto se debe a que la inversión inicial es mayor, ya que existe un mayor riesgo por incendio o explosión.

Aún cuando para la alternativa 2b hay que realizar una inversión inicial, los costos por manejo de lodos residuales (la suma de los costos de mantenimiento, costos directos, costos indirectos y otros gastos) para la vida útil del proyecto (25 años) es un 81% menor, que el de la alternativa 1, es decir, un ahorro anual de \$7,288,553.25 pesos mexicanos.

Una vez calculados los costos asociados para cada alternativa se determinó el impacto, el cual se basó en el nivel de importancia que la población de la zona de influencia asignó a cada una de las metas (determinadas por el ACV) que se pretenden alcanzar por ambas alternativas tanto para 10 como 25 años (Cuadro XL).

Cuadro XL. Nivel de importancia para cada meta que se pretenden alcanzar por las alternativas (Elaboración propia).

Metas perseguidas para las alternativas	Valor del impacto (%)		Nivel de Importancia (%)
	Alt. 1	Alt. 2	
1. Disminuir los residuos sólidos que provocan riesgos a la salud	11	42	45
2. Disminuir las emisiones GEI que favorecen el calentamiento global	15	81	20
3. Disminuir el riesgo por vivir cerca de una PTAR	30	13	35

El impacto total ponderado (ITP) de cada una de las alternativas (el nivel de importancia de cada meta perseguida con respecto al impacto que generan) se presenta en los Cuadro XLI.

Cuadro XLI. Impacto total ponderado para cada una de las alternativas a 10 y 25 años (Elaboración propia).

ALTERNATIVAS	ITP
1. No hacer nada seguir con el manejo actual	18
2b. Sistema de digestión anaerobia con recuperación energética	40

Se observa que la alternativa 2b es la que tiene un mayor ITP, es decir, que genera un mayor beneficio para los habitantes de la zona al cumplir con mayor eficacia con cada una de las metas perseguidas.

El resultado de determinar la relación costo-impacto (CUI), es decir el costo que hay que afrontar en cada alternativa para lograr el impacto deseado de cada meta, para 10 y 25 años se presentan en el Cuadro XLII y Cuadro XLIII.

Cuadro XLII. Costo por unidad de impacto (CUI) por cada meta para cada una de las alternativas a 10 años (Elaboración propia).

ALTERNATIVAS	COSTO POR UNIDAD DE IMPACTO (%/\$)		
	CUI <sub>1</sub>	CUI <sub>2</sub>	CUI <sub>3</sub>
1. No hacer nada seguir con el manejo actual	428,827	314,473	157,237
2b. Sistema de digestión anaerobia con recuperación energética	124,827	64,725	403,286

Cuadro XLIII. Costo por unidad de impacto (CUI) por cada meta para cada una de las alternativas a 25 años (Elaboración propia).

ALTERNATIVAS	COSTO POR UNIDAD DE IMPACTO (%/\$)		
	CUI <sub>1</sub>	CUI <sub>2</sub>	CUI <sub>3</sub>
1. No hacer nada seguir con el manejo actual	1,748,170	1,281,992	640,996
2b. Sistema de digestión anaerobia con recuperación energética	530,716	275,186	1,714,622

Independientemente de los años a los que se corrió el ejercicio, en la alternativa 1 la meta que representa un menor costo-impacto es la de disminuir el riesgo por vivir cerca de una PTAR, debido a que en el manejo actual de lodos residuales los combustibles que pueden provocar un incendio o explosión, son mínimas. Por su parte, para la alternativa 2b esta meta representa el mayor costo-impacto, debido a que la incorporación de un sistema de digestión anaerobia con recuperación energética, implica trabajar con mayor cantidad de combustible (biogás) y tanques sujetos a presión (digestores), aumentando el riesgo por incendio o explosión.

Los Cuadros XLIV y XLV presentan el análisis costo-impacto comparativo para ambas alternativas, tanto para 10 como para 25 años.

Cuadro XLIV. Costo- impacto total (CUI<sub>A</sub>) para cada una de las alternativas a 10 años (Elaboración propia).

ALTERNATIVAS	CTA	ITP	CUI <sub>A</sub>
1. No hacer nada seguir con el manejo actual	47,171,007	18	25,567
2b. Sistema de digestión anaerobia con recuperación energética	52,427,199	40	13,222

Cuadro XLV. Costo- impacto total (CUI<sub>A</sub>) para cada una de las alternativas a 25 años (Elaboración propia).

ALTERNATIVAS	CTA	ITP	CUI <sub>A</sub>
1. No hacer nada seguir con el manejo actual	76,919,494	18	41,691
2b. Sistema de digestión anaerobia con recuperación energética	89,160,347	40	22,487

Es importante mencionar que para ambas corridas (10 y 25 años) aunque para la **alternativa 2b** el costo-impacto de la meta de disminuir el riesgo por incendio o explosión aumenta un **45%**, el costo-impacto total de la alternativa (CUI<sub>A</sub>) es menor que el costo-impacto asociado a la **alternativa 1** en un **54%**. Hay que mencionar que aunque el riesgo por explosión o incendio se incrementa para la **alternativa 2b**, en el análisis de percepción social realizado a los habitantes de la zona de influencia, están dispuestos a correr el riesgo, pues consideran que

puede traer beneficios ambientales y a su salud, y no están dispuestos a vender sus propiedades, por lo que solicitan se les informe sobre los riesgos y las acciones preventivas y de emergencia que deben de llevar a cabo para salvaguardar su integridad y su patrimonio.

Hay que aclarar que la única diferencia presentada en las diferentes corridas realizadas (10 y 25 años) es la relación de los costos por el periodo de tiempo analizado, sin embargo esto no modifica la factibilidad del proyecto.

Por lo anterior se considera que la **alternativa 2b** que consiste en la incorporación de un sistema de digestión anaerobia con recuperación energética para el manejo sustentable de lodos residuales en la PTAR “El Naranja” representa un menor costo-impacto, es decir, reduce los costos por manejo y el impacto negativo social generado.

Con la finalidad de poder determinar las oportunidades de generación de ingresos adicionales para la PTAR se realizó la valoración económica de los diferentes productos que ambas alternativas ofrecen, dando como resultado los siguientes productos (Cuadro XLVI).

Cuadro XLVI. Productos, cantidades generadas y su valor en el mercado para cada alternativa analizada (Elaboración propia).

Alternativa 1			Alternativa 2b		
Producto	Cantidad	Valor	Producto	Cantidad	Valor
Composta	374,400 kg/año	\$ 20.00 kg	Composta	374,400 kg/año	\$ 20.00 kg
			Biosólidos	16,704,000 kg/año	\$ 3.64 kg
			Electricidad	8,160,480 kwh/año	\$1.14 kwh

Para la elaboración de los flujos de efectivo anuales a 25 años (vida útil del proyecto propuesto) para cada una de las alternativas se utilizaron los mismo costos, inversión inicial, porcentaje de depreciación, porcentaje de inflación y tasa de interés anual que del ACI quedando como se presentan en los Cuadros XLVII y XLVIII.

Cuadro XLVII. Flujos de efectivo para la alternativa 1 (Elaboración propia).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Valor economico comp.	\$ 7,824,960.00	\$ 8,177,083.20	\$ 8,545,051.94	\$ 8,929,579.28	\$ 9,331,410.35	\$ 9,751,323.81	\$ 10,190,133.39	\$ 10,648,689.39	\$ 11,127,880.41	\$ 11,628,635.03	\$ 12,151,923.61	\$ 12,698,760.17
Costos totales	\$ 5,046,111.55	\$ 5,525,501.62	\$ 5,776,952.96	\$ 5,763,309.48	\$ 6,024,366.80	\$ 6,297,257.12	\$ 6,582,517.20	\$ 6,880,708.16	\$ 7,192,416.59	\$ 7,518,255.73	\$ 7,858,866.65	\$ 8,214,919.53
Depreciacion	\$ 75,000.00	\$ 75,000.00	\$ 75,000.00	\$ 75,000.00	\$ 75,000.00	\$ 75,000.00	\$ 75,000.00	\$ 75,000.00	\$ 75,000.00	\$ 75,000.00	\$ 75,000.00	\$ 75,000.00
Flujo anual de efectivo	\$ 2,853,848.45	\$ 2,726,581.58	\$ 2,843,098.99	\$ 3,241,269.80	\$ 3,382,043.55	\$ 3,529,066.69	\$ 3,682,616.19	\$ 3,842,981.23	\$ 4,010,463.82	\$ 4,185,379.30	\$ 4,368,056.96	\$ 4,558,840.64

	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Valor economico comp.	\$13,270,204.38	\$13,867,363.57	\$14,491,394.93	\$15,143,507.71	\$15,824,965.55	\$16,537,089.00	\$17,281,258.01	\$18,058,914.62	\$18,871,565.78	\$19,720,786.24	\$20,608,221.62	\$21,535,591.59	\$22,504,693.21
Costos totales	\$ 8,587,114.99	\$ 8,976,185.44	\$ 9,382,896.58	\$ 9,808,048.86	\$10,252,479.10	\$10,717,062.09	\$11,202,712.39	\$11,710,386.08	\$12,241,082.66	\$12,795,847.05	\$13,375,771.63	\$13,981,998.38	\$14,615,721.19
Depreciacion	\$ 75,000.00	\$ 75,000.00	\$ 75,000.00	\$ 75,000.00	\$ 75,000.00	\$ 75,000.00	\$ 75,000.00	\$ 75,000.00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Flujo anual de efectivo	\$ 4,758,089.39	\$ 4,966,178.13	\$ 5,183,498.35	\$ 5,410,458.84	\$ 5,647,486.46	\$ 5,895,026.91	\$ 6,153,545.62	\$ 6,423,528.54	\$ 6,630,483.11	\$ 6,924,939.18	\$ 7,232,449.99	\$ 7,553,593.21	\$ 7,888,972.02

Cuadro XLVIII. Flujo de efectivo para la alternativa 2b (Elaboración propia).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Valor economico	\$ 81,085,215.02	\$ 84,734,049.70	\$ 88,547,081.94	\$ 92,531,700.62	\$ 96,695,627.15	\$ 101,046,930.37	\$ 105,594,042.24	\$ 110,345,774.14	\$ 115,311,333.98	\$ 120,500,344.01	\$ 125,922,859.49	\$ 131,589,388.16
Costos	\$ 3,505,504.40	\$ 3,666,245.51	\$ 3,834,369.65	\$ 4,010,216.52	\$ 4,194,141.51	\$ 4,386,516.40	\$ 4,587,730.07	\$ 4,798,189.39	\$ 5,018,319.95	\$ 5,248,566.98	\$ 5,489,396.26	\$ 5,741,295.05
Depreciacion	\$ 1,706,727.36	\$ 1,706,727.36	\$ 1,706,727.36	\$ 1,706,727.36	\$ 1,706,727.36	\$ 1,706,727.36	\$ 1,706,727.36	\$ 1,706,727.36	\$ 1,706,727.36	\$ 1,706,727.36	\$ 810,641.90	\$ 810,641.90
Flujo anual de efectivo	\$ 79,286,437.99	\$ 82,774,531.55	\$ 86,419,439.65	\$ 90,228,211.47	\$ 94,208,213.00	\$ 98,367,141.34	\$ 102,713,039.53	\$ 107,254,312.12	\$ 111,999,741.39	\$ 116,958,504.39	\$ 121,244,105.12	\$ 126,658,735.01

	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Valor economico	\$137,510,910.63	\$143,698,901.61	\$150,165,352.18	\$156,922,793.03	\$163,984,318.72	\$171,363,613.06	\$179,074,975.65	\$187,133,349.55	\$195,554,350.28	\$204,354,296.04	\$213,550,239.36	\$223,160,000.14	\$233,202,200.14
Costos	\$ 6,004,773.08	\$ 6,280,363.61	\$ 6,568,624.50	\$ 6,870,139.36	\$ 7,185,518.73	\$ 7,515,401.32	\$ 7,860,455.34	\$ 8,221,379.83	\$ 8,598,906.14	\$ 8,993,799.33	\$ 9,406,859.84	\$ 9,838,925.05	\$ 10,290,871.02
Depreciacion	\$ 810,641.90	\$ 810,641.90	\$ 810,641.90	\$ 810,641.90	\$ 810,641.90	\$ 810,641.90	\$ 810,641.90	\$ 810,641.90	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Flujo anual de efectivo	\$ 132,316,779.45	\$ 138,229,179.90	\$ 144,407,369.58	\$ 150,863,295.57	\$ 157,609,441.89	\$ 164,658,853.64	\$ 172,025,162.21	\$ 179,722,611.61	\$ 186,955,444.14	\$ 195,360,496.71	\$ 204,143,379.52	\$ 213,321,075.08	\$ 222,911,329.12

El resultado de los flujos de efectivo presentados con anterioridad permitió determinar el valor presente neto (VPN) y la tasa interna de retorno (TIR), con la finalidad de comprobar cuál de las dos alternativas es más rentable, en caso de que CESPE decidiese vender los productos que genera (Cuadro XLIX) .

Cuadro XLIX. Comparativo de VPN y TIR de las alternativa 1 y 2b (Elaboración propia).

ALTERNATIVAS	VPN	TIR
1. No hacer nada seguir con el manejo actual	29,036,872	190%
2b. Sistema de digestión anaerobia con recuperación energética	836,698,848	313%

Lo anterior indica que la **alternativa 2b** es más rentable, pues aunque la inversión inicial es mayor, que la de la **alternativa 1**, los productos generados por el sistema de digestión con recuperación energética propuesto tienen un mayor valor económico y los costos operativos son menores. Para ambas alternativas el periodo de retorno de la inversión de acuerdo con los flujos de efectivo es de **3 años**.

Es importante que CESPE considere la venta de los productos generados pues estos ayudarán a generar ingresos extras que permitan la adquisición de nuevas tecnologías e incluso la implementación de nuevos proyectos que lleven a una gestión sustentable de los lodos residuales generados en la PTAR “El Naranja”.

#### 4. DISCUSIÓN.

El análisis realizado para conocer el cumplimiento de los lodos residuales con la **NOM-004-SEMARNAT-2002**, se basó en los estudios de laboratorio proporcionados por CESPE (2011a). Las muestras fueron puntuales (2005, 2008 y 2011) por lo que pudiera haber variaciones de acuerdo con la calidad de los lodos residuales manejados en las diferentes PTAR de la ciudad y por lo tanto afectar la composición de los lodos residuales manejados en la PTAR “El Naranja”, en diferentes periodos de tiempo.

La normatividad establece que la periodicidad con la que se realice el muestreo dependerá de las ton/año manejadas, para el caso de CESPE, este muestreo debería realizarse por trimestre, sin embargo la misma norma en su punto 4.16 indica:

*“El generador podrá quedar exento de realizar el muestreo y análisis de alguno o varios de los parámetros establecidos en la norma siempre y cuando la detección estos sea en cantidades menores que los límites máximos establecidos o cuando la procedencia de los lodos y biosólidos no contengan los contaminantes regulados en la presente norma. La autoridad determinará la periodicidad con la que deberán realizarse estos muestreos y análisis.”*

Debido a lo anterior es que CESPE realiza sus muestreos cada 3 años por lo que tiene contemplado realizar un nuevo muestro y análisis para este 2014.

Otros estudios realizados en diferentes PTAR de México en el año 2000, indicaron que la mayor concentración de metales pesados (níquel y mercurio) en los lodos y biosólidos se encuentra en aquellas ciudades que tienen un alto desarrollo industrial (Castrejón, 2000), por lo que es importante considerar que en regiones donde existan este tipo de desarrollos sea solicitado a las empresas privadas contar con su propia PTAR, con la finalidad de que el agua ingresada al efluente, tenga menores concentraciones de metales pesados.

En el mismo estudio (Castrejon, 2000) se encontraron que las concentraciones de microorganismos (patógenos y parásitos) excedían la normatividad.

Otros estudios más recientes como el de González *et al.* (2009) realizado en la ciudad de Puebla, indica que los lodos residuales estabilizados mediante los sistemas de digestión, logran cumplir con la normatividad como de **Tipo Excelente**, por lo que están siendo utilizados con fines agrícolas y mejorador de suelos.

En otros países, la calidad de los lodos y biosólidos es de gran importancia pues, esto permite definir su disposición o aprovechamiento final, tal es el caso de Colombia donde los biosólidos provenientes de las 4 principales PTAR país, son de **Tipo Excelente, Clase B**, lo que ha propiciado su utilización como mejoradores de suelo (Daguer, 2004). En el caso de Brasil, diferentes estudios realizados a sus biosólidos, solo han encontrado la presencia de metales pesados en cantidades mínimas en los lodos provenientes de PTAR ubicadas en centros industriales, por lo que la importancia de sus estudios recae en la presencia de microorganismos.

Como se puede observar no sólo los sistemas de digestión anaerobia permiten lograr biosólidos de calidad, sino que reducen el volumen de lodos a manejar, esto se demostró con el resultado de los experimentos en donde se disminuyó en un **28%** su volumen, lo cual concuerda con Onyeche (2011), el cual indica que uno de los beneficios de implementar sistemas de digestión anaerobia con recuperación energética no sólo permite disminuir el volumen de lodos en un **24-30%**.

En los cálculos realizados para el presente proyecto la cobertura para lograr abastecer los requerimientos energéticos de la PTAR “El Naranja” es del **88%**, lo que concuerda con el proyecto de la PTAR de León, Guanajuato que inició operaciones en mayo de 2011. Esta PTAR cuenta con un sistema de cogeneración para la producción de energía y la utilización del calor producido durante la digestión. La energía producida es suficiente para satisfacer el **75%** de la demanda energética para operar la PTAR (SEIA, 2013).

Hay que mencionar que el potencial de generación de energía eléctrica calculado en el presente trabajo se determinó considerando los parámetros de temperatura interna de **25°C** con un tiempo de retención de **31 días**, que de

acuerdo con Agler *et al.* (2010) es la temperatura y el tiempo de retención mínimos para que se logre producir biogás. Es importante mencionar que el proceso de digestión con base en la temperatura a la que se proponen fermentar los lodos es la mesofílica, esto quiere decir que la temperatura a la que se decida realizar la digestión puede variar de 25°C hasta 37.5°C, teniendo de conocimiento que mientras mayor sea la temperatura, mayor será la cantidad y calidad del biogás generado (Deublein y Steinhauser, 2011; Arthur, 2010).

Otro factor de control para la producción de biogás es el pH de los lodos que se digieren. En la realización de los experimentos el pH fue neutro, esto con información proporcionada por CESPE (2011a), por lo que se considera idóneo para este tipo de procesos.

Los experimentos del presente estudio se realizaron tipo batch, obteniendo que la cantidad de biogás producido fue de **0.1059 m<sup>3</sup>/kg** la cual variará dependiendo de los parámetros mencionados.

Otros estudios como el de Arthur (2010) indican que la producción de biogás va desde **0.10 m<sup>3</sup>/kg hasta 0.30 m<sup>3</sup>/kg**. Otras fuentes de información (WEF&ASCE, 1998; IDAE, 2007; Álvarez, 2010) indican que mediante la digestión mesofílica a 37.5°C con un tiempo de retención de 30 días se logra obtener desde **0.29 hasta 0.35 m<sup>3</sup>/kg**. El reporte técnico de Infantes (2007), determina que el potencial de generación de biogás con lodos residuales es de **0.31 m<sup>3</sup>/kg**. Lo anterior permite verificar que los cálculos realizados para determinar la cantidad de biogás producido en el presente estudio son válidos pues se encuentran dentro de los rangos determinadas por otros autores.

Es importante mencionar que a diferencia de lo externado por Duque (2006), donde indica que la temperatura externa no es un factor que intervenga en el proceso de digestión, se determinó que la temperatura externa sí es un factor importante a considerar pues, mientras menor sea la temperatura externa, mayor será la energía necesaria para llevar a cabo el calentamiento de los lodos en el digestor con la finalidad de alcanzar una temperatura constante que permita obtener la cantidad de biogás máxima posible. Esto concuerda con lo indicado en WEF & ASCE (1998), en la que la temperatura externa debe considerarse para

realizar el diseño del sistema de digestión, incluso es parte fundamental para la determinación de los materiales que se utilizaran para la construcción de los digestores, con la finalidad de garantizar que la temperatura interna de fermentación sea constante.

Como resultado de los cálculos realizados, la capacidad de producción anual de biogás de los lodos manejados en la PTAR “El Naranja” es de **2,880,000 m<sup>3</sup>**, y aunque el biogás se puede utilizar como combustible por su potencial térmico de 21.5 MJ/m<sup>3</sup> y capacidad energética de 5.5-6 kwh/m<sup>3</sup>.

En el presente proyecto se propone la incorporación de filtros de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S, con la finalidad de obtener CH<sub>4</sub> casi puro, el cual será utilizado como combustible. Como ya se mencionó, el porcentaje de CH<sub>4</sub> contenido en el biogás depende de los parámetros de operación de los digestores anaerobios y que este porcentaje puede variar de 45%-75%, lamentablemente no fue posible medir la calidad del biogás por lo que se consideró la medición de este porcentaje de distintos experimentos realizados (Cisneros, 2005; Duque, 2006; Arthur, 2010; Gilroyed, 2010), los cuales indican valores de 60% a 65% de CH<sub>4</sub>. Por ello, en el presente trabajo de manera conservativa se utilizó un **60% de CH<sub>4</sub>** para la realización de los diferentes cálculos y análisis de factibilidad.

Tomando en cuenta lo anterior, la cantidad anual de CH<sub>4</sub> generada por los lodos de la PTAR “El Naranja” es de **1,728,000 m<sup>3</sup>**, con una capacidad de generación de energía de **8,160,480 kwh/año**, con una eficiencia del motor generador de **45%**.

Otros estudios realizados y diferentes fuentes de información, indican que la eficiencia de los motores generadores utilizados depende de la inyección continua de CH<sub>4</sub> al motor generador y de sus especificaciones técnicas. Estos rangos de eficiencia van desde el **20%** hasta el **80%**. Para el caso específico del presente proyecto se propone un equipo de 60 Hz, trifásico, potencia nominal de 132 kw, factor de potencia de 0.8, voltaje nominal 220 y requerimiento por hora de 78 m<sup>3</sup>.

La simulación dinámica del sistema propuesto arrojó como resultado que la utilización de biogás con un contenido de **CH<sub>4</sub> del 60%**, se pueden llegar a generar en promedio **705,636 kwh/mes** lo que implica una cobertura del

requerimiento energético de la PTAR “El Naranja” y del sistema propuesto del **92%**.

La utilización de la simulación dinámica en STELLA ha permitido no solo verificar la operatividad y factibilidad del presente proyecto sino de otros muchos como es el caso de Alotto (2013) que realizando la simulación del funcionamiento de los equipos actuales para el almacenamiento de energía proveniente de fuentes renovables, permitió conceptualizar el rediseño necesario para eficientizar el almacenamiento de energía.

Como ya se ha mencionado, una de las ventajas e importancia de la instalación de digestores con sistemas de recuperación energética radica en la disminución de emisiones de GEI a la atmosfera. Con la finalidad de comparar distintos sistemas y demostrar su efectividad se utilizó la metodología de ACV (Hoof, 2008).

También este tipo de análisis valora ambientalmente nuevas propuestas de proyectos, con la finalidad de demostrar su sustentabilidad (Machado, 2007), como es el caso del presente estudio, el cual permitió determinar que la incorporación de un sistema de digestión anaerobia con recuperación energética disminuye en un **42%** los residuos sólidos a manejar, la utilización de energéticos y combustible fósiles en un **67%** y reduce en un **81%** las emisiones de GEI generadas por el manejo y disposición actual de lodos residuales que tiene la PTAR “El Naranja”.

Lo anterior concuerda con lo indicado por Murray (2008), ya que la utilización de ACV permitió determinar que la energía utilizada por los sistemas de digestión anaerobia en China disminuye en un **60%** el consumo energético y en más del **50%** la emisión de GEI.

Otros ACV realizados por Peters (2002, 2003 y 2009) para valorar la carga ambiental del tratamiento de biosólidos indican que la digestión anaerobia tiene un menor impacto al ambiente, pues se puede aprovechar el biogás generado para la generación de energía eléctrica.

El ACV también ha permitido valorar el potencial de generación de energía eléctrica por medio de la utilización de CH<sub>4</sub> en Europa, pues se estimó que su uso equivaldría a ahorrar 9 megatoneladas de petróleo (Tilche, 2008).

Cabe mencionar que estudios realizados por Becher (2008) en la PTAR de New Hampshire, EUA, indican que la mayor cantidad de CH<sub>4</sub> emitida a la atmosfera proviene de la disposición de lodos y biosólidos como relleno en tierra a cielo abierto y que la utilización de digestores anaerobios permite capturar hasta el **79%** de estas emisiones.

Por su parte el Instituto Nacional de Ecología - INE (2006) considera como propuesta de mitigación para reducir las emisiones de GEI generadas por México, la utilización de residuos para la generación de energía por medio del biogás, representando esta fuente de mitigación de emisiones del **26%**.

Los sistemas de recuperación energética no sólo disminuyen la emisión de GEI, sino también contribuyen a mejorar la calidad de vida de los habitantes que habitan cerca de la zona donde se encuentran ubicadas las PTAR y los sitios de disposición y manejo de lodos residuales.

Por eso es importante considerar la aceptación social para el aprovechamiento de los lodos residuales. De acuerdo con Beecher (2005) en un estudio de percepción realizado en Estado Unidos, se detectó que la gente no tiene conocimiento sobre la existencia de los lodos residuales y desconocen que estos lodos al ser estabilizados y convertirse en biosólidos pueden ser reutilizados, por lo que existe un rechazo. Esto concuerda con el resultado del análisis de percepción realizado, en el cual los entrevistados (habitante de la zona de influencia) indicaron desconocer la operatividad de la PTAR y los residuos que genera. Sin embargo consideran que el vivir cerca de esta instalación tiene efectos nocivos sobre su salud, pues comentaron tener molestias como irritación en ojos y garganta e incluso dolores de cabeza frecuentes. Estudios similares (Renner, 2002), indican que los residentes dentro de 1 kilómetro a la redonda donde operan las PTAR y de donde se depositan lodos residuales o biosólidos, se quejan de erupciones en la piel, irritación en los ojos y garganta, y problemas pulmonares.

En el 2005 un estudio realizado en la PTAR del Norte de Ciudad Juárez, Chihuahua evidenció la preocupación de los habitantes de la zona sobre su salud, ya que han experimentado enfermedades crónicas como: alergias, problemas de las vías respiratorias, asma, dolores de cabeza y dificultad para concentrarse (ATSDR, 2005).

Adicionalmente los vecinos de la PTAR “El Naranja” indicaron no tener beneficio alguno por vivir cerca de una PTAR, ya que no cuentan con el servicio de drenaje y consideran que el vivir cerca de este tipo de instalaciones tienen un deterioro en su calidad de vida y la reducción del valor de sus propiedades, lo que concuerda con el estudio de la PTAR de Cd. Juárez (ATSDR, 2005).

Lo anterior se contrapone con lo expuesto por las entrevistas realizadas a Maestros de una Institución Educativa (Secundaria) localizada en la zona de influencia, las cuales ven que su cercanía con la PTAR “El Naranja” presenta la oportunidad de visitar las instalaciones por cuestiones didáctica y ayudar a su labor docente.

Los habitantes de la zona de la PTAR “El Naranja” están dispuestos a correr el riesgo que implica vivir cerca de una planta de biogás, esto debido a que, no piensan vender su patrimonio para mudarse y porque, cómo lo menciona Botterill (2004), la percepción del riesgo es la manera en que las personas entienden el riesgo, el cual depende de su contexto social, cultural, moral y de su experiencia personal, por lo que la gente adopta el nivel de riesgo dependiendo de qué tan seguro se sienta, mientras mayores medidas de seguridad puedan ver, menor será el nivel de riesgo que la gente tenga.

Una parte importante para que las personas entiendan y acepten el riesgo depende de la capacidad de los responsables políticos y de los gobernantes de transmitir la información, de manera oportuna; lo que concuerda con lo que los habitantes de la zona solicitan, que se les informe oportunamente no sólo sobre la construcción y operación de una planta de biogás, sino que se les informe sobre los planes y programas de atención a emergencias y que deben de hacer ellos en caso de algún incidente.

Por lo anterior es importante que CESPE comunique el tipo de riesgo al que se incurriría mediante la instalación de digestores y una planta de biogás, en el momento que consideren realizar el proyecto propuesto.

Otros estudios sobre la percepción del riesgo por vivir cerca de una fuente generadora de energía indican que esta depende de la confianza que los habitantes tengan en los operadores del sistema. Como ejemplo se tiene el estudio de percepción realizado a los residentes de Hong Kong sobre la operación de la planta nuclear de Daya Bay, la cual indicó que el 34.5% de estos sienten confianza de la eficiencia operativa, ya que oportunamente se les comunicó el plan de emergencia; adicionalmente indican que en caso de fuga se mudarían inmediatamente del lugar (Chung, 2013).

En el caso particular de la plantas de biogás estudios realizados en Suiza indica que la aceptación de los habitantes cercanos a estas sumamente positivo, y que esta aceptación depende en gran medida de la confianza que se le tiene a la empresa encargada de la operación y el hecho de que se les ha mantenido informados desde la construcción hasta su operación diaria (Soland, 2013). Esto es de vital importancia si es que se implementara el sistema de digestión con recuperación energética pues la comunicación de riesgos permite que la comunidad de la zona de influencia de la PTAR “El Naranja” conozca el riesgo, lo identifique y lo acepte (Powell, 1996).

Es importante mencionar que CESPE, considera importante que se involucre a la comunidad en cualquier tipo de proyectos de nueva infraestructura y considera importante la generación de nuevos proyectos enfocados a la disminución de costos por manejo de lodos residuales y de ahorro energético. Sin embargo indican que el inconveniente es la inversión inicial necesaria, pues depende de la disponibilidad de presupuesto gubernamental.

Aun cuando las instituciones como CESPE dependen de un presupuesto para la implementación y desarrollo de nuevos proyectos, estos deberían considerar el potencial que tienen en específico con la PTAR “El Naranja” de generar productos que tienen un valor económico en el mercado y que puedan

venderse para generar ingresos extras que le permitan invertir en estos nuevos proyectos y desarrollos.

Tan solo la PTAR “El Naranja” actualmente produce **374 ton/año** de composta, la cual regalan a instituciones y empresas con la finalidad de ser utilizados como fertilizante de jardines ornamentales; el valor económico de composta es de **\$20,000 pesos** la tonelada, por lo que si CESPE vendiera la composta al público sus ganancias anuales serían cercanas a **7.28 millones de pesos**.

Si se instalara un sistema de digestión anaerobia con recuperación energética se generarían más productos vendibles, como los biosólidos clase B cuyo valor en el mercado es de **\$6.45 pesos** el kilo, lo que implicaría una ganancia anual de **107.7 millones de pesos**; además con este tipo de instalación también se generaría energía eléctrica lo que implicaría un ahorro anual para la PTAR “El Naranja” por consumo energético de **\$6.5 millones de pesos**.

Este ahorro concuerda con lo indicado por Rittman (2008) en un análisis realizado en una PTAR de Arizona con capacidad entre 500 y 1000 lps, demostrando que el utilizar el biogás como fuente de energía reduce en aproximadamente **\$540,000 dólares por año**, sus gastos energéticos.

La inversión necesaria para incorporar este tipo de sistemas de acuerdo con las especificaciones para la PTAR “El Naranja” es de **\$25.6 millones de pesos**, la cual de acuerdo con los análisis de factibilidad realizados tiene un periodo de retorno de **3 años** si se venden los productos generados con una tasa interna de retorno de **313%**. A su vez Rittman (2008) establece en su estudio el mismo periodo de recuperación para este tipo de sistemas.

Hay que considerar que como parte de la viabilidad económica para la instalación de un sistema de digestión anaerobia con recuperación energética, se debe tener una producción mínima por hora de CH<sub>4</sub> de **5 m<sup>3</sup>** (Grupo Aqua Limpia, 2011), para lo cual cumple ampliamente el presente proyecto pues el estimado mínimo de producción de CH<sub>4</sub> por hora fue de **75 m<sup>3</sup>**.

En el caso de los proyectos con beneficio social, como es el caso del presente, lo más adecuado es utilizar el Análisis Costo-Impacto (ACI) con la

finalidad de determinar los costos asociados a la incorporación del nuevo proyecto y su relación con el impacto social generado (CEPAL, 2006).

Como resultado de la aplicación de la metodología ACI al sistema propuesto se obtuvo que aunque la inversión inicial es importante reduce en un **81%** los gastos anuales por manejo, equivalente a **\$7.2 millones pesos** y un **25%** en todos los costos en los que se incurren (operativos y habitantes de la zona). Lo anterior difiere de Onyeche (2011) al indicar que la incorporación de un sistema de digestión anaerobia con recuperación energética reduce en un **30%**, los gastos por manejo y concuerda aproximadamente con lo establecido por Rittman (2008), cuyos ahorros anuales estimados por gastos de operación son entre **40-60%**.

La incorporación del sistema a la PTAR “El Naranja” tiene un impacto total ponderado de **40**, en comparación con **18** de continuar con el manejo actual, lo que indica que genera un menor impacto a la comunidad y el ambiente, aún cuando la implementación del sistema propuesto incremento el riesgo por explosión o incendio.

Por último, el costo por unidad de impacto es un **46%** menor que el de mantener el manejo actual de lodos.

El caso de Collins (2012), quien realizó un ACI para valorar el impacto social de la instalación de un sistema de generación de energía renovable para sustituir la utilización de carbón, dando como resultado que el costo-impacto de generar energía utilizando fuentes renovables es menor que el de utilizar el carbón como fuente generadora.

Sin duda la factibilidad de implementar un sistema de digestión anaerobia con recuperación energética en la PTAR “El Naranja” resulta factible, pues no sólo permite disminuir el volumen de los lodos a manejar y reduce por lo tanto sus gastos anuales de manejo, sino que repercute positivamente en el ámbito ambiental y social.

## 5. CONCLUSIONES.

Para el caso específico de la PTAR “El Naranja” con capacidad de 500 lps, resulta factible la incorporación de un sistema de digestión con recuperación energética, ya que reduce el volumen de lodos a manejar en **42%** anual y genera el **88%** de energía eléctrica para cubrir sus propios requerimientos energéticos y el del sistema propuesto.

Adicionalmente al implementar este tipo de sistemas los GEI generados por los lodos residuales durante su proceso de descomposición son capturados, por lo que las emisiones al ambiente se reducirían en un **81%** y la utilización de combustibles fósiles en un **67%**, lo que implica que el impacto ambiental de estos sistemas sería **69%** menor que los sistemas de gestión tradicional que se lleva a cabo en las PTAR del país.

El estudio de percepción de los habitantes de la zona de influencia indicó que están dispuestos a que se construya un sistema de digestión anaerobia con recuperación energética que tenga beneficios a su salud y el medio ambiente, pero solicitan se les informe del proyecto con detalle, así como de los riesgos y planes de atención a emergencias, con la finalidad de poder actuar adecuadamente en caso de emergencia.

CESPE está consciente del problema de manejo que representan los lodos residuales, sin embargo la implementación del sistema propuesto en la PTAR “El Naranja” implica una inversión que por el momento no pueden realizar.

La incorporación de un sistema de digestión anaerobia con recuperación energética en la PTAR “El Naranja” no sólo representa un beneficio ambiental, sino también económico, pues la incorporación de digestores y el aprovechamiento del biogás para producir energía representa un ahorro del **27%** anual en gastos operativos para la PTAR, un ahorro en los habitantes de la zona ocasionados por afectación a su salud del **25%**; por lo que si la PTAR “El Naranja” incorpora este tipo de sistema, el manejo de sus lodos se consideraría como un sistema de manejo sustentable al minimizar los costos y sus impactos.

La valoración del sistema propuesto en el presente proyecto se llevó a cabo mediante una aproximación interdisciplinaria, con la finalidad de verificar el

cumplimiento del proyecto con los tres ejes de la sustentabilidad, al haber considerado no sólo aspectos de ingeniería sino su impacto en el ámbito social, ambiental y económico.

En conclusión la instalación de un sistema de digestión anaerobia con recuperación energética en la PTAR “El Naranjo” es viable desde un punto de vista sustentable.

## 6. REFERENCIAS.

- Agler, M., Aydinkaya. Z., Cummings. T., Beers. A., Angenent. L. (2010). Anaerobic digestion of brewery primary sludge to enhance bioenergy generation: A comparison between low- and high-rate solids treatment and different temperatures. *Bior. Tech.* 101, 5842-5851.
- Akerlund, A. (2008). *Evaluation of a disintegration technique for increased biogas production from excess activated sludge*. Department of Microbiology, Swedish University of Agricultural Science. Uppsala, Sweden. 53 pp.
- Álvarez, J.; Caneta, L: y Moyano, C. *Biomasa y bigas*. Universidad Nacional del nordeste. Facultad de Ingeniería.
- Alotto, P.; Guarnieri, M.; Moro, F. y Stella, A. (2013). Large scale energy storage with redox flow batteries. *The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*. 32 (5) pp. 1459-1470
- Arthur, R., Brew-Hammond. A. (2010). Potential biogas production from sewage sludge: A case study of the sewage treatment plant at Kwame Nkrumah university of science and technology, Ghana. *IJEE*. 1, 1009-1016.
- Arvizu, J. (2008). *Actualización del inventario nacional de gases de efecto invernadero 1990-2006 en la categoría de desechos*. Instituto de investigaciones eléctricas e Instituto Nacional de Ecología. México, D.F. 137 pp.
- ATSDR. Agency for toxic substances and disease registry. (2005). Consulta de salud H<sub>2</sub>S; Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Norte de Cd. Juárez El Paso, Condado de El Paso, Texas / Juárez, Chihuahua, México.
- Barragan, A. (2011). Evaluación financiera y socioeconómica a la propuesta de implementación de los sistemas de información radiológica en el hospital de la misericordia, por parte de la multinacional Agfa healthcare. universidad militar nueva granada facultad de ingeniería. Bogotá, Colombia.
- Becerril, J. (2009). Contaminantes emergentes en el agua. *Revista Digital UNAM*. 10, 1-6.

- Beecher, N., Harrison. E., Goldstein. N., McDaniel. M., Field. P., Susskind. L. (2005). Risk Perception, Risk Communication, and Stakeholder Involvement for Biosolids Management and Research. *J. Environ. Qual.* 34 122-128.
- Beecher, N. (2008). A Greenhouse gas emissions analysis of biosolids management options for Merrimack, NH. North East Biosolids and Residuals Association (NEBRA). New Hampshire, EUA. 35 pp.
- Botterill, L. (2004). Risk & risk perception A literature review. A report for the Rural Industries Research and Development Corporation. The Australian National University
- Calderon, M. (2004). Costo por unidad de impacto en el programa de Teniasis Cisticercosis,. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú.
- Cardoso, L., Ramírez E., Escalante V., Moeller C. (2000). Manejo de lodos residuales en México. Memorias. XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Puerto Alegre, Brasil. 3 al 8 de diciembre, 2000. 1-7.
- Casal, J. (2003).Tipos de muestreo. *Epidem. med. prev.* 1, 3-7.
- Castrejon, A.; Barrio, A.; Jiménez, B.; Maya, C.; Rodríguez, A. y González, A. (2003). Evaluación de la calidad de lodos residuales de México. Instituto de ingeniería. Grupo de tratamiento y reúso. UNAM. México. D.F.
- Cengel, Y. (1997). Termodinámica. México, D.F: Editorial McGraw-Hill.
- CEPAL (2005). SIFEM: sistema integrado de formulación, evaluación y monitoreo de programas y proyectos sociales.
- CEPAL (2006). Metodologías e Instrumentos para la formulación, evaluación y monitoreo de programas sociales: Análisis costo-impacto. Recuperado de <http://www.comfama.com/contenidos/servicios/GerenciaSocial/Cursos/Cepal/Descargar/CEPAL-An%C3%A1lisis%20Costo%20Impacto.pdf>
- CESPE, Comisión Estatal de servicios públicos de Ensenada. (2011a). Análisis de lodos residuales para cumplimiento con la normatividad de la Planta de Tratamiento de agua Residual “El Naranja”, Comisión Estatal de Servicios Públicos de Ensenada. Reporte. Ensenada, Baja California. 12 pp.

- CESPE, Comisión Estatal de servicios públicos de Ensenada. (2011b). Reporte de producción de lodos residuales en la Planta de Tratamiento de agua Residual “El Naranja”, Comisión Estatal de Servicios Públicos de Ensenada. Reporte. Ensenada, Baja California. 1 pp.
- CESPE, Comisión Estatal de servicios públicos de Ensenada. (2011c). Reporte de los gastos mensuales y anuales de energía eléctrica de la Planta de Tratamiento de agua Residual “El Naranja”, Comisión Estatal de Servicios Públicos de Ensenada. Reporte. Ensenada, Baja California. 1 pp.
- CESPE, Comisión Estatal de servicios públicos de Ensenada. (2012a). Plantilla de personal 2012. Recuperado de <http://www.transparenciabc.gob.mx/portal/areas/paraestatales/cespe.html>
- CESPE, Comisión Estatal de servicios públicos de Ensenada. (2012b). Adquisiciones y servicios 2012. Recuperado de <http://www.transparenciabc.gob.mx/portal/areas/paraestatales/cespe.html>
- CESPE, Comisión Estatal de servicios públicos de Ensenada. (2013). Datos sobre infraestructura. Recuperado de <http://www.cespe.gob.mx/?id=infraestructura>
- Chung, W. y Yeung, I. (2013). Attitudes of Hong Kong residents toward the Daya Bay nuclear power plant. *Energy Policy*. 62, 1172–1186.
- Cisneros. M., Araluce. R., Vargas. A., Cabirol. N., Morgan. J., Noyola. A. (2005). Digestión anaerobia en dos etapas de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales. Universidad Autónoma de México (UNAM). México D.F. pp. 6
- Clarke. B., Smith. S. (2011). Review of ‘emerging’ organic contaminants in biosolids and assessment of international research priorities for the agricultural use of biosolids. *En. Int.* 37, 226-247.
- Coelho S., Velázquez S., Silva O., Osvaldo S., Varkulya A., Pecora V. (2004). Rational energy use and alternatives sources use of biogas at USP–PUREFA. Memorias. International Workshop Bioenergy for a sustainable development. Viña del Mar, Chile. 8 al 9 de noviembre, 2004. Archivo digital.

- Coelho S., Velázquez S., Silva O., Osvaldo S., Pecora V. (2006a). Energy Generation by a Renewable Source–Sewage Biogas. *Memoerias*. Evento del Cambio climático y Energía. Rio de Janerio, Brasil. 17 a 18 de noviembre, 2006. Archivo digital.
- Coelho S., Velázquez S., Silva O., Pecora V., Abreu F. (2006b). The Production of Sewage Biogas and its Use for Energy Generation. *Memorias*. Conferencia y exhibición mundial de bioenergía. Jönköping, Suecia. 30 de mayo al 01 de junio, 2006. Archivo digital.
- Collins, R.; Hansen, E. y Hendryx, M. (2012). Wind versus coal: Comparing the local economic impacts of energy resource development in Appalachia. *Energy Policy* 50, 551–561.
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua (2011). *Agenda del agua 2030*. Comisión Nacional del Agua. Informe. México, D.F. pp. 70.
- CNC, Congreso Nacional Chileno. (2009). Decreto 4. Reglamento para el manejo de lodos residuales generados en plantas de tratamiento de aguas servidas. Congreso Nacional de Chile. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. 28 de Octubre de 2009.
- Daguer G. (2004). Gestión de biosólidos en Colombia. *Memorias*. Congreso internacional ACODAL sociedad, ambiente y futuro. Santiago de Cali, Colombia. 29 al 31 de octubre, 2003. Archivo digital.
- Deublein D. y Steinhauser A. (2011). *Biogas from Waste and Renewable Resources, An Introduction*. 2a ed. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Weinheim, Alemania. 520 pp.
- DOF, Diario Oficial de la Federación de México. (2012). Parámetros de estimación de vida útil. Recuperado de [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5264340&fecha=15/08/2012](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5264340&fecha=15/08/2012)
- Dohányos. M., Zabranská. J. (2001). Anaerobic digestion. En: *Sludge into biosolids: Processing, Disposal, Utilization*. (L. Spinosa, P. A. Vesilind, Eds.) IWA publishing, London, UK, pp. 223-241.

- Duque. D., Galeano. U., Mantilla. G. (2006). Evaluación de un digestor tipo "Plug Flow". Recuperado de <http://www.lrrd.org/lrrd18/4/duqu18049.htm>. 25/10/2011.
- Duro, J. Fases y diseño de la investigación cualitativa. JANO. 1, 48-50.
- Dzaman. K., Wojdas. A., Rapiejko. P., Jurkiewicz. D. (2009). Taste and smell perception among sewage treatment and landfill workers. IJOMEH. 22, 227-234.
- Empresa ACZIA (2012). Información Técnica sobre la vida útil de plantas de biogás. Recuperado de <http://www.aczia-biogas.es>
- EPA, Environmental Protection Agency. (2000). Biosolids Technology Fact Sheet Land Application of Biosolids. United States Environmental Protection Agency. Manual. EUA. 9 pp.
- EPA, Environmental Protection Agency. (2006). Emerging Technology for biosolids management. United States Environmental Protection Agency. Manual. EUA.135 pp.
- EPA, Environmental Protection Agency y Methane to Markets asociación. (2008). Emisiones mundiales de metano y oportunidades de atenuación. Environmental Protection Agency & Methane to Markets. Informe. EUA. 4 pp.
- EPA, Environmental Protection Agency (2007). Risk Communication in Action: The Risk Communication Workbook. 75p.
- Ghazy. M., Dockhorn. T., Dichtl. N. (2009). Sewage Sludge Management in Egypt: Current Status and Perspectives towards a Sustainable Agricultural Use. World Academy of Science, Engineering and Technology. 57, 492-500.
- Gilroyed. B., Reuter. T., Chu. A., Hao. X., Xu. W., McAllister. T. (2010). Anaerobic digestion of specified risk materials with cattle manure for biogas production. Bior. Tech. 101, 5780-5785.
- Gobierno Federal Mexicano, dirección de estadística. (2010). Pobreza y Genero. Recuperado de [http://ovsyg.ujed.mx/docs/biblioteca-virtual/Pobreza\\_y\\_genero.pdf](http://ovsyg.ujed.mx/docs/biblioteca-virtual/Pobreza_y_genero.pdf)

- Goetz, J y Lecompte, M. (1988). *Etnografía y diseño cualitativo en investigación educativa*. Editorial. Morata. España.
- González, E.; Tornero, M.; Ángeles, Y. y Bonilla y Fernández, M. (2009). Concentración total y especiación de metales pesados en biosólidos de origen urbano. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 25 (1) 15-22.
- Google Earth. (2012). Mapas digitales.
- Grupo Aqua Limpia (2011). Información Técnica de sistemas de digestión anaerobia con recuperación energética. Recuperado de <http://www.aqualimpia.com>.
- Guardado (2006). *Tecnología del biogás. Manual del Usuario*. Cuba solar. La Habana, Cuba. 22 pp.
- Hall (2000). *Ecological and economical balance for sludge management options*. WRc plc, Medmenham. Marlow, United Kingdom. 59 pp.
- Hao, J.; Hills, M. y Huang, T. (2007). A simulation model using system dynamic method for construction and demolition waste management in Hong Kong. *Construction Innovation*. 7 (1) pp. 7-2.
- Hoof, B., Monroy, N., y Saer, A. (2008). *Producción más limpia*. México, D.F: Editorial Alfaomega.
- IDEA, instituto vara la diversificación y uso de la Energía (2007). *Biomasa y Digestores Anaerobios*. Gobierno de España.
- IMSS, Instituto Mexicano del seguro social. Población que sufre de cefaleas. Reporte recuperado de <http://www2.esmas.com/salud/108407/cefalea-primer-causa-ausentismo/>
- IMTA, Instituto Mexicano de Tecnología del agua. (2000). *Políticas públicas y normatividad sobre agua y lodos residuales*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Informe. México, D.F. 8 pp.
- IMTA, Instituto Mexicano de Tecnología del agua. (2012). *Programa de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua, Horizonte 2030*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Documento para propuesta de discusión. México, D.F. 57 pp.

- INE, Instituto Nacional de Ecología. (2006). Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero. Instituto Nacional de Ecología. Informe. México, D.F. 50 pp.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI. (2012). Estadísticas y censo poblacional. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/>
- Infantes P. (2007). Diseño de Biodigestores, Tabla de valores TS [en línea]. <http://www.engormix.com/MA-porcicultura/manejo/articulos/diseño-biodigestores-t976/p0.htm>. 25/03/2011.
- Izquierdo, A.; Grau, H. y Aide, M. (2011). Implications of Rural-Urban Migration for Conservation of the Atlantic Forest and Urban Growth in Misiones, Argentina (1970–2030). *AMBIO* 40 (2) 98–309.
- Jiménez B., y Wang L. (2006). Sludge Treatment and Management. En: *Municipal Waste Water Management in Developing Countries: Principles and Engineering*. (Z. Ujang, M. Henze, Eds.). IWA Publishing. London, UK, pp. 237-292.
- Jiménez B. (2011). Latin America: Mexico. En: *Wastewater sludge: a global overview of the current status and future projects*. (L. Spinosa, Ed.). IWA publishing. London, UK, pp. 47-50.
- Johnson, C. (2010). Prairie Wetland Complexes as Landscape Functional Units in a Changing Climate. *BioScience* 60. 128–140.
- Kabir, H.; Yegbemey, R. y Bauer, S. (2013). Factors determinant of biogas adoption in Bangladesh. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 28, 881–889.
- Kargbo. D. (2010). Biodiesel Production from Municipal Sewage Sludges. *Energy Fuels*. 24, 2791-2794.
- Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos (LEGEPIR) (2007). Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. Diario oficial de la federación 19 de Junio de 2007.
- Machado, A.P.; Urbano, L; Brito, A.G; Janknecht, J.; Salas, J.; y Nogueira, R. Life cycle assessment of wastewater treatment options for small and decentralized communities *Water Science & Technology* . 56 (3) 15–22.

- Mahamud. M., Gutiérrez. A. (1996). Biosólidos generados en la depuración de aguas (I): Planteamiento del problema. *Ingeniería del Agua*. 3, 47-62.
- Malik. S., Bharti. U. (2009). Biogas production from Sludge of Sewage Treatment Plant at Haridwar. *Asian J. Exp. Sci.* 23, 95-98.
- Mantilla. G., Chacón. J., Moeller. G. (2008). Emisiones de gas de efecto invernadero: aportes generados por el tratamiento y descarga de aguas residuales domésticas en México. *Memorias. XXXI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. Santiago, Chile. 12-15 de octubre, 2008. Archivo digital.
- McDougall, F., White, P., Franke, M., y Hindle, P. (2003). *Integrated solid waste management: a Life Cycle Inventory*. Berlin, Alemania: Editorial Blackwell Science.
- Mirumachi, N. y Torriti, J. (2012). The use of public participation and economic appraisal for public involvement in large-scale hydropower projects: Case study of the Nam Theun 2 Hydropower Project. *Energy Policy*. 47, 125–132
- Misra. V., Pandey. S. (2005). Hazardous waste, impact on health and environment for development of better waste management strategies in future in India. *Env. Int.* 31, 417-431.
- Murray, A.; Horvath, A.; y Nelson, K. (2008). *Hybrid Life-Cycle Environmental and Cost Inventory of Sewage Sludge Treatment and End-Use Scenarios: A Case Study from China*. Energy and Resources Group and Department of Civil and Environmental Engineering, University of California.
- Nabaeethan, N.; Topczewski, P.; Royer, S. y Zitomer, D. (2009). Blending anaerobic co-digestates: synergism and economics. *Water Science & Technology*. 63 (12) 2916-2922.
- Nakasima. M., Velázquez. N., Ojeda. S. (2011). Tecnologías para el tratamiento de los residuos sólidos orgánicos del sector residencial y su aprovechamiento como fuente de energía. *Memorias. 4to. Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*. México, D.F. 5 al 7 de octubre, 2011. 535-542.

- Neve, P.; Norsworthy, J.; Smith, L. y Zelaya, I. (2011). Modeling Glyphosate Resistance Management Strategies for Palmer Amaranth (*Amaranthus palmeri*) in Cotton. *Weed Technology* 25, 35–343.
- Núñez. D. (2002), Wastewater treatment and sewage sludge management in Galicia: Agricultural and environmental aspects. *EJEAFChe*. 1, 23-29.
- Onyeche. T. (2011). Economic benefits of low pressure sludge homogenization for wastewater treatment plants. *CUTEC-Institute*. 1, 417-422.
- Oropeza. N. (2006). Lodos residuales: estabilización y manejo. *Caos Conciencia*. 1, 51-58.
- Ortiz. M., Gutiérrez. M., Sánchez. E. (1995). Propuesta de manejo de lodos residuales de la Planta de tratamiento de la ciudad industrial del Valle de Cuernavaca, Estado de Morelos, México. *Rev. Int. Contam. Ambient*. 11, 105-115.
- Pavan. P., Bolzonella. D., Battistoni. E., Cecchi. F. (2007). Anaerobic co-digestion of sludge with other organic wastes in small wastewater treatment plants: an economic considerations evaluation. *Water Science & Technology*. 56, 45-53.
- Perilhon, C., Alkadee, D., Descombes, G., y Lacour, S. (2012). Life cycle assessment applied to electricity generation from renewable biomass. *Energy Procedia*. 18, 165-176.
- Peters, G. y Lundie, S. (2002). Life-cycle assessment of biosolids processing options. *Journal of industrial ecology*. 103-121.
- Peters, G. y Lundie, S (2003). Life-cycle assessment of biosolids processing options. Sidney Water Corporation.
- Peters, G. y Rowley, H.. (2009). Environmental Comparison of Biosolids Management Systems Using Life Cycle Assessment. School of Civil and Environmental Engineering, University of New South Wales, Australia.
- Powell, D. (1996). An Introduction to Risk Communication and the Perception of Risk. University of Guelph. Consultado en: <http://www.foodsafetynetwork.ca/risk/risk-review/risk-review.htm>

- Protocolo de Kyoto. (2005). Kyoto Protocol to United Nations Framework Convention On Climate Change. United Nations. Protocolo. Kyoto, Japón. 21 pp.
- Rader, M.; Brennan, L.; Brazil, K.; Hernández, F. y Silvy, N. (2011). Simulating Northern Bobwhite Population Responses to Nest Predation, Nesting Habitat, and Weather in South Texas. *Journal of Wildlife Management* 75 (1), 61–70.
- Relea. F., Jiménez. E., González. E., Haberbauer. M., Broto. F., Ribas. C., Gotor. G., Roig. E., Vallmitjana. N. (2009). Proyecto MICROPHILOX: Valorización energética de biogás en depósitos controlados mediante microturbinas. *Infoenviro*. 1, 1-3.
- Rendón, C.; Jiménez, B. y Barrios, J. (2002). Evaluación microbiológica de un lodo residual de México: perspectivas de reúso. XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental Cancún, México, 27 al 31 de octubre.
- Renner. R. (2002). NRC targets pathogens in sludge for research. *Environmental Science & Technology*. 1, 338.
- Rittman. B., Lee. H., Zhang. H., Alder. J., Banaszak. J., Lopez. R. (2008). Full-scale application of focused-pulsed pre-treatment for improving biosolids digestion and conversion to methane. *Water Science & Technology*. 58, 1895-1901.
- Rizzardini. C., Goi. D. (2009). Considerations About European Directives and Italian Regulation on Sludge from Municipal Wastewater Treatment Plants: Current Status and Future Prospective. *The Open Waste Management Journal*. 2, 17-26.
- Rubia. M., Perez. M., Romero. L., Sales. D. (2002). Anaerobic Mesophilic and Thermophilic Municipal Sludge Digestion. *Chem. Biochem. Eng. Q*. 16, 119-124.
- Rulkens. W. (2007). Sewage Sludge as a Biomass Resource for the Production of Energy: Overview and Assessment of the Various Options. *Energy Fuels*. 22, 9-15.

- Sampieri, R., Fernández. C., y Baptista. P. (2003). Metodología de la Investigación. México, D.F: Editorial McGraw-Hill Interamericana.
- Santopietro, G.; Stephenson, K.; Satyal, V. y Wesson, J. (2009). A Bioeconomic Analysis of Management Plans for the Public Oyster Grounds of the Rappahannock River. *Journal of Shellfish Research*, 28 (2), 235–241.
- SEIA, Sistema Estatal de Información del Agua. Recuperado de <http://seia.guanajuato.gob.mx/seianuevo/seiawordpress/?cat=47>.
- SEMARNAT, Secretaria de medio ambiente y recursos naturales. (2002). NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental; lodos y biosólidos; especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Diario Oficial de la Federación*. 15 de Agosto de 2002.
- SEMARNAT, Secretaria de medio ambiente y recursos naturales y SSA, Secretaria de salud. (2003). NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2002. Protección ambiental, Salud ambiental, Residuos peligrosos biológico infecciosos, Clasificación y especificaciones de manejo. *Diario Oficial de la Federación*. 17 de febrero de 2003.
- SEMARNAT, Secretaria de medio ambiente y recursos naturales. (2003). NOM-053-SEMARNAT-1993. Procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente. *Diario Oficial de la Federación*. 23 de Abril de 2003.
- SEMARNAT, Secretaria de medio ambiente y recursos naturales. (2006). NOM-052-SEMARNAT-2005. Características, procedimiento de identificación y clasificación de los residuos peligrosos. *Diario Oficial de la Federación*. 23 de Junio 2006.
- SEMARNAT, Secretaria de medio ambiente y recursos naturales. (2008). Programa Nacional para la prevención y gestión integral de los residuos 2009-2012. Secretaria de Medio ambiente y Recursos Naturales. Informe. México, D.F. 174 pp.

- Sierra, F. (1998). Función y sentido de la entrevista cualitativa en la investigación social. En: Técnicas de investigación en sociedad, cultura y comunicación. México. Editorial Pearson Addison Wesley. pp.277-354.
- Snyman. H., Alexander. W., Marx. C. (2000). Land disposal and agricultural reuse of sewage sludge within the framework of the current south african guidelines. Memorias. WISA 2000 Biennial Conference. Sun City, South Africa. 28 de mayo al 01 de junio, 2000. Archivo digital.
- Soland, M.; Steimer, n. y Walter, G. (2013). Local acceptance of existing biogas plants in Switzerland. Energy Policy. 61, 802–810.
- Solari. G. (2004a). Ficha Técnica Biodigestores. Recuperado de [www.solucionespracticas.org.pe](http://www.solucionespracticas.org.pe). 05/11/2011.
- Solari. G, (2004b). Ficha Técnica Planta de biogás. Recuperado de [www.solucionespracticas.org.pe](http://www.solucionespracticas.org.pe). 05/11/2011.
- Taylor, S. y Bodgan, R. (1987). La entrevista en profundidad. Barcelona, España. Editorial Pardos Ibérica.
- Tilche, A. y Galatola, M. (2008). The potential of bio-methane as bio-fuel/bio-energy for reducing greenhouse gas emissions: a qualitative assessment for Europe in a life cycle perspective,. Water Science & technology. 57 (11), 1683-1692.
- UN-HABITAT, United Nations Human Settlements Programme & Comisión Canadiense para el manejo de lodos, Comisión de alcantarillado y lodos residuales. (2008). Global atlas of excreta, wastewater sludge, and biosolids management: moving forward the sustainable and welcome uses of a global resource. 2a ed. United Nations Human Settlements Programme. New Brunswick, Canada. 632 pp.
- UDLAP, Universidad de las Américas Puebla. (2007). Evaluación de riesgos. Recuperado de [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/mgc/solismj/capitulo4.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/mgc/solismj/capitulo4.pdf).
- UNIFE, Universidad de Ferreira. (2000). Reuse of drinking water treatment plants sludges in agriculture: problems, perspectives and limitations. University of Ferrara. Artículo. Ferrara, Italy. 7pp.

Water Environment Federation & American Society of Civil Engineers (WEF & ASCE) (1998). Design of Municipal Wastewater Treatment Plants Volume III. 4a ed. Water environment federation preserving & embracing the global water environment. Virginia, EUA. 280 pp.

Zeynep. E., Forbes. R., Witherspoon. J., Adams. G., Hargreaves. R., Morton. R., Novak. J., Higgins. M. (2008). Recent findings on biosolids cake odor reduction: Results of WERF phase 3 biosolids odor research. JESH. 43, 1575–1580.

# ANEXOS

**ANEXO 1.**

**PORTADA DEL ARTÍCULO: UN RESIDUO APROVECHABLE: LODOS  
RESIDUALES.**

## **UN RESIDUO APROVECHABLE: LODOS RESIDUALES.**

Rebeca Rojas Remis y Leopoldo Mendoza Espinosa

Instituto de Investigaciones Oceanológicas, Universidad Autónoma de Baja California,  
Ensenada, Baja California

---

Las plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) son instalaciones donde el agua desechada de hogares, empresas y comercios es tratada con la finalidad de eliminar sus contaminantes y que pueda ser reutilizada o dispuesta en el mar, lagos o ríos, sin que genere un daño a la salud o al ambiente.

Sin embargo, el proceso de tratamiento del agua implica la generación de lodos conocidos como lodos residuales, compuestos principalmente por materia orgánica y por los elementos contaminantes que fueron removidos del agua. De ahí que los lodos residuales también deban ser tratados para eliminar o transformar sus elementos contaminantes y que no representen un riesgo para la salud o para el ambiente; se estima que los lodos residuales generan el 2.8% de los gases de efecto invernadero (GEI) a nivel mundial (UN-HABITAT, 2008).

Con el propósito de contextualizar el manejo de lodos residuales, su tratamiento y aprovechamiento, se realiza un análisis sobre su manejo en el mundo y se contrasta con información sobre el tema en México.

### **Lodos residuales**

Los lodos residuales son subproductos que se presentan de forma sólida o semisólida como consecuencia del tratamiento del agua residual, por lo que es importante que desde el diseño mismo de las plantas de tratamiento no sólo se contemple cómo tratar el agua sino también sus lodos.

## **ANEXO 2.**

**PORTADA DEL ARTÍCULO: EL POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EMPLEANDO BIOSÓLIDOS COMO FUENTE DE MATERIA PRIMA: EL CASO DE LA CIUDAD DE ENSENADA, BAJA CALIFORNIA.**

## El potencial de generación de energía eléctrica empleando biosólidos como fuente de materia prima: El caso de la ciudad de Ensenada, Baja California.

<sup>1</sup>Rebeca Rojas Remis, <sup>2</sup>Leopoldo G. Mendoza Espinosa  
reberemis@hotmail.com

### Resumen

Como consecuencia del tratamiento del agua residual se producen lodos residuales, también llamados biosólidos, que pueden utilizarse como fertilizante, estabilizador de suelos e incluso para generar energía. El manejo y disposición ineficiente de estos, representa un problema para el medio ambiente y la sociedad, por las cantidades que se generan y los volúmenes que ocupan. En México se estima que los lodos residuales generados por las 2,029 plantas de tratamiento de agua residual, generan 640 millones de toneladas por año, de los cuales el 64% se dispone como relleno en tierra. La planta de tratamiento de agua residual (PTAR) más grande de la ciudad de Ensenada, Baja California, operada por la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Ensenada (CESPE), denominada "El Naranja", maneja 30,000 toneladas de lodos al año provenientes de las 5 PTAR de la ciudad, los cuales desde hace 12 años han sido depositados como relleno en tierra. Dicha actividad representa un peligro latente al medio ambiente, por lo que es necesario encontrar maneras de tratar eficientemente estos lodos. Se realizó una estimación sobre el potencial de generación de biogás mediante la instalación de un sistema de digestión anaerobia utilizando como materia prima lodos residuales, así como el potencial de generación de energía eléctrica y sus diferentes usos en beneficio de la PTAR CESPE "El Naranja". Adicionalmente se hicieron estimaciones sobre los impactos ambientales y sociales benéficos que conlleva el reuso de biosólidos y se hizo una revisión y propuesta de mejora sobre la legislación mexicana vigente para su clasificación y aprovechamiento.

**Palabras Clave:** biosólidos, gas metano, lodos residuales, producción de energía

### 1. Introducción

El proceso de tratamiento de agua residual implica la generación de lodos residuales, compuestos por materia orgánica y por elementos contaminantes que fueron removidos del agua tales como metales pesados, materiales inorgánicos y contaminantes emergentes (productos de limpieza, plaguicidas, medicamentos y productos de cuidado personal). De ahí que los lodos residuales también deban ser tratados para eliminar o transformar sus elementos contaminantes y que no representen un riesgo a la salud o al ambiente, ya que se estima que los lodos residuales generan el 2,8% de los gases de efecto invernadero (GEI) a nivel mundial [1].

En el presente artículo se propone la digestión anaerobia como alternativa de tratamiento de lodos residuales para capturar el gas metano y usarlo como fuente de generación de energía eléctrica, disminuyendo los GEI y los riesgos a la salud. Se calcula la energía que se pudiera producir como resultado de esta actividad, sus posibles usos, se comenta sobre la legislación mexicana aplicable para uso y aprovechamiento de lodos residuales y se sugieren adecuaciones para fomentar la generación de energía empleando biosólidos como materia prima.

### 2. Desarrollo

#### 2.1 Lodos residuales, biosólidos, manejo y reuso

Hacia la sustentabilidad: Los residuos sólidos como fuente de energía y materia prima  
© 2011 pp 343-348 ISBN 978-607-607-015-4



**ANEXO 3.**

**POSTER: BIOSÓLIDOS COMO MATERIA PRIMA PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA.**



# BIOSÓLIDOS COMO MATERIA PRIMA PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA.

M.D. Rebeca Rojas Remis, Dr. Leopoldo G. Mendoza Espinosa

Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo  
Universidad Autónoma de Baja California



## OBJETIVO.

Determinar el potencial de generación de energía eléctrica utilizando biosólidos como materia prima, el caso de la Ciudad de Ensenada, B.C.

## ANTECEDENTES.

Como consecuencia del tratamiento del agua residual se producen lodos residuales, los cuales al ser estabilizados se convierten en biosólidos.

En México se estima que los lodos residuales/biosólidos generados por las 2,029 plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) que únicamente tratan el 37% del agua residual captada en el sistema de drenaje (88 m<sup>3</sup>/s) (CONAGUA 2011), generan 840,000 ton/a, de los cuales el 51% es estabilizado mediante digestión anaerobia, sin embargo el biogás generado durante este proceso no se recupera.



Figura 1. PTAR "El Naranjo"



Figura 2. Depósito de biosólidos en terrenos posteriores de la PTAR.

La PTAR "El Naranjo" es la más grande de la ciudad de Ensenada, B. C. (Figura 1) es operada por la CIESPE y maneja un promedio de 83 toneladas diarias de biosólidos, provenientes de las 4 PTAR de la ciudad, los cuales se depositan en terrenos posteriores de la planta como relleno en tierra a ciclo abierto (CIESPE 2010) (Figura 2).

Cuadro 1. Potencial de generación de energía eléctrica de biogás y del metano (Arthur 2010, Guardado 2005, Infantes 2011).

Gases.	Valor térmico (MJ/m <sup>3</sup> ).	Potencial energético (Kwh/m <sup>3</sup> ).
Biogás	21.5	9.5-8 <sup>*</sup>
Metano	37.75	9.8-10.4 <sup>*</sup>

<sup>\*</sup>Factor de conversión 1Kwh=3.6MJ

Por lo anterior se considera la reutilización de los biosólidos como materia prima para la generación de energía mediante la instalación de un digestor anaerobio que capture el biogás (0.31-0.38 m<sup>3</sup>/Kg).

El biogás obtenido contiene un 64-70% de metano (CH<sub>4</sub>) (Cianeros 2005). El biogás es un gas combustible al igual que el CH<sub>4</sub> y pueden utilizarse para generar energía eléctrica.

Para aprovechar mejor el biogás, es necesario limpiarlo con la finalidad de obtener CH<sub>4</sub> casi puro y aumentar la eficiencia energética. Con base en los datos del Cuadro 1 se hicieron las estimaciones para la cantidad de biosólidos producidos en la PTAR "El Naranjo", si se instalara un sistema de digestión anaerobia.

## RESULTADOS.

De acuerdo con las 83 ton/d de biosólidos que maneja la PTAR "El Naranjo", el potencial de generación de biogás es de 25,730 m<sup>3</sup>/d y 16,457 m<sup>3</sup>/d de CH<sub>4</sub>.

El potencial de generación de energía eléctrica si se utiliza el biogás es de 141,515 Kwh/d. En el caso limpiar el biogás y utilizar CH<sub>4</sub> el potencial de energía eléctrica es de 161,376 Kwh/d. Por su parte, el consumo energético de la PTAR es de 21,850 Kwh/d. Por lo tanto, con la generación de biogás alcanzaría para abastecer los requerimientos energéticos de la PTAR, del sistema de digestión anaerobia y un ahorro anual de \$7'008,771 pesos.

## CONCLUSIONES.

- ✓ La implementación de sistemas de digestión anaerobia con recuperación energética se consideran rentables al ser mayor la cantidad de ahorro energético que la inversión inicial.
- ✓ El desarrollo de proyectos enfocados al tratamiento y reuso de biosólidos contribuye a disminuir la contaminación ambiental y los riesgos a la salud pública, al evitar su depósito en terrenos a ciclo abierto.

Fecha: Marzo de 2012.

**ANEXO 4.**

**PORTADA DEL ARTÍCULO: UTILIZACIÓN DE BIOSÓLIDOS PARA LA  
RECUPERACIÓN ENERGÉTICA EN MÉXICO.**



Artículo de revisión / Review article / Artigo de revisão

Producción + Limpia - Julio - Diciembre de 2012, Vol.7, No.3 - 74-94

## Utilización de biosólidos para la recuperación energética en México

Rebeca Rojas Remis<sup>\*\*\*</sup> / Leopoldo G. Mendoza Espinosa<sup>\*\*\*\*</sup>

*Use of biosolids for energetic recovery in Mexico*

*Utilização de biosólidos para a recuperação energética no México*

### RESUMEN

El aumento de la población en México ha hecho que se incremente la red de aguas potable y drenaje; ello ha dado lugar a la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), lo que ha implicado mayor tratamiento de agua residual y, a su vez, un incremento en la cantidad de lodos residuales producidos. Los lodos residuales representan un problema ambiental por las cantidades, volúmenes y contaminación que generan; sin embargo, pueden aprovecharse para producir energía eléctrica por medio de sistemas de digestión anaeróbica; tan solo en México se generan alrededor de 640.000 toneladas anuales de lodos residuales. El alcance del presente artículo es realizar un análisis desde un punto de vista interdisciplinario a escala mundial sobre la utilización de biosólidos para la producción de energía y que sirva como base para el desarrollo de proyectos de esta índole en México.

**Palabras clave:** lodos residuales, gas metano, digestión anaeróbica, generación de energía.

\*Artículo derivado del proyecto de tesis doctoral "Potencial de recuperación energética empleando biosólidos como materia prima en Ensenada, B.C." elaborado entre febrero de 2011 y agosto 2012. \*\*Maestra en Docencia (M.D.), estudiante del Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, Baja California, México. \*\*\*Doctor, Investigador Titular, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Ensenada, Baja California, México.

Correspondencia: Rebeca Rojas Remis, e-mail: reberemis@hotmail.com

Artículo recibido: 05/09/2012; Artículo aprobado: 21/11/2012

**ANEXO 5.**

**PORTADA DEL ARTÍCULO: PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS  
RESIDUALES COMO SISTEMA COMPLEJO.**

## **PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES: UNA VISION COMO SISTEMA COMPLEJO.**

### **ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS: A VISÃO COMO SISTEMA COMPLEXO.**

### **WASTEWATER TREATMENT PLANT: A COMPLEX SYSTEM VISION.**

<sup>1</sup>Rojas-Remis, Rebeca <sup>2</sup>Mendoza-Espinosa, Leopoldo.

#### **RESUMEN**

Los sistemas complejos permiten evaluar sistemas cuya interacción de procesos y elementos es tal, que deben de analizarse como un conjunto para poder resolver los problemas que presenten.

Las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) pueden considerarse como sistema complejo debido a que sus procesos están íntimamente relacionados y generan nuevos procesos no previstos que no pueden subdividirse para analizar y modificar de forma independiente.

Debido a lo anterior se realiza un análisis de la PTAR “El Naranja” con capacidad de 500 litros por segundo, operada por la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Ensenada (CESPE), ubicada en Baja California (B.C.), México, desde una visión de sistema complejo, ya que este tipo de análisis permitió identificar nuevos procesos generados a partir de sus múltiples interacciones e identificar impactos ambientales potenciales para dar una propuesta de solución, que eficiente la operación de la PTAR y genere un menor impacto ambiental y social.

**ANEXO 6.**

**PORTADA DEL CAPÍTULO: GESTION SUSTENTABLE DE LODOS  
RESIDUALES: PROPUESTA PARA LA RECUPERACIÓN ENERGÉTICA Y  
REDUCCIÓN DE IMPACTOS.**

## **GESTIÓN SUSTENTABLE DE LODOS RESIDUALES: PROPUESTA PARA LA RECUPERACIÓN ENERGÉTICA Y REDUCCIÓN DE IMPACTOS.**

<sup>1</sup>Rebeca Rojas Remis, <sup>2</sup>Leopoldo G. Mendoza Espinosa, <sup>3</sup>Maria del Carmen Alcalá Álvarez.

<sup>1</sup> Maestra en Docencia (M.D.), estudiante del Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 177-56-80. reberemis@ite.edu.mx

<sup>2</sup> Doctor, Investigador Titular, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana-Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 174-54-62 ext.115. lmendoza@uabc.edu.mx

<sup>3</sup> Doctora, Profesora-Investigadora, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Calzada Universidad 14418 Parque Industrial Internacional Tijuana, C.P. 22390, Tijuana, Baja California, México, Tel: (664) 979-75-05 ext.54725. alcalá@uabc.edu.mx

### **RESUMEN**

El aumento poblacional en México ha hecho que se incremente la red de drenaje y la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), aumentando la generación de lodos residuales. En México para el 2011 las 2,029 PTAR públicas generaron 640,000 toneladas de lodos. Se espera que para el 2030 se incremente a 880,000 toneladas por año (CONAGUA, 2011). Los lodos residuales no sólo representan un problema ambiental y social, también representan un problema de manejo para los administradores de las PTAR, ya que se estima que el 45% de sus gastos anuales son usados para su manejo y disposición (Onyeche, 2010). En el caso de la ciudad de Ensenada, Baja California, la PTAR “El Naranja”, operada por la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Ensenada (CESPE), maneja 28,800 toneladas de lodos anualmente. Por lo anterior, se realiza un análisis para la instalación de un sistema de digestión anaerobia con recuperación energética, que colabore en la gestión sustentable de estos lodos. Para evaluar los beneficios que representa la incorporación de este tipo de sistema a las PTAR, se utilizó el análisis de ciclo de vida (ACV) y el análisis costo-impacto (ACI). Como resultado, se obtuvo que la incorporación del sistema propuesto representa un ahorro anual para CESPE del 88% en gasto energético, un 81% en gasto por manejo de lodos, y existe una disminución del 69% en el impacto ambiental (gases de efecto invernadero-GEI, residuos y consumo energético) que genera el manejo actual de estos lodos.

## **ANEXO 7.**

### **VERSIÓN DIGITAL DE LA TESIS Y DE LOS ANEXOS**



## **UN RESIDUO APROVECHABLE: LODOS RESIDUALES.**

Rebeca Rojas Remis, Oscar Delgado y Leopoldo Mendoza Espinosa

---

Las plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) son instalaciones donde el agua desechada de hogares, empresas y comercios es tratada con la finalidad de eliminar sus contaminantes y que pueda ser reutilizada o dispuesta en el mar, lagos o ríos, sin que genere un daño a la salud o al ambiente.

Sin embargo, el proceso de tratamiento del agua implica la generación de lodos conocidos como lodos residuales, compuestos principalmente por materia orgánica y por los elementos contaminantes que fueron removidos del agua. De ahí que los lodos residuales también deban ser tratados para eliminar o transformar sus elementos contaminantes y que no representen un riesgo para la salud o para el ambiente; se estima que los lodos residuales generan el 2.8% de los gases de efecto invernadero (GEI) a nivel mundial (ONU, 2008).

Con el propósito de contextualizar el manejo de lodos residuales, su tratamiento y aprovechamiento, se realiza un análisis sobre su manejo en el mundo y se contrasta con información sobre el tema en México.

### **Lodos residuales**

Los lodos residuales son subproductos que se presentan de forma sólida o semisólida como consecuencia del tratamiento del agua residual, por lo que es importante que desde el diseño mismo de las plantas de tratamiento no sólo se contemple cómo tratar el agua sino también sus lodos.

Los lodos residuales son indeseables por su composición y por los volúmenes que representan, ya que se estima que los 17 países con la

economía más desarrolladas del mundo generan por año el equivalente a llenar 14.8 veces el Estadio Azteca.

El tratamiento de lodos residuales implica un costo adicional al de la PTAR para su manejo y disposición, con la finalidad de disminuir su potencial de contaminación y de riesgo a la salud pública (Mahamud, 1996).

Aunque los lodos residuales son un problema a nivel mundial, poco se consideran y poco se hace para darles un tratamiento adecuado. En algunos países este tratamiento no existe, convirtiéndose en un problema de contaminación ambiental y de salud pública importante (ONU, 2008), debido a los gases que desprenden, los malos olores y las bacterias que pueden llegar a generarse, ya que los lodos residuales están compuestos en su mayoría por materia orgánica.

Existen diferentes tratamientos para reducir los volúmenes de lodos residuales o bien para estabilizarlos y volverlos *biosólidos*, es decir, un producto que pierde sus propiedades contaminantes y que puedan ser reutilizados.

Los tratamientos para la reducción de volumen son: deshidratación (para quitar la humedad) e incineración (realizar la combustión de los lodos mediante quemadores). El problema que se presenta con estos tratamientos es que la deshidratación únicamente reduce en un 20% el volumen mientras que la incineración reduce el volumen en un 80%, elimina los compuestos orgánicos tóxicos, pero destruye las bacterias y nutrientes que pudieran ser útiles para usarlo como fertilizante, además el proceso genera bióxido de carbono, provocando contaminación ambiental considerable y altos costos de operación (Cardoso, 2000).

En el caso de los procesos de estabilización las opciones son:

- Digestión anaerobia, llamada digestión debido a que las bacterias presentes en los lodos residuales se comen a la materia orgánica y a ellas mismas en ausencia de oxígeno, desprendiendo gas metano y provocando la disminución de la cantidad de materia orgánica por lo que pierde en gran porcentaje sus propiedades contaminantes.
- Digestión aerobia, en contraste al proceso anterior, éste se realiza en presencia de oxígeno provocando que las bacterias se coman la materia orgánica presente.
- Tratamiento químico el cual consiste en añadir cal a los lodos con la finalidad de volverlos menos ácidos evitando que aumente la cantidad de bacterias.

En los tres casos la estabilización está enfocada a eliminar o disminuir la materia orgánica presente en los lodos residuales. Sin embargo, otros compuestos como metales pesados, plaguicidas, plásticos, seguirán presentes, por lo que es importante someter los lodos residuales a un análisis para determinar si presentan características de corrosividad, radioactividad, explosividad, toxicidad y biológico-infecciosos (prueba CRETIB) y así establecer si son peligrosos para poder determinar el manejo y disposición final adecuado (Oropeza, 2006).

### **Un residuo aprovechable**

Si se determina mediante la prueba CRETIB que los lodos no representan un riesgo a la salud, pueden ser aprovechados con diferentes propósitos:

- **Composta:** consiste en añadir un material soporte (material seco que permita dar textura y solidez al biosólido) que en la mayoría de los casos es aserrín, lo cual permite crear una mezcla de materia



Fig. 1. Compostaje de lodos residuales, PTAR "El Naranja" Ensenada, B.C.

orgánica no contaminante, alta en nutrientes que puede ser utilizada como abono para plantas y pastos ornamentales.

- **Fertilizante:** una vez que se analiza la calidad del biosólido éste puede ser utilizado en la agricultura como un fertilizante natural, el cual debido a su alto contenido de nutrientes permite el crecimiento del cultivo y la disminución de moscas e insectos que pueden ocasionar problemas a los cultivos y a la salud de los agricultores.

- **Mejorador de suelos:** debido a las características del biosólido, éste puede utilizarse como relleno en suelos con alto contenido de salinidad o alcalinidad, ya que los nutrientes que contienen y su capacidad de reincorporación al suelo aumenta su fertilidad y pueden usarse para cultivar productos agrícolas.

- **Reutilización en procesos industriales:** dependiendo de su calidad, se pueden utilizar para la aplicación en pavimento, compactación del suelo, materiales para la construcción y material aditivo para la fabricación de concreto; tal es el caso de la empresa Extralum S.A. en Costa Rica que utiliza los lodos para la fabricación de cemento (Vargas, 2006).

- **Producción de energía eléctrica:** como resultado de la digestión anaerobia, se produce gas metano, el cual es posible capturar como combustible alternativo para un generador de energía eléctrica que puede utilizarse para abastecer de electricidad a la misma PTAR u otros usuarios.



Fig. 2. Digestores anaerobios para recuperación de energía, Nueva York, E.U.A

### **¿Qué se hace con los lodos en el mundo?**

En todos los países del mundo se generan lodos residuales, en mayor o menor escala, debido al tratamiento que recibe el agua residual.

Estados Unidos genera alrededor de 7.2 millones de toneladas por año de lodos residuales; sus PTAR cuentan con sistemas de reducción de volumen y estabilización, por lo que el 49% de los biosólidos se utilizan benéficamente para aplicación en la agricultura, silvicultura o mejorador de suelos, el 45% es dispuesto como relleno en tierra, confinamientos o simplemente es incinerado y el 6% tiene otros usos.

En Canadá, los lodos son estabilizados y posteriormente el 52% es utilizado como fertilizante en agricultura, 22% es incinerado (en algunos casos el vapor generado es utilizado para recuperación de energía), el 17% se deposita como relleno en tierra y el 9% restante en otros usos.

La unión Europea, constituida por 27 países, genera 9 millones de toneladas por año y destina el 45% de sus lodos residuales a la agricultura, el 23% a generación de energía térmica (por medio de la incineración), el 18%

como relleno en tierra y el 14% restante a elaborar composta y otros usos particulares.

Los tratamientos de lodos que utiliza China son la deshidratación y la digestión anaerobia para reducción de volumen y estabilización respectivamente, para posteriormente aplicar el 45% en la agricultura, 34.4% como relleno en tierra, 3.5% en la ganadería, 3.5% se incinera y el porcentaje restante a otros usos.

En América Latina, Brasil dispone el 45% como relleno en tierra, el 5.6% en la agricultura y el porcentaje restante es indefinido.

Es importante mencionar que el manejo de los lodos residuales más común en países en vías de desarrollo como Sudáfrica y Bulgaria es el de digestión anaerobia.

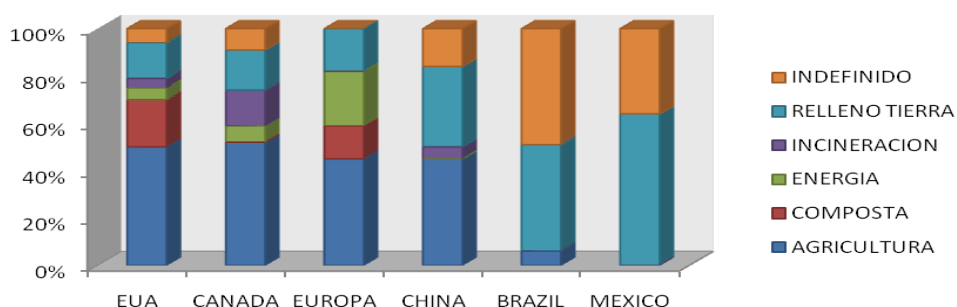


Fig. 3. Gráfico con estadísticas sobre el aprovechamiento de lodos residuales en México y otros países. Datos obtenidos del Atlas mundial del manejo de excreta, lodos residuales y biosólidos publicado por UN-HABITAT en 2008.

La gráfica 3 permite darnos cuenta que lamentablemente en América Latina no existe un buen manejo y aprovechamiento de lodos residuales, ni tampoco se cuenta con un programa de control de éstos, puesto que los datos estadísticos son escasos o nulos en algunos casos.

### ¿Qué hace México con sus lodos residuales?

En México no se tiene un dato oficial sobre la cantidad de lodos generados; SEMARNAT estima que se generan alrededor de 640 millones de

toneladas por año en las 2,029 PTAR que tiene registradas la CONAGUA, lo que equivale a llenar 522 veces el estadio azteca. La ONU estima que un 64% de estos lodos son depositados como relleno en tierra (a cielo abierto) generando problemas de contaminación ambiental y problemas a la salud.

Es importante mencionar que la mayoría de las PTAR en México no realizan un tratamiento de reducción de volumen y de estabilización de lodos, por lo que la cantidad de lodos residuales dispuestos anualmente es mucho mayor a la cantidad generada en otros países (Estados Unidos, Canadá, Unión Europea y China) debido a que estos poseen infraestructura que les permite reducir el volumen de lodos residuales generados.

Las PTAR de México que sí realizan algún proceso de reducción de volumen o estabilización utilizan usualmente el tratamiento químico con cal, incineración, digestión aerobia y muy rara vez la digestión anaerobia. Algunas PTAR utilizan un porcentaje de los lodos para elaborar composta y se han realizado trabajos de investigación sobre la composición química de los lodos con la finalidad de aprovecharlos como fertilizante natural de cultivos agrícolas.

Como ejemplo de las PTAR que utilizan el proceso de digestión anaerobia, se tienen las PTAR de la ciudad de La Paz, Baja, California, Sur. y la de la ciudad de Culiacán, Sinaloa, que además de utilizar los digestores como método estabilizador, aprovechan el gas metano como combustible para calentar los mismos digestores y el resto del gas se quema.

Un problema con la instalación de digestores anaerobios en México es que el gas metano capturado suele ser incinerado mediante equipos quemadores, transformándolo en bióxido de carbono, con la finalidad de obtener bonos de carbono (Protocolo de Kyoto, 2005) que se traduce en un

ingreso para la planta. Sin embargo, aunque lo anterior disminuye las emisiones de gas metano que es más dañino que el bióxido de carbono no soluciona el problema de contaminación ambiental.

### **Para tomarse en cuenta**

- México invierte en PTAR con la finalidad de tratar el agua residual pero no consideran la infraestructura e inversión necesaria para tratar los lodos residuales.
- Los lodos residuales son un residuo que poco se considera a pesar de que representa un riesgo a la salud y al medio ambiente.
- Los lodos residuales se pueden aprovechar en beneficio de la sociedad.
- En México existe el potencial para poder manejar y aprovechar los lodos residuales, pero por la falta de conocimiento, de cultura y de inversión se ha hecho muy poco.
- Es importante que en México se controle y regule el manejo de lodos residuales y que se reporte su disposición y manejo.

### **Referencias**

**Cardoso L.** *“Manejo de lodos residuales en México”, XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.* Vol. 1. 2000. pp. 1-7.

**Mahamud M.** *“Biosólidos generados en la depuración de aguas (i): planteamiento del problema”, Ingeniería del Agua.* Vol. 3(2). 1996. pp.47-62.

**Oropeza N.** *“Lodos residuales: estabilización y manejo”, Caos Conciencia* Vol.1(5). 2006. pp.51-58.

**SEMARNAT.** Consultado el 18 de Abril de 2011. <http://www.semarnat.gob.mx>.

**Vargas M.** “*Estudio del uso del lodo residual de la empresa Extralum S. A. como material alternativo en la fabricación de cementos especiales.*”  
*Tecnología en Marcha*. Vol. 19(3). 2006. pp. 11-26.

**Vargas Pelayo L.M.** Jefe de Saneamiento de la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Ensenada (CESPE). Octubre 2010. *Comunicación personal*.

# El potencial de generación de energía eléctrica empleando biosólidos como fuente de materia prima: El caso de la ciudad de Ensenada, Baja California.

<sup>1</sup>Rebeca Rojas Remis, <sup>2</sup>Leopoldo G. Mendoza Espinosa  
reberemis@hotmail.com

## Resumen

Como consecuencia del tratamiento del agua residual se producen lodos residuales, también llamados biosólidos, que pueden utilizarse como fertilizante, estabilizador de suelos e incluso para generar energía. El manejo y disposición ineficiente de estos, representa un problema para el medio ambiente y la sociedad, por las cantidades que se generan y los volúmenes que ocupan. En México se estima que los lodos residuales generados por las 2.029 plantas de tratamiento de agua residual, generan 640 millones de toneladas por año, de los cuales el 64% se dispone como relleno en tierra. La planta de tratamiento de agua residual (PTAR) más grande de la ciudad de Ensenada, Baja California, operada por la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Ensenada (CESPE), denominada “El Naranja”, maneja 30.000 toneladas de lodos al año provenientes de las 5 PTAR de la ciudad, los cuales desde hace 12 años han sido depositados como relleno en tierra. Dicha actividad representa un peligro latente al medio ambiente, por lo que es necesario encontrar maneras de tratar eficientemente estos lodos. Se realizó una estimación sobre el potencial de generación de biogás mediante la instalación de un sistema de digestión anaerobia utilizando como materia prima lodos residuales, así como el potencial de generación de energía eléctrica y sus diferentes usos en beneficio de la PTAR CESPE “El Naranja”. Adicionalmente se hicieron estimaciones sobre los impactos ambientales y sociales benéficos que conlleva el reuso de biosólidos y se hizo una revisión y propuesta de mejora sobre la legislación mexicana vigente para su clasificación y aprovechamiento.

**Palabras Clave:** biosólidos, gas metano, lodos residuales, producción de energía

## 1. Introducción

El proceso de tratamiento de agua residual implica la generación de lodos residuales, compuestos por materia orgánica y por elementos contaminantes que fueron removidos del agua tales como metales pesados, materiales inorgánicos y contaminantes emergentes (productos de limpieza, plaguicidas, medicamentos y productos de cuidado personal). De ahí que los lodos residuales también deban ser tratados para eliminar o transformar sus elementos contaminantes y que no representen un riesgo a la salud o al ambiente, ya que se estima que los lodos residuales generan el 2,8% de los gases de efecto invernadero (GEI) a nivel mundial [1].

En el presente artículo se propone la digestión anaerobia como alternativa de tratamiento de lodos residuales para capturar el gas metano y usarlo como fuente de generación de energía eléctrica, disminuyendo los GEI y los riesgos a la salud. Se calcula la energía que se pudiera producir como resultado de esta actividad, sus posibles usos, se comenta sobre la legislación mexicana aplicable para uso y aprovechamiento de lodos residuales y se sugieren adecuaciones para fomentar la generación de energía empleando biosólidos como materia prima.

## 2. Desarrollo

### 2.1 Lodos residuales, biosólidos, manejo y reuso

Aunque los lodos residuales son un problema a nivel mundial debido a los gases que desprenden, los malos olores y los patógenos que pueden llegar a generarse, no se consideran, controlan y tratan adecuadamente; incluso en algunos países no son tratados, convirtiéndose en un problema de contaminación ambiental y de salud pública importante [1].

Existen diferentes tratamientos para reducir el volumen de lodos residuales generados y estabilizarlos volviéndolos biosólidos, es decir, un producto que pierde sus propiedades contaminantes y que pueda ser reutilizado como: composta, fertilizante, mejorador de suelos, reutilización en procesos industriales y generación de energía eléctrica [4].

Los tratamientos para la reducción de volumen son: deshidratación (para quitar la humedad mediante aplicación directa de calor) e incineración (realizar la combustión mediante quemadores). El problema que se presenta con estos tratamientos es que la deshidratación únicamente reduce en un 20% el volumen y la incineración, aunque reduce el volumen en un 80% eliminando los compuestos orgánicos tóxicos; destruye las bacterias y nutrientes que pudieran ser útiles para usarlo como fertilizante. Además el proceso genera dióxido de carbono, provocando contaminación ambiental considerable y altos costos de operación [2].

Por su parte, los procesos de estabilización son: digestión anaerobia, la cual se realiza en ausencia de oxígeno desprendiendo gas metano y disminuyendo la cantidad de materia orgánica por lo que pierde en gran porcentaje sus propiedades contaminantes; digestión aerobia, que en contraste al proceso anterior, se realiza en presencia de oxígeno provocando que se reduzca la materia orgánica presente y tratamiento químico el cual consiste en añadir cal a los lodos con la finalidad de oxidarlos y evitar su fermentación [3].

Es importante que tanto los lodos residuales como los biosólidos sean sometidos a un análisis para determinar las características de corrosividad, radioactividad, explosividad, toxicidad y biológico-infecciosos (CRETIB), con la finalidad de establecer su peligrosidad y poder determinar el manejo y disposición final adecuado [2].

## **2.2 Panorámica mundial de generación de lodos residuales y biosólidos**

En todos los países del mundo se generan lodos residuales, en mayor o menor escala, dependiendo del tratamiento que reciba el agua residual.

En el Atlas Global para el Manejo de Excreta, Lodos Residuales y Biosólidos publicado en el 2008 por United Nations Human Settlements Programme (UN-HABITAT) y en la Comisión Canadiense para el manejo de lodos, se especifica que los países desarrollados son los que invierten en infraestructura para la reducción y estabilización de lodos residuales, cuentan con un control sobre su cantidad y calidad, así como con estadísticas sobre su disposición final y/o aprovechamiento. En contraste, los países en vías de desarrollo no consideran los lodos residuales como un residuo a tratar, por lo que no invierten en infraestructura para su tratamiento, ni cuentan con un control y estadísticas sobre las cantidades generadas y su disposición final [5].

Es importante mencionar que en promedio los países desarrollados utilizan un 15% de los lodos residuales generados para la recuperación energética por medio de digestores anaerobios. La energía producida es utilizada para abastecer los requerimientos eléctricos de la PTAR donde se encuentra instalado el sistema de digestión [1].

Estados Unidos genera alrededor de 7,2 millones de toneladas por año de lodos residuales, sus PTAR cuentan con sistemas de reducción de volumen y estabilización, por lo que el 49% de los biosólidos se utilizan benéficamente para aplicación en la agricultura, silvicultura o mejorar de suelos, el 45% es dispuesto como relleno en tierra, confinamientos o simplemente es incinerado y el 6% en otros usos [1].

Canadá estabiliza el 100% de sus lodos, de los cuales el 52% es utilizado como fertilizante en agricultura, 22% es incinerado (en algunos casos el vapor generado es utilizado para recuperación de energía), el 17% se deposita como relleno en tierra y el 9% restante en otros usos [1].

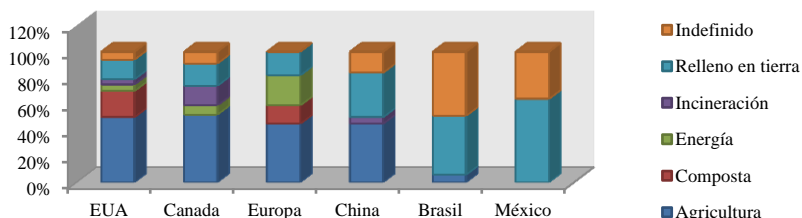
La Unión Europea constituida por 27 países genera 9 millones de toneladas por año y destina el 45% a la agricultura, el 23% a la generación de energía térmica (por medio de la incineración), el 18% como relleno en tierra y el 14% restante a elaborar composta y otros usos particulares [1].

Los tratamientos de lodos más utilizados en China son la deshidratación y la digestión anaerobia para reducción de volumen y estabilización respectivamente, para posteriormente aplicar el 45% en la agricultura, 34,4% como relleno en tierra, 3,5% en la ganadería, 3,5% es incinerado y el porcentaje restante en otros usos [1].

En América Latina, Brasil dispone el 45% como relleno en tierra, el 5,6% en la agricultura y el porcentaje restante es indefinido [1].

### 2. 3 Lodos residuales en México: manejo y reuso

En México no se tiene un dato oficial sobre la cantidad de lodos generados; sin embargo la Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) estima que se generan alrededor de 640 millones de toneladas por año provenientes de las 2,029 PTAR que tiene registradas la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). La UN-HABITAT estima que un 64% de estos lodos son depositados como relleno en tierra (a cielo abierto) generando problemas de contaminación ambiental y salud pública. En la Figura 1 se presenta un gráfico donde se comparan los porcentajes de los tipos de reuso que se les da a los lodos residuales en México y otros países.



**Figura 1.** Gráfico de estadísticas sobre el reuso de lodos residuales en México y otros países. Elaboración propia a partir de datos del Atlas mundial del manejo de excreta, lodos residuales y biosólidos publicado por UN-HABITAT en 2008

Es importante mencionar que la mayoría de las PTAR en México no realizan un tratamiento de reducción de volumen y de estabilización de lodos, por lo que la cantidad de lodos residuales dispuestos anualmente es mucho mayor a la cantidad generada en países desarrollados.

Las PTAR en México que utilizan el proceso de digestión anaerobia, son la PTAR de la ciudad de La Paz, Baja, California, Sur y la de la ciudad de Culiacán, Sinaloa, que además de utilizar los digestores como método estabilizador, son utilizados para aprovechar parte del gas metano como combustible para calentar los digestores y el resto del gas es incinerado [6].

Un problema con la instalación de digestores anaerobios en México es que el gas metano capturado suele ser incinerado mediante equipos quemadores, transformándolo en dióxido de carbono, con la finalidad de obtener bonos de carbono [7] que se traduce en un ingreso para la planta. Sin embargo, aunque lo anterior disminuye las emisiones de gas metano que es más dañino que el dióxido de carbono no soluciona el problema de contaminación ambiental y salud pública.

## 2.4 Caso de la ciudad de Ensenada, cantidades generadas de lodos residuales, manejo y reuso

La PTAR “El Naranjo” es la más grande de la ciudad de Ensenada, Baja California, es operada por la CESPE y se estima que maneja un promedio de 83 toneladas diarias, es decir 30.000 toneladas de lodos al año provenientes de las 5 PTAR de la ciudad, los cuales desde hace 12 años han sido depositados en terrenos posteriores de la planta como relleno en tierra [8], incrementando su altura sobre el terreno natural en 12 metros. Debido a lo anterior, es importante considerar su reutilización como composta, fertilizante o como fuente de generación de energía mediante la instalación de un digestor anaerobio que capture el gas metano y disminuya la generación de GEI y los riesgos a la salud pública.

Las 2.500 toneladas mensuales promedio de lodos residuales generadas en la PTAR “El Naranjo” son mezcladas con poliacrilamina con la finalidad de reducir el porcentaje de humedad y evitar la atracción de vectores [8]. Es importante mencionar que de las 2.500 toneladas de lodos residuales generadas por mes únicamente 30 toneladas son aprovechadas para hacer composta mezclándolas con tierra y residuos de madera (aserrín proporcionada por madererías locales). La composta es regalada a instituciones o empresas para que la utilicen como fertilizante natural en sus jardines.

## 2.5 Estimación del potencial de producción de biogás y de generación de energía eléctrica a partir de lodos residuales en Ensenada

La implementación de un sistema de digestión anaerobia, reduce en 24% el volumen de lodos residuales, produce un 25% adicional de energía y representa una reducción del 30% del costo anual de manejo y disposición de lodos residuales, el cual se estima que es de aproximadamente el 45% del gasto anual de una PTAR [9].

De acuerdo con el reporte técnico [10] el potencial de generación de biogás es de 0,31 metros cúbicos por kilogramo de lodos residuales, lo que quiere decir que el potencial de generación para la PTAR de la CESPE “El Naranjo” es de 775.000 metros cúbicos de biogás por mes.

Con la captura del biogás por medio de un sistema de digestión anaerobia se estima que 1 metro cúbico de biogás tiene el potencial de generación de 1,6 kilowatt hora [11], por lo que el reuso de lodos residuales para la PTAR de CESPE “El Naranjo” tiene el potencial de generación de 1.240 millones de kilowatt hora por mes. El consumo mensual de la PTAR CESPE “El Naranjo” es de 649.511 kilowatt hora, por lo que la energía generada al aprovechar el biogás alcanzaría para abastecer los requerimientos energéticos de la planta y del sistema de digestión.

Cabe mencionar que la capacidad de generación de biogás depende del pH, cantidad de metales pesados y concentración de materiales tóxicos en los lodos residuales, por lo que deben analizarse, con la finalidad de determinar su potencial de generación real [4]. Asimismo el potencial de generación de energía eléctrica dependerá del porcentaje de gas metano que contenga el biogás, por lo que es necesario analizar el biogás para conocer los porcentajes de composición [10].

## 2.6 Estimado de disminución de GEI

La contribución de México a la generación de GEI en el mundo es del 1% del cual se estima que el 9% es por lodos residuales [7]. De acuerdo con el biogás que se pretende capturar con el sistema de digestión anaerobia en Ensenada se estima dejar de emitir el 0,0044% del total de GEI generados por lodos residuales en México.

## 2.7 Legislación Mexicana sobre reuso de lodos residuales y generación de energía eléctrica

En México, la NOM-004-SEMARNAT-2002, publicada el 15 de Agosto de 2003 en el Diario Oficial de la Federación, establece las especificaciones y límites máximos permisibles de

contaminantes (metales pesados, patógenos y parásitos) en lodos y biosólidos para su aprovechamiento y disposición final [12].

Gracias a esta normatividad oficial es posible analizar los biosólidos y determinar su calidad así como el nivel de aprovechamiento y frecuencia con la que deben muestrearse para garantizar la salud humana y la disminución del impacto ambiental. En la Tabla 1 se presentan los criterios de clasificación de lodos y biosólidos para su aprovechamiento establecidos en la NOM-004-SEMARNAT-2002.

*Tabla 1. Tabla de clasificación de lodos y biosólidos para su aprovechamiento [12]*

Tipo	Clase	Aprovechamiento
Excelente	A	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación.</li> <li>• Los establecidos para clase B y C.</li> </ul>
Excelente o bueno	B	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación.</li> <li>• Los establecidos para clase C.</li> </ul>
Excelente o bueno	C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usos forestales.</li> <li>• Mejoramiento de suelos.</li> <li>• Usos agrícolas.</li> </ul>

Aunque la norma especifica la calidad de lodos y biosólidos para su aprovechamiento, no define los aprovechamientos detalladamente y omite las regulaciones que se deben de considerar en el momento de realizar el aprovechamiento, así como el control que se debe de tener para evitar riesgos a la salud o contaminación. México no cuenta con regulaciones para la construcción de digestores anaerobios y su operación.

Es importante mencionar que la Comisión Federal de Electricidad (CFE) permite generar energía eléctrica para consumo propio pero no es posible venderla, la energía excedente debe ser reincorporada a las líneas eléctricas propiedad de CFE, sin beneficios económicos para la institución o empresa generadora de energía eléctrica, sin embargo el incentivo económico para los organismos operadores de agua es que disminuirán sus gastos energéticos por operación, en el caso de la ciudad de Ensenada la PTAR de CESPE “El Naranja” gasta \$5.737.130 pesos en energía al año [8].

### 3. Conclusiones

México no cuenta con datos oficiales sobre la cantidad de lodos generados, ni sus tratamientos y aprovechamientos.

Se debe de realizar una revisión sobre la legislación Mexicana aplicable que permita regular claramente el aprovechamiento y disposición final de lodos residuales, así como la construcción de sistemas de digestión anaerobia.

Es importante el desarrollo de proyectos enfocados al tratamiento y reuso de lodos residuales con la finalidad de disminuir la contaminación ambiental y los riesgos a la salud pública.

El presente proyecto permite disminuir en un 0,00044% los GEI generados en México por lodos residuales y su aprovechamiento permite capturar 775.000 metros cúbicos de biogás por mes, lo que se traduce en una generación de energía eléctrica de 1.240 kilowatt hora mensualmente, representado un ahorro de \$5.737.130 pesos anuales para la PTAR “El Naranja” de la ciudad de Ensenada, Baja, California.

# BIOSÓLIDOS COMO MATERIA PRIMA PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA.

M.D. Rebeca Rojas Remis, Dr. Leopoldo G. Mendoza Espinosa  
 Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo  
 Universidad Autónoma de Baja California



## OBJETIVO.

Determinar el potencial de generación de energía eléctrica utilizando biosólidos como materia prima, el caso de la Ciudad de Ensenada, B.C.

## ANTECEDENTES

Como consecuencia del tratamiento del agua residual se producen lodos residuales, los cuales al ser estabilizados se convierten en biosólidos.

En México se estima que los lodos residuales/biosólidos generados por las 2,029 plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) que únicamente tratan el 37% del agua residual captado en el sistema de drenaje ( $88 \text{ m}^3/\text{s}$ ) (CONAGUA 2011), generan 640,000 t/y, de los cuales el 51% es estabilizado mediante digestión anaerobia, sin embargo el biogás generado durante este proceso no se recupera.



Figura 1. PTAR "El Naranja"



Figura 2. Deposito de biosólidos en terrenos posteriores de la PTAR.

La PTAR "El Naranja" es la más grande de la ciudad de Ensenada, B. C. (Figura 1) es operada por la CESPE y maneja un promedio de 83 toneladas diarias de biosólidos, provenientes de las 4 PTAR de la ciudad, los cuales se depositan en terrenos posteriores de la planta como relleno en tierra a cielo abierto (CESPE 2010) (Figura 2).

Por lo anterior se considera la reutilización de los biosólidos como materia prima para la generación de energía mediante la instalación de un digestor anaerobio que capture el biogás ( $0.31\text{-}0.36 \text{ m}^3/\text{Kg}$ ).

El biogás obtenido contiene un 64-70% de metano ( $\text{CH}_4$ ) (Cisneros 2005). El biogás es un gas combustible al igual que el ( $\text{CH}_4$ ) y pueden utilizarse para generar energía eléctrica.

Para aprovechar mejor el biogás, es necesario limpiarlo con la finalidad de obtener  $\text{CH}_4$  casi puro y aumentar la eficiencia energética. Con base en los datos del Cuadro I se hicieron las estimaciones para la cantidad de biosólidos producidos en la PTAR "El Naranja", si se instalara un sistema de digestión anaerobia.

Cuadro I. Potencial de generación de energía eléctrica del biogás y del metano (Arthur 2010, Guardado 2006, Infantes 2011).

Gases.	Valor térmico ( $\text{MJ}/\text{m}^3$ ).	Potencial energético ( $\text{Kwh}/\text{m}^3$ ).
Biogás	21.5	5.5-6*
Metano	37.78	9.8-10.4*

\*Factor de conversión  $1\text{Kwh}=3.6\text{MJ}$

## RESULTADOS.

De acuerdo con las 83 ton/d de biosólidos que maneja la PTAR "El Naranja", el potencial de generación de biogás es de  $25,730 \text{ m}^3$  y  $16,467 \text{ m}^3$  de  $\text{CH}_4$ .

El potencial de generación de energía eléctrica si se utiliza el biogás es de  $141,515 \text{ Kwh}/\text{m}^3$ . En el caso limpiar el biogás y utilizar el  $\text{CH}_4$ , el potencial de energía eléctrica es de  $161,376 \text{ Kwh}/\text{m}^3$ . Por su parte, el consumo energético de la PTAR es de  $21,650 \text{ Kwh}/\text{d}$ . Por lo tanto, con la generación de biogás alcanzaría para abastecer los requerimientos energéticos de la PTAR, del sistema de digestión anaerobia y un ahorro anual de  $\$7'008,771$  pesos.

## CONCLUSIONES.

- ✓ La implementación de sistemas de digestión anaerobia con recuperación energética se consideran rentables al ser mayor la cantidad de ahorro energético que la inversión inicial.
- ✓ El desarrollo de proyectos enfocados al tratamiento y reuso de biosólidos contribuye a disminuir la contaminación ambiental y los riesgos a la salud pública, al evitar su depósito en terrenos a cielo abierto.



# Utilización de biosólidos para la recuperación energética en México

Rebeca Rojas Remis\*\* / Leopoldo G. Mendoza Espinosa\*\*\*

*Use of biosolids for energetic recovery in Mexico*

*Utilização de biosólidos para a recuperação energética no México*

## RESUMEN

El aumento de la población en México ha hecho que se incremente la red de agua potable y drenaje; ello ha dado lugar a la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), lo que ha implicado mayor tratamiento de agua residual y, a su vez, un incremento en la cantidad de lodos residuales producidos. Los lodos residuales representan un problema ambiental por las cantidades, volúmenes y contaminación que generan; sin embargo, pueden aprovecharse para producir energía eléctrica por medio de sistemas de digestión anaeróbica; tan solo en México se generan alrededor de 640.000 toneladas anuales de lodos residuales. El alcance del presente artículo es realizar un análisis desde un punto de vista interdisciplinario a escala mundial sobre la utilización de biosólidos para la producción de energía y que sirva como base para el desarrollo de proyectos de esta índole en México.

**Palabras clave:** lodos residuales, gas metano, digestión anaeróbica, generación de energía.

---

\*Artículo derivado del proyecto de tesis doctoral "Potencial de recuperación energética empleando biosólidos como materia prima en Ensenada, B.C." elaborado entre febrero de 2011 y agosto 2012. \*\*Maestra en Docencia (M.D.), estudiante del Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, Baja California, México. \*\*\*Doctor, Investigador Titular, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Ensenada, Baja California, México.

Correspondencia: Rebeca Rojas Remis, e-mail reberemis@hotmail.com

Artículo recibido: 05/09/2012; Artículo aprobado: 21/11/2012

## ABSTRACT

The population increase in Mexico has demanded an increase of the drinking water and sewer nets. This has brought the construction of waste water treatment plants (WWTP), a fact that has generated more waste water treatment and, at the same time, an increase of the waste sludge produced. Waste sludge is an environmental problem given the quantities, volumes and contamination it generates. Sludge can be used to produce electric energy, though, by the use of anaerobic digestion systems. For instance Mexico alone generates about 640.000 tons of waste sludge a year. The scope of this article is to analyze from an interdisciplinary viewpoint, at a world scale, the use of biosolids to produce energy and be the basis to develop such type of projects in Mexico.

**Key words:** Waste sludge, methane gas, anaerobic digestion, energy generation.

## RESUMO

O aumento da população no México fez que se incremente a rede de água potável e drenagem; isso deu lugar à construção de plantas de tratamento de águas residuais (PTAR), o que implicou maior tratamento de água residual e, a sua vez, um incremento na quantidade de lodos residuais produzidos. Os lodos residuais representam um problema ambiental pelas quantidades, volumes e contaminação que geram; no entanto, pode aproveitar-se para produzir energia elétrica por meio de sistemas de digestão anaeróbia; tão só em México se geram ao redor de 640.000 toneladas anuais de lodos residuais. O alcance do presente artigo é realizar uma análise desde um ponto de vistas interdisciplinares a escala mundial sobre a utilização de bio-sólidos para a produção de energia e que sirva como base para o desenvolvimento de projetos desta índole em México.

**Palavras importantes:** lodos residuais, gás metano, digestão anaeróbia, geração de energia.

## INTRODUCCIÓN

Al igual que el resto del mundo, la crisis del agua en México se debe, entre otras cosas, al incremento y concentración de la población. El desarrollo económico del país ha permitido el crecimiento de las redes de agua potable y drenaje<sup>1</sup>, y un aumento en la construcción de PTAR que permiten tratar las aguas residuales hasta niveles aceptables. Es de esperarse que el empleo de estas aguas en la agricultura, riego de parques y jardines, y recarga de acuíferos vaya en aumento.

En el 2011 se generaron 6.7 mil millones de de aguas residuales, y se espera que en 20 años el volumen de agua tratada sea de 9.2 mil millones de m<sup>3</sup>. Esto implica que la generación de lodos residuales se incremente de 640.000 toneladas para 2011 a 880.000 toneladas para el 2030<sup>1</sup>.

Se les llama lodos residuales a los sólidos remanentes del proceso de tratamiento de las aguas residuales municipales, que son removidos para que el agua pierda sus propiedades contaminantes y pueda volver a utilizarse<sup>2</sup>. Los lodos residuales también deben ser tratados para eliminarlos o transformarlos, y para que sus elementos contaminantes no representen un riesgo a la salud o al ambiente. Por ello, es importante que las plantas de tratamiento de aguas residuales no solo contemplen cómo tratar el agua sino también deben explicar qué hacer con los lodos residuales generados<sup>3</sup>.

Los lodos residuales son un problema por el costo adicional de tratamiento que implican, los volúmenes y las cantidades que se generan, así como por su composición, ya que están constituidos principalmente por materia orgánica y por elementos contaminantes que fueron removidos del agua, tales como: metales pesados, material inorgánico y contaminantes emergentes (productos de limpieza, plaguicidas, medicamentos y productos de cuidado personal). Asimismo, son un problema debido a los gases que desprenden como producto de su descomposición, los malos olores, y las bacterias y demás microorganismos patógenos que pueden llegar a generar. De ahí que los lodos residuales, a su vez, deban ser tratados para eliminar, disminuir o transformar estos elementos y que no representen un riesgo para la salud ni el medio ambiente<sup>4</sup>.

Sin embargo, el problema generalizado con respecto al manejo de lodos residuales radica en que estos no son considerados un tema importante en las políticas públicas del manejo de residuos y, por lo tanto, ni se controlan ni se tratan adecuadamente, convirtiéndose en un problema de contaminación ambiental y de salud pública de las ciudades<sup>5</sup>.

Existen diferentes tratamientos para lodos residuales que se utilizan con la finalidad de reducir su volumen y estabilizarlos, es decir, que los lodos pierdan sus propiedades contaminantes y que puedan ser reutilizados o aprovechados. Una vez que los lodos se encuentran estabilizados son denominados biosólidos y pueden ser aprovechados con diferentes propósitos: composta, fertilizantes, mejorador de suelos, reutilización en procesos industriales y producción de energía eléctrica<sup>6</sup>.

En el *Atlas global para el manejo de la excreta, lodos residuales y biosólidos*, publicado en el 2008 por United Nations Human Settlements Programme (UN-HABITAT) y la Comisión Canadiense del manejo de lodos, se especifica que los países desarrollados usualmente invierten en infraestructura para la reducción y estabilización de lodos, cuentan con un control sobre su cantidad y calidad, así como de su disposición final y/o aprovechamiento. En contraste, los países en vías de desarrollo no consideran los lodos residuales como un residuo a tratar, lo que da como resultado una nula inversión en infraestructura para su tratamiento y no cuentan con un control y datos estadísticos sobre las cantidades generadas y su disposición final<sup>7</sup>.

Es importante mencionar que, en promedio, los países desarrollados utilizan un 15% de los biosólidos generados para la recuperación energética por medio de digestores anaeróbicos. La energía producida es utilizada para abastecer de energía eléctrica al propio sistema de digestión así como los requerimientos energéticos de la PTAR donde se encuentra instalado el sistema de digestión anaeróbica<sup>5</sup>.

La conveniencia para la implementación de un sistema de biodigestión anaeróbica radica en que reduce en un 24% el volumen de lodos residuales y produce un 25% adicional de energía, por lo que representa una reducción del 30% en el costo anual de manejo y disposición de lodos residuales, el cual se estima es de aproximadamente el 45% del gasto anual de una PTAR<sup>8</sup>.

La percepción social que existe sobre el manejo y aprovechamiento de los lodos residuales es importante debido a que las PTAR suelen encontrarse instaladas cerca de zonas habitadas, por lo que en la realización de proyectos de utilización de lodos residuales y biosólidos, se deben llevar a cabo reuniones con la comunidad para hacerla partícipe y que conozca sobre las bondades de su reciclaje, su reutilización<sup>9</sup> y los beneficios sociales y ambientales que este tipo de proyectos implican.

La Agencia para la Protección Ambiental de Estados Unidos (Environmental Protection Agency EPA) incluye en sus programas de reuso de biosólidos pláticas de concienciación a la comunidad sobre la importancia de reciclar y reutilizar los biosólidos, y ha establecido, en su normativa, que cualquier proyecto de esta índole debe involucrar a la comunidad que será beneficiada con la finalidad de que conozca del tema y forme parte del proyecto.

## Manejo de lodos residuales

Diversos autores concuerdan con Snyman<sup>10</sup> en que la disposición y/o aprovechamiento final de los lodos residuales implica un reto económico y de ingeniería, puesto que el volumen y las cantidades que se generan involucran tanto la inversión en infraestructura como el desarrollo de tecnologías que reduzcan su volumen y los estabilicen con la finalidad de reducir o eliminar sus propiedades contaminantes.

Existen diferentes tratamientos para reducir el volumen y estabilizar los lodos residuales con la finalidad de convertirlos en un producto que pierde sus propiedades contaminantes y así poder ser reutilizados.

Los tratamientos para la reducción de volumen son deshidratación e incineración. El problema con estos tratamientos es que la deshidratación únicamente reduce en un 20% el volumen mientras que la incineración, si bien reduce el volumen en un 80% y elimina los compuestos orgánicos tóxicos, destruye las bacterias y nutrientes que pudieran ser útiles para usarlo como fertilizante; además, el proceso genera gases de efecto invernadero (GEI), provocando contaminación ambiental considerable y altos costos de operación<sup>7</sup>.

Por su parte, los procesos para la estabilización de lodos residuales son: digestión aeróbica (en donde las bacterias aeróbicas consumen la materia orgánica), digestión anaeróbica (en el cual la materia orgánica es consumida por bacterias anaeróbicas y es posible generar energía eléctrica mediante la utilización del biogás producido durante la digestión) y tratamiento químico (que generalmente consiste en añadir cal a los lodos provocando fermentaciones ácidas que evitan la proliferación de microorganismos).

En los tres casos anteriores la estabilización está enfocada a eliminar o disminuir la materia orgánica presente en los lodos residuales. Sin embargo, otros compuestos como metales pesados, plaguicidas y material inorgánico seguirán presentes, por lo que es importante someter los lodos residuales resultantes (biosólidos) a un análisis para determinar si son un residuo peligroso o no y así determinar el tipo de manejo y disposición final adecuado<sup>11</sup>.

Con base en lo anterior se han desarrollado propuestas para generar novedosas formas de reutilización y aprovechamiento de los biosólidos como: producción de biodiésel<sup>12</sup> y utilización como materia prima para construcción de carreteras y edificios<sup>5</sup>.

Aunque en los países en vías de desarrollo no se tienen controles estrictos de los lodos residuales generados y de su manejo y disposición, se han realizado proyectos de investigación que implican el análisis de calidad de lodos y elaboración de propuestas para lograr su estabilización y aprovechamiento benéfico, principalmente como fertilizante de cultivos agrícolas y mejorador de suelos<sup>7</sup>. No obstante que en América Latina se han generado proyectos a menor escala para la reutilización de biosólidos como materia prima para la producción de energía, no se cuenta con datos oficiales sobre las cantidades utilizadas y la cantidad de energía eléctrica producida y su utilización final.

## Lodos residuales en México

Tan solo en México se estima que los lodos residuales generados por las 2.029 PTAR que tratan el 37% de las aguas residuales que se captan en el sistema de drenaje ( $88 \text{ m}^3/\text{s}$ )<sup>1</sup> es entre 640.000 y 10 millones de toneladas por año<sup>13</sup>. Tal discrepancia se debe a que en ocasiones la cantidad reportada está en peso seco y en otros casos no se menciona el contenido de humedad, de tal suerte que no existe un dato oficial sobre la cantidad de lodos residuales y biosólidos generados.

Adicionalmente los reportes no incluyen información sobre el tratamiento que reciben los lodos residuales, su disposición y/o aprovechamiento final.

De acuerdo con Jiménez y Wang<sup>14</sup>, de las 640.000 toneladas de lodos residuales que se generan, el 51% es estabilizado mediante digestión anaeróbica; sin embargo, no se recupera el biogás generado durante este proceso, ya que el 76% de los lodos residuales, independientemente de su tratamiento, es depositado como relleno a cielo abierto.

Como se muestra en la tabla 1, México y otros países de América Latina en comparación con otros países desarrollados no lleva un control sobre la cantidad de lodos que se generan, los tipos de tratamiento y la disposición final que cada PTAR utiliza.

**Tabla I. Generación de lodos residuales/biosólidos en México y el mundo y su aprovechamiento para la recuperación energética<sup>5</sup>**

País	Lodos/biosólidos generados (millones Ton/año).	Cantidad depositada como relleno en tierra (%).	Cantidad utilizada para recuperación energética (%).
Estados Unidos	7.2	15	5
Canadá	0.550	17	7
Unión Europea	9.2	18	23
China	2.9	34	0
Japón	2.0	20	5
Brasil	0.48	45	0
México	0.640	76	0

### Impacto ambiental generado por los lodos residuales

La descomposición de los lodos residuales depositados como relleno en tierra a cielo abierto genera dióxido de carbono y metano<sup>15</sup> considerados como los principales gases de efecto invernadero (GEI). Adicionalmente, otro efecto de contaminación por mal manejo de lodos residuales es la generación de olores<sup>16</sup>, riesgos ambientales y posibles riesgos a la salud al ser utilizados como fertilizantes agrícolas. Paradójicamente, al ser más estrictos los controles de tratamiento de aguas residuales, es mayor la cantidad de contaminantes que se encuentran en los lodos residuales<sup>17</sup>. Por ello, como parte del tratamiento de las aguas residuales se tiene que considerar el tratamiento de sus lodos para que de esta forma se reduzca la contaminación ambiental que pudieran generar y se incremente su calidad con la finalidad de poder ser aprovechados de manera benéfica.

La composición de los gases emitidos por la descomposición de los lodos residuales llamado biogás está compuesta de 40%-75% gas metano, 25%-40% dióxido de carbono y en menor cantidad otros gases como , N, O, H, CO y vapor de agua<sup>18, 19</sup>. En el caso del gas metano, en comparación con el dióxido de carbono, es 23 veces más eficaz para capturar el calor de la atmósfera. Sin embargo, su aprovechamiento permite disminuir en menor tiempo el impacto ambiental pues su vida atmosférica es de solamente 12 años como se puede ver en el tabla 2, por lo que su aprovechamiento para producir energía es el medio más efectivo para disminuir el calentamiento global a corto plazo, además de poder ser utilizado como fuente de energía renovable (biocombustible)<sup>20</sup>.

De acuerdo con la EPA y la Asociación Methane to Markets en 2005 las emisiones mundiales de gas metano (CH<sub>4</sub>) fueron equivalentes a 6.407 millones de toneladas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) de las cuales el 60% provienen de fuentes antropogénicas siendo las más contaminantes Estados Unidos, China, Unión Europea, Rusia, India, Brasil, México, Ucrania e Indonesia, responsables de casi la mitad de todas las emisiones antropogénicas mundiales de metano.

La reducción de emisiones de metano tiene beneficios energéticos, ambientales y económicos, puesto que constituye una fuente de combustible renovable para la recuperación energética mejorando la calidad ambiental de las comunidades locales cercanas a las PTAR<sup>20</sup>.

**Tabla 2. Gases de efecto invernadero (GEI) y su potencial de calentamiento<sup>20,21</sup>**

Gas de efecto invernadero	Potencial de calentamiento (-eq)*	Años de vida en la atmosfera (años)
CO <sub>2</sub>	1	200 a 450
CH <sub>4</sub>	23	12 a 15

\*Unidad de medición utilizada para indicar el potencial de calentamiento global de los GEI en comparación con el CO<sub>2</sub>

### Emisión de GEI por lodos residuales en México

Las actividades relacionadas con las aguas residuales generan a escala mundial el 9% del gas metano emitido a la atmósfera. Se estima que México emitió 4.637 millones de toneladas en 2006 de las cuales el 13.5% se debió a las actividades relacionadas con aguas residuales municipales<sup>22</sup>, dando como resultado que el promedio de emisión para el país fuese de 1.767 kg de CH<sub>4</sub> por habitante por año<sup>23</sup>. Por su parte, de acuerdo con el Protocolo de Kyoto<sup>24</sup> las emisiones de CO<sub>2</sub> en México fueron 4.032 millones de toneladas, de las cuales el 6.8% fue por actividades relacionadas con el tratamiento de aguas residuales<sup>21</sup>.

Las emisiones de metano se han incrementado en una tasa promedio anual del 2%. De 1990 a 2006 se incrementó en un 56% el tratamiento de aguas residuales municipales<sup>22</sup> lo que produjo un aumento del 215.5% en las cantidades de lodos residuales generados. Dicho aumento se debió al volumen de aguas residuales tratadas en nuestro país y a las nuevas políticas públicas establecidas con la finalidad de eliminar eficientemente la materia orgánica y contaminantes presentes en el agua<sup>21</sup>. Sin embargo aún no se ha considerado incluir en las PTAR sistemas de digestión anaeróbica que permitan la recuperación del gas metano para su aprovechamiento como biocombustible, ya sea para uso doméstico o como fuente para la producción de energía eléctrica.

En total, los tratamientos de digestión anaeróbica, aeróbica, composteo y deposición de lodos residuales como relleno en tierra a cielo abierto contribuyeron con el 10.5% de los GEI generados en el país en 2007<sup>23</sup>.

En este sentido, México tiene la oportunidad de adoptar y generar tecnología para el aprovechamiento de lodos residuales y su recuperación energética disminuyendo la cantidad de GEI emitidos a la atmósfera y producir energía eléctrica renovable.

### La recuperación de energía por medio de digestión anaerobia

Uno de los métodos para lograr la estabilización de lodos residuales es la digestión anaeróbica, la cual se realiza en ausencia de oxígeno y genera biogás (gas compuesto principalmente por metano, dióxido de carbono y nitrógeno), el cual puede ser utilizado como combustible para la producción de energía eléctrica<sup>25,26</sup>.

A su vez, los sistemas de digestión anaeróbica son eficientes para la reducción de volumen de los lodos residuales y la carga orgánica que contienen. Sin embargo, existen inconvenientes como inversión inicial, mantenimiento del equipo, control estricto de los parámetros de digestión y operación por personal capacitado que hay que considerar para hacer eficiente el sistema y lograr el aprovechamiento óptimo del biogás producido.

También es posible generar energía eléctrica por medio de la implementación de digestión anaeróbica como parte del tratamiento secundario utilizado en las PTAR, como es el caso de la PTAR de León, Guanajuato que inició operaciones en mayo de 2011. Esta PTAR cuenta con un sistema de cogenera-

ción para la producción de energía y la utilización del calor producido durante la digestión. La energía producida será suficiente para satisfacer el 75% de la demanda energética de la PTAR para operar. La inversión realizada se pretende recuperar en los próximos 10 años.

### Digestores anaeróbicos para el tratamiento de lodos residuales

Tradicionalmente los digestores anaeróbicos se pueden dividir en digestores de primera generación, de segunda generación y de tercera generación.

Los de primera generación son los que más comúnmente se utilizan por sus bajos costos de inversión y operación, e incluyen: laguna anaeróbica, tanques sépticos, modelo hindú, modelo chino de mezcla completa sin recirculación, y de mezcla completa con recirculación<sup>19,27</sup>.

Los digestores anaeróbicos de segunda generación son: filtro anaeróbico, manto de lodo granular, de circulación interna, híbrido, flujo de pistón horizontal, y geomembrana<sup>19,27</sup>.

Por último, se encuentran los digestores anaeróbicos de tercera generación los cuales se clasifican en lecho fluidizado y de manto de lodo granular expandido<sup>19,27</sup>.

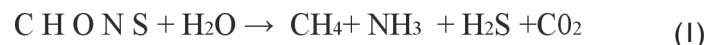
Independientemente del distinto funcionamiento de los digestores anaeróbicos, existen configuraciones (construcción de los reactores de biodigestión) que afecta los parámetros y la forma de operación. Tradicionalmente los digestores anaeróbicos en Estados Unidos y Canadá son de forma cilíndrica y están construidos en concreto; la dimensión del cilindro dificulta el mezclado y la distribución uniforme del calor. La construcción típica está basada en un cilindro inferior y un cilindro con terminación cónica en la parte superior que generalmente es móvil (también llamados reactores de campana flotante).

Los digestores europeos son una mezcla entre los digestores norteamericanos y los típicos europeos. Son tanques totalmente cerrados con base cilíndrica y la parte superior termina en forma de botella (similar a los tanques para acumular agua en las casas). Las ventajas de este tipo de digestor son: es más económico y la distribución del calor es uniforme.

El digestor en forma de "huevo" es una versión mejorada del digestor europeo, está construido en concreto mejorado tecnológicamente, y ofrece un funcionamiento en condiciones óptimas, pues permite la distribución uniforme de calor; disminuye la acumulación de lodos no digeridos y es más eficiente en la extracción de los biosólidos<sup>19</sup>.

### Proceso de digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica está caracterizada por contar con diferentes fases durante su proceso de degradación de los lodos residuales; estas fases son: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis<sup>27</sup>. La ecuación general que define el proceso de biodegradación de los lodos es (ecuación 1):



Estas cuatro fases se presentan en toda digestión anaeróbica la cual se puede realizar mediante dos procesos: mesofílico y termofílico. El proceso mesofílico se lleva a cabo a temperaturas entre los 25-37°C y se puede manejar mediante digestión anaerobia de una etapa (solamente con un digestor) o de dos etapas (dos digestores uno para la etapa de acidogénesis y otro para la etapa de metanogénesis), ya sean de flujo continuo o por lote. Los biosólidos que se obtienen como resultado del proceso mesofílico con un tiempo de retención de 15 días a una temperatura entre 35-45°C o 60 días a 20°C, son de Clase B según la NOM-004-SEMARNAT-2002<sup>28</sup>, debido a que la remoción de patógenos y coliformes fecales es baja<sup>14,29</sup>.

El proceso termofílico se realiza a temperaturas entre los 38-65°C con un tiempo de retención de 20-22 días, ya que la temperatura genera mayores reacciones bioquímicas y permite que la digestión se realice en menor tiempo, utilizando digestores de menor tamaño y se obtienen biosólidos Clase A<sup>14,30</sup>. El problema que se presenta con este tipo de proceso es que requiere de mayor energía para mantener la temperatura, desprende olores, es inestable y el tiempo para su estabilización al inicio de la operación puede llegar a ser de varios meses<sup>29</sup>.

Cualquiera de los dos procesos anaeróbicos genera en menor o mayor cantidad biogás, y su producción dependerá de las condiciones y parámetros de operación del digestor anaeróbico que se muestran en el tabla 3, los cuales hay que controlar para garantizar no solo la producción de biogás, sino la estabilidad del digestor y la calidad de los biosólidos que se obtengan como resultado.

**Tabla 3. Condiciones y parámetros de operación del digestor anaeróbico<sup>27, 29, 31, 32</sup>**

Condición.	Parámetro.
pH neutro	6.8-7.2
Temperatura mesofílica	25-35°C
Temperatura termofílica	37-65°C
Tiempo de retención (TRH)	15-27 días
Sólidos Volátiles (SV)	7-12%
Relación C/N*	20:1-30:1

\*Relación carbono-nitrógeno en la mezcla de lodos en digestión.

El tiempo de retención de los lodos residuales en el digestor es importante, ya que mientras mayor sea este, mayor será el porcentaje de recuperación del biogás. De esta manera se tiene que para un tiempo de retención de 15-25 días se obtiene el 75-80% de recuperación, mientras que de 30-60 días se logra un 95-100% de recuperación del potencial de generación de biogás para la cantidad de lodos digerida<sup>19,31</sup>.

De acuerdo con el trabajo de Agler<sup>33</sup> el tiempo de retención óptimo para lograr una producción de biogás constante es entre 12-32 días con una temperatura máxima de 42°C y mínima de 22°C. En el caso de que el sistema de digestión anaeróbica sea de flujo continuo (alimentación diaria de lodos residuales) el biogás producido tiene menor cantidad de CH<sub>4</sub>. Si la operación del sistema de digestión anaeróbica es tipo "batch" o por lote (alimentación de una sola vez de lodos residuales) el contenido de CH<sub>4</sub> en el biogás es mayor.

En los dos sistemas (flujo continuo y por lote), las características de los biosólidos obtenidos son las mismas, y el tiempo de retención y la temperatura son igualmente importantes para la producción de biogás; sin embargo, el sistema de digestión por lote es más estable y tiene un mayor rendimiento debido a que la agitación de los lodos es intermitente, por lo que se logra una mayor degradación.

El tiempo de retención mínimo para que se obtenga biogás es de 20 días a una temperatura interna de 37.5°C y el máximo potencial de generación de biogás se logra a los 40 días a la misma temperatura<sup>34</sup>. Por ello, el tiempo de retención para extraer el máximo biogás de la fermentación de lodos es de 40 días. Para las PTAR esto puede representar un problema, ya que la cantidad de lodos generados es usualmente alta y continua, y no se pueden tener los lodos almacenados más de 20 días<sup>35</sup>; un almacenamiento mayor implicaría un aumento en el tamaño de los digestores, del sistema y, por lo tanto, una inversión mayor.

En el caso del biogás obtenido a partir de la digestión anaeróbica de lodos residuales el contenido es del 60% al 70%<sup>31, 30, 34, 36</sup> cantidad que se verá afectada por las condiciones y parámetros mencionados en la tabla 3.

El biogás es un gas biocombustible, limpio y barato, por lo que puede utilizarse como fuente para la generación de energía eléctrica<sup>26</sup>. De acuerdo con el reporte técnico de Infantes<sup>37</sup>, el potencial de generación de biogás es de 0.31 m<sup>3</sup> por kilogramo de lodos residuales, por lo que 1 m<sup>3</sup> de biogás tiene el potencial de generación de 5.5-6 kilowatt hora (Kwh)<sup>38</sup>; el potencial de generación de energía eléctrica dependerá del porcentaje de gas metano que contenga el biogás<sup>37</sup>.

Para aprovechar mejor el biogás como fuente para la producción de energía eléctrica, es necesario limpiar el biogás, quitando principalmente el contenido de CO<sub>2</sub> y de H<sub>2</sub>S, con la finalidad de obtener CH<sub>4</sub> casi puro y aumentar la eficiencia energética. El potencial de generación de 1 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> es de 9.8-10.4 Kwh .

De acuerdo con la información anterior, el empleo de biogás libre de impurezas tendría el potencial de producir suficiente energía para abastecer los requerimientos del propio sistema de digestión anaeróbica y los requerimientos energéticos de una PTAR con capacidad de 500 litros por segundo y un gasto energético anual promedio de 350,000 kwh.

En la tabla 4 se realizan los cálculos para la producción de energía eléctrica de acuerdo con los diferentes procesos mediante los cuales se puede llevar a cabo la digestión anaeróbica, considerando el tiempo de retención como características principal para la obtención de biogás/metano.

**Tabla 4. Procesos de digestión anaeróbica y su eficiencia para la producción de biogás y potencial de generación de energía eléctrica**<sup>14, 29, 31, 39</sup>

Proceso	Temperatura (°C)	Tiempo de retención (días)	Biogás por m <sup>3</sup> de lodos (m <sup>3</sup> )	Metano por m <sup>3</sup> de biogás (%)	Energía producida biogás (Kwh)	Energía producida metano (Kwh)	Energía generada por una PTAR de 500 lps (kwh/mes)
Mesofílico	25-37	15-25	0.31	60-65	5.5-6	9.8-10.4	335,430
Termofílico	38-65	20-30	0.36	65-70	5.5-6	9.8-10.4	400,838

### Diseño de tanques digestores anaerobios

El diseño de los reactores o digestores anaeróbicos depende del tiempo requerido para que los lodos residuales sometidos a digestión se estabilicen, reduzcan su volumen y generen el máximo potencial de biogás. Por ello es necesario considerar el tiempo de retención suficiente como parte del diseño de los tanques reactores y controlar las condiciones y parámetros (presentados en la tabla 3) que intervienen durante su operación<sup>19</sup>.

En el caso del diseño de digestores anaeróbicos con flujo continuo o semicontinuo se requiere determinar la tasa de carga de lodos residuales ( $B_v$ ), el tiempo de retención deseado TR (días) para alcanzar la producción máxima de biogás, la cantidad diaria de lodos que se desean digerir Q (m<sup>3</sup> /d), la concentración de sólidos volátiles por metro cúbico de lodos (kg/m<sup>3</sup>) y V el volumen del tanque reactor m<sup>3</sup> <sup>19</sup> (ecuación 2).

$$B_V = \frac{QC_0}{V} = \frac{C_0}{TR} \quad (2)$$

Para determinar el volumen<sup>40</sup> (ecuación 3):

$$V_D = C_f (\text{L/día}) \times TR (\text{días}) \quad (3)$$

Donde  $V_D$  es el volumen del digestor ( $\text{m}^3$ ),  $C_f$  la cantidad diaria de lodos residuales y TR el tiempo de retención deseado.

Para el diseño de digestores anaeróbicos tipo “batch” o por lote, la consideración a tomar es que el volumen total del digestor debe ser suficiente para contener la cantidad de lodos residuales que quieren fermentar y considerar que el 25% del volumen debe ser ocupado por los lodos residuales y dejar un 75% de espacio para albergar el biogás producido<sup>34</sup>.

Para el diseño de digestores anaeróbicos ya sean de flujo continuo o por lote, debe considerarse que para obtener la cantidad de biogás máxima producida la mezcla del sustrato debe de tener entre un 11-13% de fase sólida; el resto debe ser fase líquida y considerar que el factor de producción de biogás para un tiempo de retención de 25 días es de 1.65 ( $Q/V$ ); el volumen de biogás producido por día está expresado<sup>34</sup> en la ecuación 4:

$$V_B = Q/V \times V (\text{m}^3) \quad (4)$$

### Sistema para generación de energía eléctrica

Un sistema de digestión anaeróbica puede ser de una etapa o de dos etapas. Los sistemas más convencionales para la digestión de lodos residuales son los de dos etapas debido a que en el primer tanque los lodos residuales permanecen menor tiempo durante la fase de hidrólisis y acidogénesis, y un segundo tanque para las fases de acetogénesis y metanogénesis<sup>32</sup>.

Posterior a la fase de digestión es necesario colocar filtros de  $\text{CO}_2$  y de  $\text{H}_2\text{S}$  y eliminar el vapor de agua, con la finalidad de purificar el biogás para aumentar la obtención del porcentaje total de  $\text{CH}_4$ , con la finalidad de potenciar la producción de energía eléctrica y de que los equipos donde se lleve a cabo la combustión del gas y la generación de energía eléctrica tengan mayor tiempo de vida. Además, el  $\text{CO}_2$  inhibe la combustión, por lo que disminuye en un 50% la capacidad del motor donde esta se realice. Por su parte, el  $\text{H}_2\text{S}$  es sumamente corrosivo por lo que al no extraerlo del biogás e introducirlo en el motor de combustión el tiempo promedio de vida del equipo es de 4 meses a 1 año, dependiendo de la cantidad de  $\text{H}_2\text{S}$  que contenga el biogás<sup>41-43</sup>.

Existen diversas tecnologías para la depuración del biogás pero la más utilizada es la del carbón activado, ya que es sencillo de utilizar y eficiente en su tasa de remoción<sup>44</sup>.

Una vez que el biogás es depurado, se inyecta en un motogenerador, en turbinas de gas o microturbinas (para cualquiera de estos equipos la eficiencia de producción de energía eléctrica varía del 20-40% de eficiencia); se puede aumentar la eficiencia si se utilizan sistemas de cogeneración donde se combinen la producción de calor y electricidad<sup>42</sup>.

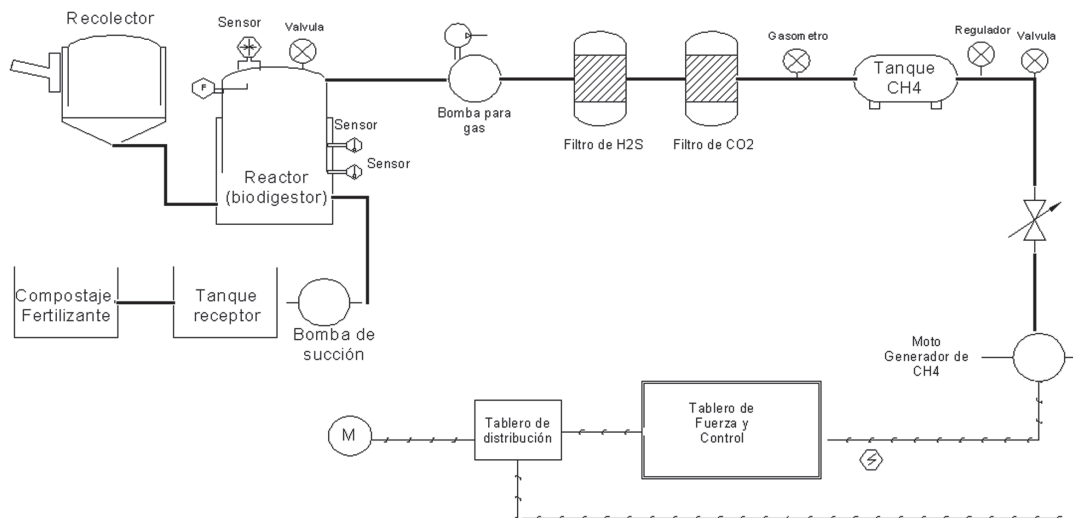
Para determinar el equipo adecuado a utilizar, es necesario calcular el potencial de generación eléctrica mediante la ecuación 5<sup>43</sup>:

$$\eta = \frac{W}{Mb \times LHV} \quad (5)$$

Donde  $W$  es la potencia estimada del equipo,  $M_b$  el consumo de biogás o de metano (según este operando el sistema) del equipo, y  $LHV$  el poder calórico del biogás o del metano.

El diagrama del sistema de digestión anaeróbica que incluye el aprovechamiento del biogás para generación de energía eléctrica se presenta en la figura 1, y un sistema de digestión anaeróbica con recuperación de biogás para generación de energía eléctrica está constituido por los siguientes equipos<sup>40</sup>: tanque recolector: se mezcla el material de fermentación con agua, para obtener la proporción de mezcla deseada; reactor (digestor): las bacterias, al consumir la materia orgánica presente, producen biogás; depósito de gas: se acumula el biogás o el  $CH_4$ ; tanque receptor: depósito para el lodo residual ya fermentado (biosólidos) que es desplazado por el biogás; filtros de  $CO_2$  y de  $H_2S$ : localizados hacia el sitio de consumo o depósito de biogás; moto generador (motor que funciona con  $CH_4$  y que hace girar un generador transformando la energía mecánica del motor en energía eléctrica), tablero de fuerza y control y tablero de distribución.

De acuerdo con el Instituto de Investigaciones Eléctricas, en México existe un potencial de generación de energía eléctrica de 3.000 MW proveniente de la utilizando de biogás y de metano obtenido a partir de la digestión de residuos animales, residuos sólidos urbanos y tratamiento de aguas residuales (esta mediante la captura de los gases generados durante el sistema de tratamiento y de los lodos residuales resultantes)<sup>45</sup>.



**Figura 1. Sistema de digestión anaeróbica con depuración de biogás para producción de energía eléctrica a partir de la combustión del metano**

Fuente: elaboración propia.

### Factibilidad financiera de aprovechamiento de lodos residuales como fuente de energía

Como se mencionó con anterioridad, el tratamiento y disposición de los lodos residuales y biosólidos es un problema económico y serio en el mundo, que se incrementa proporcionalmente al crecimiento demográfico, por lo que implica un reto generar y encontrar formas de solucionar los problemas derivados de este residuo que sean innovadoras, costeables y eficientes principalmente porque en

un futuro las restricciones de calidad de los lodos serán mayores, por lo que el grado de tratamiento deberá ser mejorado<sup>46</sup>.

Se calcula que en los Estados Unidos y en países desarrollados, la inversión necesaria para la instalación de un sistema de digestión anaeróbica es de aproximadamente \$2.1 millones de dólares<sup>47</sup>, para una PTAR con capacidad de tratamiento de 1,000-30,000 litros por segundo<sup>48</sup>.

De acuerdo con Rittman<sup>49</sup>, el aprovechamiento del biogás producido por la digestión anaerobia de lodos residuales tiene beneficios económicos debido a que existe una reducción en los costos por manejo y disposición de los biosólidos (aprox. \$250 usd/ton/año) y una reducción en los gastos de energía eléctrica al utilizar el biogás como fuente de energía (aprox. \$12,000 usd/año) por lo que se considera que los ahorros anuales en los gastos de operación son entre 40-60%. Lo anterior implica que la inversión para una instalación típica se recupera en aproximadamente tres años en una PTAR de tipo estándar con una capacidad de tratamiento de entre 500-1,000 litros por segundo y una producción de 380 t/d de lodos residuales.

Como parte de la viabilidad económica para la instalación de un sistema de digestión anaeróbica con recuperación energética, se debe considerar que la producción mínima por hora de CH<sub>4</sub> debe ser de 5 m<sup>3</sup><sup>50</sup>.

### Percepción social y riesgos a la salud

Los lodos resultantes del tratamiento de aguas residuales contienen, además de materia orgánica, metales pesados, compuestos orgánicos tóxicos, aceites, emulsiones, productos químicos y contaminantes emergentes (productos de limpieza, productos de cuidado personal y medicamentos) en diferentes cantidades<sup>51</sup>. De acuerdo con el tratamiento que reciban los lodos residuales será su capacidad de generar afectaciones a la salud humana. De acuerdo con Cardoso<sup>7</sup> los lodos que reciben un tratamiento mediante la digestión anaeróbica son biosólidos de buena calidad, con concentraciones reducidas de materia orgánica, metales pesados y materia inorgánica, por lo que se reducen los riesgos a la salud.

La aceptación social para el aprovechamiento de los lodos residuales es importante, debido a que de esto depende su aceptación para ser reusado. De acuerdo con un estudio de percepción realizado en Estados Unidos en 2002<sup>9</sup> el desconocimiento de la gente sobre la existencia de los lodos residuales y su rechazo a ser reutilizados han ocasionado que recientemente se haya acordado que los lodos residuales que pueden aprovecharse benéficamente se denominen “biosólidos”; esto con la intención de no ser tipificado como un residuo negativo.

En promedio, el 71% de los lodos residuales generados en países desarrollados recibe un tratamiento de estabilización; sin embargo, el 30% de estos biosólidos es depositado en vertederos o en rellenos a cielo abierto, lo que implica que, según Renner<sup>52</sup>, los residentes dentro de aproximadamente 1 kilómetro a la redonda de las PTAR y de donde se depositan lodos residuales o biosólidos se quejan de erupciones en la piel, irritación en los ojos y garganta, y problemas pulmonares. También se encontró que los pobladores cercanos a las PTAR y vertederos de lodos/biosólidos son 25 veces más propensos a padecer enfermedades ocasionadas por microorganismos, dando lugar a padecimientos que van desde infecciones leves en la piel, hasta dermatitis aguda, asma e infecciones gastrointestinales.

Sin embargo, no solamente los residentes de las zonas aledañas a las PTAR y vertederos de lodos residuales/biosólidos tienen afectaciones a la salud; también los trabajadores de las mismas, ya que están expuestos directamente a compuestos orgánicos, metales pesados, compuestos inorgánicos y gases tales como dióxido de carbono, metano, y dióxido de azufre. Los trabajadores no solamente sufren de las afectaciones a la salud mencionadas, sino que el 38.4% de los trabajadores de los rellenos en tierra a cielo abierto de lodos residuales/biosólidos tienen una percepción del gusto y del olor incorrecta<sup>53</sup>.

En el caso de los olores emitidos por las PTAR y los vertederos de lodos residuales y biosólidos; estos pueden disminuirse si los lodos residuales son digeridos de manera anaeróbica y se incorpora hierro a la mezcla de digestión, ya que el hierro al adherirse a las proteínas presentes en los lodos genera reacciones químicas internas que disminuyen la cantidad de compuestos orgánicos volátiles de azufre causantes del mal olor<sup>54</sup>.

Aunque los efectos nocivos a la salud de los residentes pueden verse disminuidos por la incorporación de sistemas de digestión anaeróbica que estabilicen los lodos residuales y los aprovechen para la producción de energía, es importante que los residentes de las zonas donde se encuentran ubicadas las PTAR acepten que un riesgo seguirá existiendo, pues las instalaciones de los sistemas de digestión anaeróbica conllevan la producción y concentración de gases, que pueden ser explosivos.

La importancia de la percepción de la sociedad consiste en que conozcan el riesgo y que estén dispuestos a aceptar la construcción y operación de un sistema de digestión anaeróbica, que disminuirá los riesgos para su salud.

En el caso de México, el 76% de los lodos residuales y biosólidos es depositado en vertederos o rellenos a cielo abierto<sup>55</sup>, que por lo general se encuentran en terrenos aledaños a las PTAR, por lo que implican un riesgo a la salud para los habitantes de la zona donde se encuentran ubicadas. Para evitarlo se requiere de inversión en infraestructura y de la generación de nuevas tecnologías que disminuyan las cantidades de lodos generados y que, además, los biosólidos resultantes tengan bajos contenidos de bacterias, microorganismos, contaminantes emergentes, y compuestos de azufre, con la finalidad de mitigar los efectos nocivos a la salud de los trabajadores, los habitantes contiguos a la PTAR y vertederos, y de los que aprovechen los biosólidos como fertilizante agrícola y composta.

Con la finalidad de generar nuevas tecnologías para el tratamiento del agua residual y de sus lodos, es necesario que se apoye la investigación y desarrollo tecnológico para aumentar la calidad del agua tratada y de los biosólidos para que puedan ser aprovechados en nuevos procesos productivos.

### **Aspectos legales del manejo de lodos residuales y biosólidos**

La necesidad de regular el manejo de los lodos residuales, su tratamiento, aprovechamiento y disposición radica en la importancia de mitigar los efectos negativos al medio ambiente, efectos nocivos a la salud y riesgos al ser reutilizados o aprovechados de diversas formas.

En los últimos 10 años a escala mundial se ha incrementado en un 50% la producción de lodos residuales debido a las exigencias ambientales para el tratamiento de las aguas residuales con la finalidad de disminuir los impactos ambientales al ser descargadas en cuerpos de agua<sup>39</sup>.

En el caso de la Unión Europea desde 1992 se han emitido reglamentaciones con la finalidad de reutilizar los lodos residuales, lo cual generó que en 2006 se emitiera una ley general para la reutilización y aprovechamiento de los lodos residuales con la finalidad de promover entre los países europeos la elaboración de reglamentos locales que lograra obligar a las PTAR dar tratamiento de sus lodos residuales para ser aprovechados como biosólidos.

La implementación de esta ley y sus reglamentos particulares ha logrado que en al menos 7 países pertenecientes a la Comunidad Europea se haya reutilizado el 50% de sus lodos como fertilizante agrícola, mejorador de suelos y materia prima para fábricas de composta<sup>39</sup>. Tales regulaciones consideran concentraciones y límites máximos permisibles de metales pesados, coliformes fecales, salmonella, huevos de helmintos, niveles de: toxicidad, reactividad, corrosividad, explosividad y presencia de agentes biológico-infecciosos, para lodos y biosólidos, y máximas cantidades permitidas para su aplicación en tierra u otro aprovechamiento.

En los Estados Unidos, la EPA se encarga de regular el manejo, tratamiento y disposición de los lodos residuales, así como de los biosólidos. También cuenta con estadísticas y datos sobre cantidades y tratamientos por PTAR, lo que hace que se tengan datos oficiales sobre su calidad, su aprovechamiento y su disposición final. Adicionalmente, la EPA establece los requisitos y procedimientos para cada uno de los diversos tipos de tratamientos, lo que implica que regule adecuadamente los sistemas de digestión anaeróbica y las condiciones bajo las cuales se genera energía a partir del biogás producido. Clasifica los biosólidos resultantes de diversos tipos de tratamiento en A, B y C; donde A es el biosólido con mayor calidad, por lo que puede ser aplicado en la agricultura, mejorador de suelos, composta ornamental y aditivo como materiales para la construcción.

En Sudáfrica desde 1997 se establecieron los criterios de calidad y composición de los biosólidos con la finalidad de poder ser aprovechados<sup>10</sup> y son clasificados en cuatro tipos, de acuerdo con el tratamiento que recibieron: A (no requiere tratamiento por su calidad), B (tratamiento de digestión aeróbica), C (tratamiento mediante digestión anaeróbica, compostaje, irradiación y pasteurización) y D (lo mismo que para C pero con menor contenido de metales pesados)<sup>14</sup>.

China basa su legislación en la aplicación de biosólidos como fertilizante agrícola y mejorador de suelos controlando la duración y cantidad que es aplicada, en términos de la textura tanto del suelo como del biosólido, y del nivel del agua subterránea; la legislación es muy estricta con respecto a los máximos permisibles de metales pesados y no establece límites para organismos patógenos<sup>14</sup>.

Brasil toma como referencia la clasificación que establece la EPA, tanto para utilización de biosólidos de acuerdo con su calidad, como para límites máximos permisibles de patógenos y de metales pesados.

En cambio, Guatemala cuenta con reglamentación sobre el reúso y disposición de lodos, pero no contempla regulaciones sobre los tratamientos. Por su parte, en Nicaragua el manejo y disposición de los lodos residuales debe realizarse conforme las recomendaciones que en su momento emita la comisión de medio ambiente<sup>56</sup>.

En cuanto a Chile, el Congreso Nacional chileno (CNC) en 2009<sup>57</sup> publicó el decreto mediante el cual se establece el reglamento para el manejo de los lodos residuales generados por las PTAR. En este se considera la clasificación sanitaria para el reúso de lodos residuales y sus diferentes aprovechamientos, así como los lugares en los que deberán de disponerse cuando estos sean considerados como residuos peligrosos por su composición. Adicionalmente, hace referencia a los diferentes tratamientos mediante los cuales pueden ser estabilizados los lodos residuales y los clasifica de acuerdo con su composición fisicoquímica para poder ser aprovechados en tres categorías: A, B y C, considerando que el biosólido con mayor calidad y que se puede aprovechar para más usos es el A<sup>57</sup>.

La legislación usualmente es un reflejo de las necesidades detectadas por cada país. Los países desarrollados conocen el problema ambiental y de salud pública que representan los lodos residuales, por lo que su legislación es específica, mientras que los países en vías de desarrollo consideran que los lodos residuales pueden ocasionar problemas, por lo que deben regularse; sin embargo, no son específicos pues dan prioridad a legislación que tenga que ver con cuestiones de alimentación y atención a la pobreza.

### **Legislación mexicana**

La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos<sup>58</sup> clasifica los lodos residuales como un residuo sólido urbano, y los considera como de manejo especial, por lo que hay que disponerlos adecuadamente según sus propiedades contaminantes.

De acuerdo con la NOM-004-SEMARNAT-2002<sup>28</sup>, todas las PTAR deben analizar los lodos residuales generados, en periodos de acuerdo con las cantidades generadas mensualmente y considerando lími-

tes máximos permisibles para el contenido de metales pesados, microorganismos patógenos y análisis CRETIB (corrosividad, radioactividad, explosividad, toxicidad y biológico infecciosos), de acuerdo con la NOM-087-SEMARNAT-SSAI-2002<sup>59</sup> y la NOM-053-SEMARNAT-1993<sup>60</sup> con la finalidad de clasificarlos y poder aprovecharlos sin poner en riesgo la salud o el medioambiente.

Como todo residuo sólido, los lodos residuales una vez analizados, en caso de no cumplir con los parámetros establecidos por la NOM-004-SEMARNAT-2002<sup>28</sup> o el análisis CRETIB, deben ser tratados como residuo peligroso y ser dispuestos en confinamientos o vertederos controlados y especificados para la depositación de este tipo de residuos, de acuerdo con la NOM-052-SEMARNAT-2005<sup>61</sup>.

En el caso de la normativa mexicana, no existe regulación sobre los tratamientos a los que se deben someter los lodos residuales con la finalidad de convertirlos en biosólidos, ni para su construcción y operación.

Por tanto, en el caso de la utilización de los biosólidos como materia prima para la generación de energía eléctrica, no existe una normativa específica. La Comisión Federal de Electricidad (CFE), que regula la generación y distribución de la energía eléctrica en el país, permite generar energía eléctrica para consumo propio pero no para su posible distribución o venta, por lo que la energía excedente debe ser reincorporada a las líneas eléctricas propiedad de CFE, sin beneficios adicionales por ingresos económicos para la institución o empresa generadora de energía eléctrica más que la del incentivo de disminuir los gastos energéticos por consumo u operación.

La legislación mexicana debiera incluir las regulaciones necesarias para exigir que todos los lodos residuales reciban un proceso de estabilización que permita aprovecharlos en diferentes usos sin que presenten un riesgo para la salud.

Adicionalmente, México debe implementar la normativa para la construcción y operación de sistemas de digestión anaeróbica, que permitan recuperar la energía, con la finalidad de disminuir los gastos energéticos y operativos de las PTAR y contribuir a la producción de energía renovable.

### **Prevención de generación de lodos residuales**

Como se mencionó anteriormente, los lodos residuales están compuestos por distintos tipos de contaminantes comúnmente conocidos (metales pesados, químicos y microbiológico); adicionalmente, el empleo de diversos productos entre los que se encuentran fármacos con esteroides, medicamentos, hormonas, productos para el cuidado personal y de limpieza del hogar (contaminantes emergentes), al ser desechados por medio de la excreta y orina o tirarse en las alcantarillas, se incorporan a las aguas residuales; estos contaminantes, por su composición química, son difíciles de extraer tanto del agua como de los lodos resultantes de su tratamiento, lo que implica que disminuya su calidad y, por lo tanto, el potencial de poder ser reutilizados o aprovechados<sup>62</sup>.

Lo anterior implica que el contenido de materia orgánica, de materia inorgánica y de contaminantes emergentes presentes en los lodos residuales y biosólidos aumente, incrementando su volumen y su calidad<sup>63</sup>, así como la dificultad de su tratamiento para que no causen un riesgo a la salud o al ambiente cuando estos sean aplicados como fertilizante agrícola, mejorador de suelos o en rellenos a cielo abierto.

Por lo anterior, de acuerdo con la Universidad de Ferrara, Italia (UNIFE)<sup>64</sup>, es importante no solo diseñar programas y tecnología para el manejo de lodos residuales y de los aspectos de resolución del problema una vez que estos se generen, sino que se considere el prevenir su generación en grandes cantidades, lo que ayudaría a reducir los costos de manejo, y los riesgos presentes a la salud.

La manera en la que se puede prevenir la generación de lodos residuales y biosólidos con altos contenidos de materia orgánica y de otros contaminantes es el cambio en el consumo de productos para el cuidado personal y la limpieza del hogar<sup>64</sup>.

## CONCLUSIONES

Con el fin de garantizar la distribución de agua a las nuevas generaciones y que minimice el impacto ambiental, por el incremento en los lodos residuales es necesario invertir en el desarrollo de nuevas tecnologías aplicadas a la solución del problema de disponibilidad de agua y al tratamiento de los lodos residuales.

El utilizar los biosólidos resultantes de distintos sistemas de tratamiento, pero en específico la digestión anaeróbica, permite aprovechar un residuo alto en nutrientes como fertilizante agrícola, restaurador de suelos (contrarrestar los problemas actuales de desertificación), elaboración de composta, aditamento para materiales de la construcción y como materia prima para la producción de energía; permite capturar los GEI generados evitando el contacto directo con los trabajadores y permite hacer uso de una energía renovable limpia para abastecer los requerimientos energéticos de las PTAR, del sistema de digestión e incluso en algunos países abastecer de energía eléctrica a comunidades pequeñas.

En México hace falta poner atención en los lodos residuales, ya que aunque se contempla como un residuo sólido urbano, la mayoría de la población no sabe que existe, y la que conoce de su existencia no cuenta con la información necesaria, por lo que desconfía de que su aprovechamiento o reutilización como materia prima para muchos propósitos sea benéfica y no cause algún riesgo para su salud.

Por lo anterior hay que transmitir los beneficios que se tienen al aprovechar los lodos residuales y de implementar sistemas de digestión anaeróbica.

Además, en México hace falta que se trabaje en la elaboración de regulaciones que incluyan controles y límites más estrictos para la estabilización y control de los lodos residuales, así como la estandarización de procedimientos para la instalación y operación de sistemas de recuperación energética de lodos.

Los países desarrollados cuentan con legislación detallada sobre el manejo, aprovechamiento y disposición de los lodos residuales y biosólidos, e invierten en infraestructura que les permita minimizar los riesgos a la salud y los problemas ambientales, lo que posibilita que aprovechen entre el 50% y el 80% de sus biosólidos de manera benéfica. Las leyes y reglamentos facilitan llevar un control sobre las cantidades generadas, los tratamientos y el aprovechamiento final de los biosólidos.

Hace falta desarrollar investigación y trabajos interdisciplinarios, ya que de acuerdo con la revisión de referencias analizadas, los proyectos de investigación se dedican solamente a abordar el tema de los sistemas de digestión anaeróbica desde una disciplina, sin considerar la integración del conocimiento que permita realizar proyectos que contemplen a todos los actores involucrados en el manejo, tratamiento y disposición de los lodos residuales.

Adicionalmente, es necesario adelantar estudios sobre el manejo y aprovechamiento de lodos residuales en México con la finalidad de tener datos específicos sobre la cantidad de lodos residuales generados y los tratamientos que cada PTAR maneja, con la finalidad de crear nuevos sistemas y tecnología que ayuden a disminuir la emisión de GEI, los problemas a la salud de los habitantes cercanos a las PTAR y de sus trabajadores, reducir los costos de operación de las PTAR y contribuir a la generación de energía eléctrica renovable.

De lo anterior, surge la importancia de la incorporación de proyectos e instalación de sistemas de digestión anaeróbica y plantas de biogás para la recuperación energética, no solo en las PTAR públicas y privadas existentes actualmente en México, sino la incorporación de estos sistemas, desde la realización del proyecto de construcción de nuevas PTAR, ya que esto implicaría que la instalación de cualquier PTAR en México contemple una operación integral, es decir, no solo del agua residual a tratar, sino también de los residuos que se generan.

Lo anterior permite que los lodos residuales o biosólidos generados en las PTAR sean aprovechados de manera benéfica, reduciendo así el impacto ambiental y social que estos pudiesen tener.

#### Agradecimientos

Se agradece al CONACYT por la beca otorgada para la realización de los estudios de Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo, así mismo a los Docentes de la Universidad Autónoma de Baja California por su apoyo para la realización del proyecto "Potencial de recuperación energética empleando biosólidos como materia prima en Ensenada, B. C." y al Director de tesis Dr. Leopoldo Mendoza Espinosa por su apoyo.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MÉXICO. COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA (CONAGUA). Agenda del agua 2030. 2011. p. 70.
2. ORTIZ, M.; GUTIÉRREZ, M. and SÁNCHEZ, E. Propuesta de manejo de lodos residuales de la Planta de tratamiento de la ciudad industrial del Valle de Cuernavaca, Estado de Morelos, México. En: Revista Internacional de Contaminación Ambiental. 1995. Vol. 11, N° 2, p.105-115.
3. DAGUER, G. Gestión de biosólidos en Colombia. En: Congreso internacional ACODAL sociedad, ambiente y futuro. (29-31, octubre: Colombia). Memorias. Santiago de Cali. 2003.
4. GHAZY, M.; DOCKHORN, T. & DICHTL, N. Sewage Sludge Management in Egypt: Current Status and Perspectives towards a Sustainable Agricultural Use. En: World Academy of Science, Engineering and Technology. 2009. Vol. 57. p. 492-500.
5. PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LOS ASENTAMIENTOS HUMANOS, COMISIÓN CANADIENSE PARA EL MANEJO DE LODOS Y COMISIÓN DE ALCANTARILLADO Y LODOS RESIDUALES (UN-HABITAT). Global atlas of excreta, wastewater sludge, and biosolids management: moving forward the sustainable and welcome uses of a global resource. 2ª ed. New Brunswick, Canada: United Nations Human Settlements Programme, 2008. 632 p.
6. MAHAMUD, M. y GUTIÉRREZ, A. Biosólidos generados en la depuración de aguas (I): Planteamiento del problema. En: Ingeniería del Agua. 1996. Vol.3. N° 2. p. 47-62.
7. CARDOSO, L.; *et al.* Manejo de lodos residuales en México. En: XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. (3-8, diciembre: Brasil). Memorias. Puerto Alegre, Brasil. 2003. p. 1-7.
8. ONYECHE, T. Economic benefits of low pressure sludge homogenization for wastewater treatment plants. En: CUTEC-Institute. 2010. Vol. 1. p. 417-422.
9. BEECHER, N.; *et al.* Risk Perception, Risk Communication, and Stakeholder Involvement for Biosolids Management and Research. En: J. Environmental Qual. 2005. Vol. 34. p. 122-128.
10. SNYMAN, H.; ALEXANDER, W. & MARX, C. Land disposal and agricultural reuse of sewage sludge within the framework of the current south african guidelines. En: WISA 2000 Biennial Conference. (28-01, mayo, junio: South Africa). Memorias. Sun City, South Africa. 2000.
11. OROPEZA, N. Lodos residuales: estabilización y manejo. En: Caos Conciencia. 2006. Vol. 1. p. 51-58.

12. KARGBO, D. Biodiesel Production from Municipal Sewage Sludges. En: Energy Fuels. 2010. Vol. 24. p. 2791-2794.
13. MÉXICO. SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES (SEMARNAT). Programa Nacional para la prevención y gestión integral de los residuos 2009-2012. México, D. F.: SEMARNAT, 2008. p. 174.
14. JIMÉNEZ, B. & WANG, L. Sludge Treatment and Management. En: Municipal Waste Water Management in Developing Countries: Principles and Engineering. London, UK: IWA Publishing, 2006. p. 237-292.
15. BEECHER, N. A Greenhouse gas emissions analysis of biosolids management options for Merrimack, NH. New Hampshire, EUA: North East Biosolids and Residuals Association (NEBRA), 2008. p. 35.
16. ESTADOS UNIDOS. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Biosolids Technology Fact Sheet Land Application of Biosolids. Manual. Washington: EPA, 2000. p. 99.
17. NÚÑEZ, D. Wastewater treatment and sewage sludge management in Galicia: Agricultural and environmental aspects. En: EJEAFCh. 2002. Vol. 1. N° 1. p. 23-29.
18. DOHÁNYOS, M. & ZABRANSKÁ, J. Anaerobic digestion. En: Sludge into biosolids: Processing, Disposal, Utilization. (L. Spinosa, P.A. Vesilind, Eds.) . London, UK: IWA publishing, 2001. p. 223-241.
19. DEUBLEIN, D. & STEINHAUSER, A. Biogas from Waste and Renewable Resources, An Introduction. 2ª ed. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Weinheim, Alemania. 2011. p. 520.
20. ESTADOS UNIDOS. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA) AND METHANE TO MARKETS. Emisiones mundiales de metano y oportunidades de atenuación. Washington: Environmental Protection Agency & Methane to Markets, 2008. p. 4.
21. MÉXICO. INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA (INE). Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero. México: Instituto Nacional de Ecología, 2006. p. 50.
22. ARVIZU, J. Actualización del inventario nacional de gases de efecto invernadero 1990-2006 en la categoría de desechos. Instituto de investigaciones eléctricas e Instituto Nacional de Ecología. México, D. F.: INE, 2008. p. 137.
23. MANTILLA, G.; CHACÓN, J. y MOELLER, G. Emisiones de gas de efecto invernadero: aportes generados por el tratamiento y descarga de aguas residuales domésticas en México. En: XXXI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. (12-15, octubre: Chile). Memorias. Santiago, Chile. 2008.
24. UNITED NATIONS. Protocolo de Kyoto. Kyoto Protocol to United Nations Framework Convention On Climate Change. Japón, 2005. p. 21.
25. RULKENS, W. Sewage Sludge as a Biomass Resource for the Production of Energy: Overview and Assessment of the Various Options. En: Energy Fuels. 2007. Vol. 22. p. 9-15.
26. MALIK, S. and BHARTI, U. Biogas production from Sludge of Sewage Treatment Plant at Haridwar. En: Asian J. Exp. Sci. 2009. Vol. 23. N° 1. p. 95-98.
27. NAKASIMA, M.; VELÁSQUEZ, N. y OJEDA, S. Tecnologías para el tratamiento de los residuos sólidos orgánicos del sector residencial y su aprovechamiento como fuente de energía. En: 4to. Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos. (5-7, Octubre: México). Memorias. México, D. F. 2011. pp. 535-542.

28. MÉXICO. SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES (SEMARNAT). NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental; lodos y biosólidos; especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. México: SEMARNAT, 2002.
29. RUBIA, M.; *et al.* Anaerobic Mesophilic and Thermophilic Municipal Sludge Digestion. *En: Chem. Biochem. Eng. Q.* 2002. Vol. 16. N° 3. p. 119-124.
30. CISNEROS, M.; *et al.* Digestión anaerobia en dos etapas de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales. Universidad Autónoma de México (UNAM). 2005. p. 6.
31. ARTHUR, R. & BREW-HAMMOND, A. Potential biogas production from sewage sludge: A case study of the sewage treatment plant at Kwame Nkrumah university of science and technology, Ghana. *En: IJEE.* 2010. Vol. 1. N° 6. p. 1009-1016.
32. WATER ENVIRONMENT FEDERATION & AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (WEF & ASCE). Design of Municipal Wastewater Treatment Plants Volume III. 4a ed. Water environment federation preserving & embracing the global water environment, 1998. p. 280.
33. AGLER, M.; *et al.* Anaerobic digestion of brewery primary sludge to enhance bioenergy generation: A comparison between low- and high-rate solids treatment and different temperatures. *En: Bior. Tech.* 2010. Vol. 101. p. 5842-5851.
34. DUQUE, D.; GALEANO, U. y MANTILLA, G. Evaluación de un digestor tipo "Plug Flow". [En línea]. 2006. [Consultado el 25 de noviembre de 2011]. Url disponible en <http://www.lrrd.org/lrrd18/4/duqu18049.htm>.
35. AKERLUND, A. Evaluation of a disintegration technique for increased biogas production from excess activated sludge. Department of Microbiology. *En: Swedish University of Agricultural Science.* 2008. p. 53.
36. GILROYED, B.; *et al.* Anaerobic digestion of specified risk materials with cattle manure for biogas production. *En: Bior. Tech.* 2010. Vol. 101. p. 5780-5785.
37. INFANTES P. Diseño de Biodigestores, Tabla de valores TS. [En línea]. 2007. [Consultado el 25 de marzo de 2011]. Url disponible en <http://www.engormix.com/MA-porcicultura/manejo/articulos/disenio-biodigestores-t976/p0.htm>
38. GUARDADO CHACÓN, José Antonio. Tecnología del biogás. Manual del Usuario. La Habana, Cuba: Cuba solar, 2006. p. 22.
39. RIZZARDINI, C. & GOI, D. Considerations About European Directives and Italian Regulation on Sludge from Municipal Wastewater Treatment Plants: Current Status and Future Prospective. *En: The Open Waste Management Journal.* 2009. Vol. 2. p. 17-26.
40. SOLARI, G. Ficha Técnica Planta de biogás. [En línea]. 2004. [Consultado el 05 de noviembre de 2011]. Url disponible en [www.solucionespracticass.org.pe](http://www.solucionespracticass.org.pe).
41. COELHO, S.; *et al.* Rational energy use and alternatives sources use of biogas at USP-PU-REFA. *En: International Workshop Bioenergy for a sustainable development (8-9, noviembre: Chile).* Memorias. Viña del Mar, Chile. 2004.
42. COELHO, S.; *et al.* Energy Generation by a Renewable Source-Sewage Biogas. *En: Evento del Cambio climático y Energía. (17-18, noviembre: Brasil).* Memorias. Rio de Janeiro, Brasil. 2006.
43. COELHO, S.; *et al.* The Production of Sewage Biogas and its Use for Energy Generation. *En: Conferencia y exhibición mundial de bioenergía. (30-01, mayo, junio: Suecia).* Memorias. Jönköping, Suecia, 2006.

44. RELEA, F.; *et al.* Proyecto MICROPHILOX: Valorización energética de biogás en depósitos controlados mediante microturbinas. *En:* Infoenviro. 2009. Vol. 1. p. 1-3.
45. MÉXICO. INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA. Programa de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua, Horizonte 2030. México, D. F.: IMTA, 2012. p. 57.
46. HALL, J. Ecological and economical balance for sludge management options. Marlow, United Kingdom: WRc plc, Medmenham, 2000. p. 59.
47. ESTADOS UNIDOS. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Emerging Technology for biosolids management. Manual. United States: EPA, 2006. p. 135.
48. PAVAN, P.; *et al.* Anaerobic co-digestion of sludge with other organic wastes in small wastewater treatment plants: an economic considerations evaluation. *En:* Water Science & Technology. 2007. Vol. 56. p. 45-53.
49. RITTMAN, B.; *et al.* Full-scale application of focused-pulsed pre-treatment for improving biosolids digestion and conversion to methane. *En:* Water Science & Technology. 2008. Vol. 58. p. 1895-1901.
50. GRUPO AQUA LIMPIA. Información Técnica de moto generadores para combustión de metano. [En línea]. 2011. [Consultado el 04 de noviembre de 2011]. Url disponible en <http://www.aqualimpia.com>.
51. MISRA, V. & PANDEY, S. Hazardous waste, impact on health and environment for development of better waste management strategies in future in India. *En:* Env. Int. 2005. Vol. 31. p. 417-431.
52. RENNER, R. NRC targets pathogens in sludge for research. *En:* Environmental Science & Technology. 2002. Vol. 1. p. 338.
53. DZAMAN, K.; *et al.* Taste and smell perception among sewage treatment and landfill workers. *En:* International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health. 2009. Vol. 22. N° 3. p. 227-234.
54. ZEYNEP, E.; *et al.* Recent findings on biosolids cake odor reduction: Results of WERF phase 3 biosolids odor research. *En:* Journal of Environmental Science and Health. 2008. Vol. 43. p. 1575-1580.
55. JIMÉNEZ, B. Latin America: Mexico. *En:* Wastewater sludge: a global overview of the current status and future projects. (L. Spinoso, Ed.). London, UK: IWA publishing, 2011. p. 47-50.
56. MÉXICO. INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA. Políticas públicas y normatividad sobre agua y lodos residuales. México, D. F.: IMTA, 2000. p. 8.
57. CHILE. BIBLIOTECA DEL CONGRESO NACIONAL. Decreto 4. Reglamento para el manejo de lodos residuales generados en plantas de tratamiento de aguas servidas. Chile: La Biblioteca, 2009.
58. MÉXICO. CÁMARA DE DIPUTADOS DEL CONGRESO DE LA UNIÓN. Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos (LEGEPIR). México: La Cámara, 2007.
59. MÉXICO. SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES (SEMARNAT) Y SECRETARÍA DE SALUD (SSA). NOM-087-SEMARNAT-SSA I-2002. Protección ambiental, Salud ambiental, Residuos peligrosos biológico infecciosos, Clasificación y especificaciones de manejo. México: La Secretaría, 2003.

60. MÉXICO. SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES (SEMARNAT). NOM-053-SEMARNAT-1993. Procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente. México: La Secretaría, 2003.
61. MÉXICO. SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES (SEMARNAT). NOM-052-SEMARNAT-2005. Características, procedimiento de identificación y clasificación de los residuos peligrosos. México: La Secretaría, 2006.
62. BECERRIL, J. Contaminantes emergentes en el agua. En: Revista Digital UNAM. 2009. Vol. 10. p. 1-6.
63. CLARKE, B. & SMITH, S. Review of 'emerging' organic contaminants in biosolids and assessment of international research priorities for the agricultural use of biosolids. En: Environmental International. 2011. Vol. 37. p. 226-247.
64. ITALIA. UNIVERSIDAD DE FERRARA. (UNIFE). Reuse of drinking water treatment plants sludges in agriculture: problems, perspectives and limitations. Italia: UNIFE, 2000. p. 7.

**PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES: UNA VISION COMO SISTEMA COMPLEJO.**

**ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS: A VISÃO COMO SISTEMA COMPLEXO.**

**WASTEWATER TREATMENT PLANT: A COMPLEX SYSTEM VISION.**

<sup>1</sup>Rojas-Remis, Rebeca <sup>2</sup>Mendoza-Espinosa, Leopoldo.

**RESUMEN**

Los sistemas complejos permiten evaluar sistemas cuya interacción de procesos y elementos es tal, que deben de analizarse como un conjunto para poder resolver los problemas que presenten.

Las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) pueden considerarse como sistema complejo debido a que sus procesos están íntimamente relacionados y generan nuevos procesos no previstos que no pueden subdividirse para analizar y modificar de forma independiente.

Debido a lo anterior se realiza un análisis de la PTAR “El Naranjo” con capacidad de 500 litros por segundo, operada por la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Ensenada (CESPE), ubicada en Baja California (B.C.), México, desde una visión de sistema complejo, ya que este tipo de análisis permitió identificar nuevos procesos generados a partir de sus múltiples interacciones e identificar impactos ambientales potenciales para dar una propuesta de solución, que eficiente la operación de la PTAR y genere un menor impacto ambiental y social.

<sup>1</sup> Maestra en Docencia (M.D.), estudiante del Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 177-56-80. reberemis@ite.edu.mx

<sup>2</sup> Doctor, Investigador Titular, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 174-54-62 ext.115. lmendoza@uabc.edu.mx

## RESUMO

Os sistemas complexos, cujos sistemas de interacção, para avaliar os seus processos e dos elementos, é tal que deve ser analisada como um todo, para resolver os problemas no sistema.

A estação de tratamento de água (ETAR) pode ser considerado como um sistema complexo, pois os processos realizados estão intimamente relacionadas e imprevisto criar novos processos que não podem ser subdivididas para analisar e modificar de forma independente.

Devido a isso, uma análise da ETAR "El Naranjo", com capacidade de 500 litros por segundo, operados por Estado Serviços Públicos Comissão de Ensenada (CESPE), localizado na cidade de Ensenada, Baja California, no México, a partir de uma visão de sistema complexo, uma vez que este tipo de análise identificou novos processos gerados a partir de suas múltiplas interações e identificar potenciais impactos ambientais de uma proposta de solução, que eficiente funcionamento da ETAR e gerar menor impacto ambiental e social .

## ABSTRACT

Complex systems are used to evaluate systems, whose interaction in their processes and elements make them up, because it should be analyzed as a whole in the way to be able to modify or solve problems in the system.

<sup>1</sup> Maestra en Docencia (M.D.), estudiante del Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 177-56-80. reberemis@ite.edu.mx

<sup>2</sup> Doctor, Investigador Titular, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 174-54-62 ext.115. Imendoza@uabc.edu.mx

The case of wastewater treatment plants (WWTP) are considered as complex system because they perform processes that are close related and generate new processes that can't be subdivided to analyze them and modify independently.

For this reason the analysis of the Naranja WWTP with capacity of 500 mgd, operated by Comision Estatal de Servicios Publicos de Ensenada (CESPE), located in the city of Ensenada, Baja California, Mexico; with complex system vision is important; this analysis identified new processes generated from their multiple interactions and identify potential environmental impacts giving recommendations and proposals to make the operation of the WWTP efficient and decrease the environmental and social impacts.

**Palabras clave:** aguas residuales, lodos residuales, sistema complejo.

**Palavras Importantes:** águas residuais, lodo de esgoto, sistema complexo.

**Key words:** waste water, sewage sludge, complex system.

<sup>1</sup> Maestra en Docencia (M.D.), estudiante del Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 177-56-80. reberemis@ite.edu.mx

<sup>2</sup> Doctor, Investigador Titular, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 174-54-62 ext.115. Imendoza@uabc.edu.mx

## INTRODUCCIÓN

Un sistema es la representación de un conjunto de procesos, situaciones, fenómenos, elementos y relaciones mediante diagramas para mostrar sus interacciones y la forma en que se encuentra organizado (García, 2006).

Se dice que un sistema es complejo cuando la dependencia entre los elementos que lo conforman no permiten su funcionamiento óptimo de manera individual, es decir, que los procesos o relaciones que determinan su funcionamiento no se pueden modificar de forma aislada debido a que la dependencia existente entre ellos es tal, que se deben de analizar como un conjunto de interacciones para de esta manera poder modificar el sistema.

Los sistemas complejos están constituidos por elementos heterogéneos en interacción constante, por lo que estos subsistemas o procesos pertenecen a muy diversas disciplinas (García, 2006).

Debido a lo anterior, los sistemas complejos exigen ser tratados con una visión interdisciplinaria que permita tener una visión del todo para poder resolver los problemas que se presentan de manera integral y considerar todos los factores involucrados.

Por lo tanto, los sistemas complejos ayudan a analizar cualquier tipo de sistema con interrelaciones variadas entre sus diversos componentes y que crean nuevos procesos que, por su complejidad, no pudieron visualizarse desde su diseño.

En el caso del sistema de tratamiento de aguas residuales que se realiza en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) se considera un sistema complejo,

<sup>1</sup> Maestra en Docencia (M.D.), estudiante del Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 177-56-80. reberemis@ite.edu.mx

<sup>2</sup> Doctor, Investigador Titular, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 174-54-62 ext.115. Imendoza@uabc.edu.mx

ya que una vez que comienza la fase de operación se generan nuevos procesos no previstos y la relación dependiente de sus subprocesos exige su análisis desde la complejidad para encontrar estrategias factibles de resolución a los nuevos impactos sociales y ambientales generados (Morín, 2005).

De acuerdo con Garcés *et.al* (2008), las PTAR emiten gases que se mezclan y que al combinarse con las condiciones atmosféricas, generan olores que molestan a los habitantes cercanos de las PTAR. Adicionalmente los lodos residuales derivados del proceso de tratamiento representan un problema de manejo y disposición final que a su vez genera contaminación ambiental y suele implicar cerca del 45% del gasto anual para los operadores (Onyeche, 2010).

Debido a esto, la operación de las PTAR no sólo debe considerar el tratamiento de las aguas residuales para cumplir con la normatividad y que estas puedan ser descargadas al medio natural o ser reutilizadas, sino que se debe considerar la operación como un todo, es decir, incluyendo los problemas sociales y ambientales que se generan, con la finalidad de buscar y proponer posibles soluciones.

En México, en el 2011 se generaron 6,700 millones de m<sup>3</sup> de aguas residuales que fueron tratadas por las 2,029 PTAR con las que cuenta el país (CONAGUA, 2011). Como resultado del tratamiento de estas aguas, se generaron 640,000 toneladas de lodos residuales considerados como un residuo de manejo especial (LEGEPIR, 2007) los cuales representan un problema ambiental y social por los volúmenes que se generan y la cercanía de diferentes PTAR con centros habitacionales.

<sup>1</sup> Maestra en Docencia (M.D.), estudiante del Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 177-56-80. reberemis@ite.edu.mx

<sup>2</sup> Doctor, Investigador Titular, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 174-54-62 ext.115. Imendoza@uabc.edu.mx

En el caso particular de la ciudad de Ensenada, Baja California, México, se cuenta con 5 PTAR (El Gallo, El Sauzal, Maneadero, Noroeste y El Naranja) operadas por la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Ensenada (CESPE).

La PTAR “El Naranja” es la más grande de la ciudad e inició operaciones en 1999; su capacidad de tratamiento es de 500 litros por segundo (lps). El tipo de tratamiento con el que cuenta es biológico de lodos activados con aireación extendida. A su vez, la planta maneja 28,800 toneladas de lodos al año generados por todas las PTAR de la ciudad. El tratamiento que se le da a los lodos es un proceso de deshumidificación por medio de filtros banda, para reducir su humedad y evitar la proliferación de vectores al ser depositados en terrenos posteriores de la PTAR como relleno a cielo abierto.

El problema que se presenta actualmente con este sistema, es que de acuerdo con su diseño inicial, la PTAR “El Naranja” sería tan eficiente que no generaría emisiones de vapores o aerosoles, por lo que los olores serían mínimos. A su vez, se consideró que los lodos residuales generados serían mínimos y de gran calidad por lo que podrían ser empleados para producir composta que posteriormente sería donada a instituciones o habitantes de la zona como abono para plantas y jardines ornamentales.

En 1997, cuando la PTAR se comenzó a construir no existía población aledaña y los terrenos cercanos eran parcelas para siembra. Los habitantes actuales de la zona donde se encuentra la PTAR dicen haber adquirido los terrenos por parte de un ejidatario y no fueron informados sobre la construcción de la planta y tampoco se percataron de que esta existía (Rojas-Remis, 2012).

<sup>1</sup> Maestra en Docencia (M.D.), estudiante del Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 177-56-80. reberemis@ite.edu.mx

<sup>2</sup> Doctor, Investigador Titular, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 174-54-62 ext.115. Imendoza@uabc.edu.mx

Una vez que la PTAR comenzó operaciones en 1999, los habitantes se enteraron de que la construcción cercana era una PTAR por los olores que desprendía. Los habitantes desconocen que como resultado del tratamiento de las aguas residuales se generan lodos residuales, que también contribuyen a la emisión de estos olores (Rojas-Remis, 2012).

Por lo anterior, se realiza un análisis del sistema de la PTAR “El Naranja” con una visión de sistema complejo, con la finalidad de hacer recomendaciones y propuestas que sirvan como base para establecer proyectos y estrategias que vayan encaminadas a disminuir el impacto social y ambiental que implica la operación de esta planta.

## **1. MATERIALES Y METODOS.**

### **1.1 Análisis del sistema complejo.**

Con la finalidad de realizar el análisis del sistema complejo de la PTAR “El Naranja”, fue necesario conocer el proceso originalmente diseñado para poder elaborar el diagrama de los procesos que constituyen el sistema (Figura 1). CESPE proporcionó la información necesaria sobre los pormenores del diseño de la propuesta de construcción ganadora y sobre la cual se realizaron los trabajos de construcción y plan de operación.

Figura 1. Diagrama del proceso de tratamiento de aguas residuales diseñado y sobre el cual se realizó la construcción y el plan de operación de la PTAR “El Naranja”. Fuente: Elaboración propia, a partir de información proporcionada por CESPE (2010).

<sup>1</sup> Maestra en Docencia (M.D.), estudiante del Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 177-56-80. reberemis@ite.edu.mx

<sup>2</sup> Doctor, Investigador Titular, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 174-54-62 ext.115. Imendoza@uabc.edu.mx

Una vez realizado el diagrama del sistema originalmente diseñado se realizó una visita a las instalaciones de la PTAR “El Naranja” con la finalidad de determinar el proceso del sistema en operación. Lo anterior para realizar una comparación entre el sistema diseñado y la operación del mismo. Dicha comparación se considera indispensable ya que arroja información sobre los nuevos procesos no visualizados en la parte de diseño original del sistema.

Con base en la información recolectada en la visita de campo, se elaboró el diagrama de los procesos que constituyen el sistema en operación actual (Figura 2).

Figura 2. Diagrama del sistema en operación que se realiza actualmente en la PTAR “El Naranja” y cuyo proceso es el mismo desde que inició operaciones en 1999. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se realizó la comparación de los diagramas permitiendo determinar las externalidades negativas y positivas del sistema (Tabla 1). Se considera una externalidad negativa al producto resultante de un proceso o subproceso del sistema que genera impactos negativos y que, dependiendo de su naturaleza, puede ocasionar problemas sociales y ambientales. Asimismo, se considera una externalidad positiva a aquellos productos que pueden ser aprovechados en beneficio de la comunidad y del medio ambiente (Escofet, 2010).

<sup>1</sup> Maestra en Docencia (M.D.), estudiante del Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 177-56-80. reberemis@ite.edu.mx

<sup>2</sup> Doctor, Investigador Titular, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 174-54-62 ext.115. Imendoza@uabc.edu.mx

Tabla 1. Externalidades negativas y positivas determinadas a partir de la comparación entre el diagrama del proceso de tratamiento de aguas residuales diseñado y el diagrama del sistema en operación.

<b>Externalidad Negativa</b>	<b>Sistema diseñado</b>	<b>Sistema en operación</b>
Gases y olores desprendidos por el tratamiento de las aguas residuales.	En el diseño de la PTAR la eficiencia de los procesos de tratamiento garantizaba que no se desprenderían olores nocivos.	La eficiencia del tratamiento de las aguas residuales no es la diseñada; la PTAR opera a una capacidad promedio diaria de 380 lps durante todo el año; por lo que se desprenden olores y gases de efecto invernadero (CO <sub>2</sub> y CH <sub>4</sub> ).
Reincorporación del agua tratada al mar.	El agua tratada cumple con la normatividad para poder ser dispuesta en el mar, sin tener consecuencias ambientales.	El agua tratada se reincorpora al mar, sin embargo esta puede ser utilizada para el riego de jardines públicos o el riego de cultivos agrícolas, hasta el momento sigue disponiéndose en el mar sin ser aprovechada.
Lodos residuales depositados como relleno a cielo abierto.	El volumen de lodos residuales generados sería pequeño por lo que el 100% sería utilizado para realizar composta sin que existiera un residuo sólido que disponer.	El volumen de lodos residuales generados es mayor al diseñado y la PTAR "El Naranja" también maneja los lodos generados por las otras 4 PTAR de la ciudad (28,800 ton/año). El 0.01% se utiliza para elaborar composta, el resto son deshumidificados mediante filtros banda y estos son dispuestos como relleno a cielo abierto, de la descomposición se desprenden gases de efecto invernadero (CO <sub>2</sub> y CH <sub>4</sub> ).
<b>Externalidad Positiva</b>	<b>Sistema diseñado</b>	<b>Sistema en operación</b>
Agua tratada	Es un beneficio ambiental que se trate el agua, ya que esta cumple con la normatividad y puede ser dispuesta en el mar sin que genere un impacto ambiental negativo.	El agua tratada cumple con la normatividad aplicable, por lo que al ser dispuesta en el mar no genera un impacto ambiental negativo, adicionalmente el agua residual tratada puede utilizarse para irrigación de productos agrícolas, no aptos para consumo humano o para la recarga artificial de acuíferos aprovechando un recurso escaso.
Composteo de lodos residuales	Se planteó el composteo de lodos residuales como un método de estabilización (que pierda sus propiedades contaminantes).	Se sigue realizando el composteo de los lodos, utilizándolo como método de estabilización. La composta se regala a instituciones o particulares con el compromiso de ser utilizado en plantas de ornato.

Fuente: Elaboración propia, a partir de García (2006).

<sup>1</sup> Maestra en Docencia (M.D.), estudiante del Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 177-56-80. reberemis@ite.edu.mx

<sup>2</sup> Doctor, Investigador Titular, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 174-54-62 ext.115. Imendoza@uabc.edu.mx

Al evaluar las externalidades negativas y positivas del sistema se pueden establecer las condiciones observadas, con la finalidad de determinar las condiciones deseadas.

La condición observada consiste en describir detalladamente qué condición se observa en el sistema complejo con la finalidad de tener una visión amplia sobre la interacción entre sus elementos y de esta forma poder desarrollar la condición deseada, es decir, el funcionamiento ideal del sistema en donde no existan externalidades negativas o estas se minimicen y las externalidades positivas se vean incrementadas (Suárez-Vásquez, 1998).

La necesidad de visualizar la condición observada para desarrollar la condición deseada radica en que solamente visualizando una idealidad del sistema es posible plantear estrategias que permitan eliminar o minimizar los problemas detectados en el sistema.

Para desarrollar la condición observada se tomó como base la información recabada durante la visita de campo realizada a la CESPE y sobre la cual se elaboró el diagrama del sistema en operación que se realiza actualmente en la PTAR “El Naranja” (Figura 2). La condición deseada se desarrolló tomando como base la idealidad del sistema, considerando que un sistema ideal no contamina, no genera residuos, no necesita de un esfuerzo humano y no implica un gasto financiero. Cabe mencionar que los sistemas ideales no existen, pero que si se visualizan puede tratar de llegarse a ellos y tener un sistema equilibrado, donde los impactos sean lo mínimo posible (Coronado *et.al*, 2005).

<sup>1</sup> Maestra en Docencia (M.D.), estudiante del Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 177-56-80. reberemis@ite.edu.mx

<sup>2</sup> Doctor, Investigador Titular, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 174-54-62 ext.115. Imendoza@uabc.edu.mx

## 1.2 Definición de actores del sistema complejo.

Como parte del análisis del sistema complejo es necesario realizar la identificación de actores del sistema, es decir, determinar las partes involucradas tanto en la operación del sistema como los que reciben las externalidades positivas o negativas (García, 2006). De esta forma se puede conocer las acciones que los actores hacen o dejan de hacer, para poder transitar de la condición observada a la condición deseada.

Para el sistema complejo de la PTAR “El Naranja” se identificaron como actores los siguientes:

- El medio ambiente (atmósfera y suelo): ya que el tratamiento de las aguas residuales desprenden gases y olores que tienen un impacto ambiental negativo.
- Habitantes cercanos a la PTAR: debido a que se ven afectados por los olores los cuales identifican como perjudiciales para su vida cotidiana.
- Beneficiarios del reuso del agua tratada: El agua tratada puede ser utilizada para el riego agrícola por lo que los agricultores están dispuestos a reutilizar esta agua en sus cultivos.
- El sector académico: Puesto que diversas instituciones de educación superior y de investigación han realizado proyectos encaminados al aprovechamiento del agua residual, así como en el desarrollo de propuestas para el manejo de lodos residuales.
- Gobierno estatal (CESPE): Ya que es el operador de las PTAR de la ciudad, incluyendo “El Naranja”.

<sup>1</sup> Maestra en Docencia (M.D.), estudiante del Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 177-56-80. reberemis@ite.edu.mx

<sup>2</sup> Doctor, Investigador Titular, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 174-54-62 ext.115. Imendoza@uabc.edu.mx

- La Normatividad que dicta el Gobierno Federal: La cual indica los parámetros de tratamiento y calidad de agua tratada y lodos residuales para que estos puedan ser aprovechados o depositados con la finalidad de minimizar los riesgos ambientales o sociales.

Gracias a la identificación de los actores del sistema complejo fue posible desarrollar las acciones que cada uno hace o deja de hacer y poder realizar las propuestas y recomendaciones que es necesario llevar a cabo para contar con un sistema “ideal” o lo más cercano posible a este.

### **1.3 Entrevistas a los habitantes de la zona.**

La PTAR “El Naranja” se encuentra ubicada en la zona habitacional Praderas del Ciprés II, en Ensenada, B.C; según Renner (2002) los residentes mayormente influenciados por la operación de la planta son los que se encuentran aproximadamente a 1 km a la redonda (zona de influencia). De acuerdo con estadísticas del INEGI (2012), la zona de influencia cuenta con 121 casas habitación con un total de 436 habitantes (Figura 3).

Figura 3. Fotografía aérea de la ubicación de la zona de influencia que abarca 1 km a la redonda de la PTAR “El Naranja”. Fuente: Elaboración propia, a partir de Google earth. (2012).

Para poder conocer la opinión de los habitantes de la zona de influencia e incluir la componente social en el análisis del sistema complejo. El tipo de muestreo utilizado fue el intencional o de conveniencia, ya que se entrevistó a los habitantes de la zona

<sup>1</sup> Maestra en Docencia (M.D.), estudiante del Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 177-56-80. reberemis@ite.edu.mx

<sup>2</sup> Doctor, Investigador Titular, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 174-54-62 ext.115. Imendoza@uabc.edu.mx

de influencia que accedieron a ser entrevistados (13 habitantes); la entrevista fue cualitativa o abierta y se realizó entre los meses de febrero a octubre de 2012; la duración promedio de las entrevistas fue de 25 minutos.

Adicionalmente se llevaron a cabo dos entrevistas guiadas con expertos de la CESPE, con la finalidad de poder contrastar las opiniones de los habitantes y de los administradores de la PTAR “El Naranjo”.

Posteriormente se realizó el análisis de las entrevistas para poder elaborar el cuadro de actores (Tabla 2) y poder tener el panorama completo de la condición observada y así poder determinar la estrategias para transitar a la condición deseada.

## **2. RESULTADOS**

### **2.1 Análisis de las externalidades negativas y positivas.**

#### **2.1.1 Externalidades negativas**

Los gases que se desprenden del tratamiento de las aguas residuales emiten olores que han ocasionado malestar entre los habitantes cercanos a la PTAR (Rojas-Remis, 2012). Además, los gases producidos contribuyen al efecto invernadero por lo que su emisión a la atmósfera genera un impacto ambiental adverso importante.

Los lodos residuales generados representan un problema financiero para la PTAR “El Naranjo”, ya que los gastos anuales por manejo representan el 47% de sus gastos operativos.

Adicionalmente los lodos representan un problema ambiental, debido a que aunque se procesan en filtros banda para deshumidificarlos y se evite la proliferación de

<sup>1</sup> Maestra en Docencia (M.D.), estudiante del Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 177-56-80. reberemis@ite.edu.mx

<sup>2</sup> Doctor, Investigador Titular, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 174-54-62 ext.115. Imendoza@uabc.edu.mx

insectos y la generación de lixiviados, son depositados como relleno a cielo abierto en terrenos posteriores de la planta, provocando la emisión a la atmosfera de gases de efecto invernadero ( $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$ ) y el desprendimiento de olores.

Los lodos residuales pueden ser reutilizados como fertilizante agrícola, mejorador de suelos y como materia prima para la producción de energía eléctrica, mediante la utilización de digestores anaerobios.

En cuanto al agua tratada (aunque el que se trate se considera una externalidad positiva) al ser descargada al mar no está siendo aprovechada para la irrigación de cultivos agrícolas no aptos para consumo humano, para la recarga artificial de acuíferos aprovechando un recurso escaso o para el riego de los jardines de edificios públicos.

### **2.1.2 Externalidades positivas**

El agua tratada que genera la PTAR “El Naranjo” cumple con la normatividad aplicable, por lo que puede ser reutilizada para el riego de cultivos agrícolas, jardines ornamentales e incluso tiene el potencial para ser empleada para la infiltración de mantos acuíferos. De esta manera, habría una disminución en el consumo de agua “blanca”.

Otra externalidad positiva es el composteo de los lodos residuales, ya que estos tienen un gran contenido de materia orgánica por lo que pueden utilizarse como materia prima para la elaboración de composta. El composteo que se realiza en la PTAR “El Naranjo” reutiliza cerca del 0.01% de lodos residuales generados anualmente, a los cuales se les añade aserrín procedente de los residuos de madererías, por lo que también, el composteo permite reutilizar este tipo de residuo. La composta producida en

<sup>1</sup> Maestra en Docencia (M.D.), estudiante del Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 177-56-80. reberemis@ite.edu.mx

<sup>2</sup> Doctor, Investigador Titular, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 174-54-62 ext.115. Imendoza@uabc.edu.mx

la PTAR se obsequia a instituciones educativas y a quien lo solicite para su utilización como fertilizante para plantas ornamentales.

## **2.2 De la condición observada a la condición deseada.**

### **2.2.1 Condición observada.**

La condición observada del tratamiento de las aguas residuales consiste en recolectar las aguas residuales en el cárcamo de bombeo para quitar el exceso de sólidos grandes (plásticos, madera, arenas, gravas, etc.), evitando daño al equipo de bombeo pero generando emisión de olores y residuos sólidos. Posteriormente, el agua es bombeada a la PTAR “El Naranja” donde el agua es tratada y clorada (para desinfección). Durante el tratamiento existe emanación de olores y gases de efecto invernadero que generan un impacto ambiental y social negativo. El agua tratada es descargada al mar, mediante una tubería que va desde la PTAR hasta la zona costera adyacente a la descarga del arroyo El Gallo.

La condición observada de la generación y manejo de los lodos residuales, es que los habitantes cercanos a la PTAR “El Naranja”, desconocen su existencia, únicamente el 0.01% de los lodos generados son utilizados para elaborar composta, el resto son dispuestos en terrenos posteriores a la PTAR como relleno a cielo abierto, emitiendo olores y gases de efecto invernadero ( $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$ ) contribuyendo a la contaminación atmosférica y al descontento de los habitantes de la zona.

### **2.2.2 Condición deseada.**

La condición deseada del tratamiento de las aguas residuales incluiría la recolección de las aguas residuales en el cárcamo de bombeo, para quitar el exceso de

<sup>1</sup> Maestra en Docencia (M.D.), estudiante del Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 177-56-80. reberemis@ite.edu.mx

<sup>2</sup> Doctor, Investigador Titular, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 174-54-62 ext.115. Imendoza@uabc.edu.mx

sólidos grandes (plásticos, madera, arenas, gravas, etc.) siendo el material removido y los olores eliminados adecuadamente. Posteriormente, el agua residual es bombeada a la PTAR “El Naranjo” donde es tratada y clorada (para desinfección). Los olores y gases de efecto invernadero se ven disminuidos por el funcionamiento eficiente de los equipos utilizados para su tratamiento. El agua tratada es reutilizada para el riego de cultivos agrícolas, jardines públicos o para la recarga artificial de acuíferos locales.

Los lodos residuales son tratados y estabilizados mediante digestores anaerobios, colocados en los lodos activados y al final del proceso con la finalidad de utilizar el gas como combustible para la generación de energía eléctrica. Lo anterior reduciría la contaminación atmosférica y el descontento de los habitantes de la zona (Rojas-Remis, 2012). La CESPE al utilizar los lodos como materia prima para producir su propia energía tendría un ahorro anual del 65% en los gastos ocasionados por consumo de energía eléctrica (Rojas-Remis, 2013).

Adicionalmente, los habitantes cercanos a la PTAR conocen la existencia de los lodos residuales y saben el beneficio de ser reutilizados como materia prima para la generación de energía. Los lodos (biosólidos) resultantes de la digestión anaerobia (biosólidos) se utilizan para composteo, fertilizante orgánico para cultivos agrícolas o jardines ornamentales.

### **2.2.3 Análisis de los actores del sistema complejo de la PTAR “El Naranjo”.**

El análisis de las acciones que realizan los actores del sistema permite conocer las externalidades positivas y negativas de su influencia sobre dicho sistema, para que de esta forma se puedan identificar las acciones que se deben realizar con la finalidad

<sup>1</sup> Maestra en Docencia (M.D.), estudiante del Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 177-56-80. reberemis@ite.edu.mx

<sup>2</sup> Doctor, Investigador Titular, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 174-54-62 ext.115. Imendoza@uabc.edu.mx

de ir de la condición observada a la condición deseada, y de esta forma poder emitir recomendaciones y propuestas que permitan disminuir los impactos ambientales y sociales de la PTAR “El Naranja” (Tabla 2).

#### **2.2.4 Percepción de los habitantes de la zona de influencia y de CESPE.**

Los administradores de la PTAR (CESPE), determinaron que la ubicación óptima de la PTAR “El Naranja” es donde se encuentra actualmente, pues se encontraba en una zona rural, lejos de zonas habitacionales y esto evitaría molestias; sin embargo el dueño de los terrenos aledaños a la PTAR fraccionó y vendió los terrenos, quedando casas habitación alrededor de la PTAR.

La CESPE no tiene influencia alguna sobre el desarrollo urbano, por lo que no puede evitar los asentamientos alrededor de la PTAR, sin embargo, aunque existen casas habitación cercanas, consideran que la operación de la planta no genera molestias o daños a los habitantes de la zona.

Por otro lado, los habitantes de la zona dicen haber desconocido la cercanía con una PTAR en el momento de la adquisición de los terrenos y que se percataron de su existencia, una vez que habitaron el lugar. Desconocen el sistema de operación de la planta, así como los residuos que genera.

Los habitantes consideran que el vivir cerca de una PTAR no les genera beneficios, sino por el contrario, tiene efectos nocivos para su salud, destacando dolores de cabeza e irritación en garganta y ojos.

Es importante destacar que aunque la percepción entre los habitantes de la zona y la CESPE es distinta, existe una percepción conjunta, la cual considera que es

<sup>1</sup> Maestra en Docencia (M.D.), estudiante del Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 177-56-80. reberemis@ite.edu.mx

<sup>2</sup> Doctor, Investigador Titular, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 174-54-62 ext.115. Imendoza@uabc.edu.mx

benéfico el tratamiento de las aguas residuales, así como de sus lodos y que están a favor de la realización de proyectos de inversión con un beneficio social y ambiental.

Tabla 2. Acciones de los actores del sistema de tratamiento de aguas residuales y de la generación de lodos residuales con la finalidad de ir de la condición observada a la condición deseada.

Actores	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales		Lodos Residuales	
<b>Medio Ambiente (Atmósfera y suelo)</b>	<p><b><u>Externalidad positiva</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>El agua residual es tratada con la finalidad de evitar la contaminación que pudiera presentarse al descargar el agua sin tratamiento en la zona costera.</li> </ul>	<p><b><u>Externalidad negativa</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>En el diseño original no se contempló la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero que se generarían como resultado del tratamiento de aguas residuales.               <ul style="list-style-type: none"> <li>No se ha contemplado un método de disminución de emisiones.</li> <li>La emisión de olores contamina el aire que es respirado por habitantes cercanos, causando su molestia (Rojas-Remis, 2012).</li> </ul> </li> </ul>	<p><b><u>Externalidad positiva</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>El 0.1% de los lodos residuales son convertidos en composta, lo que sirve como abono para jardines ornamentales de instituciones públicas.</li> </ul>	<p><b><u>Externalidad negativa</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Emisión de gases de efecto invernadero (metano y dióxido de carbono) por ser depositados como relleno a cielo abierto.               <ul style="list-style-type: none"> <li>Contaminación del subsuelo por escurrimientos.</li> <li>La emisión de olores contamina el aire que es respirado por habitantes cercanos, causando molestia (Rojas-Remis, 2012).</li> <li>Se genera gran volumen de lodos residuales, por lo que tienen que ser depositados como relleno, en terrenos posteriores de la PTAR.</li> </ul> </li> </ul>
<b>Habitantes cercanos a la PTAR</b>	<p><b><u>Externalidad positiva</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Consideran benéfico que el gobierno realice el tratamiento de las aguas residuales, para evitar contaminación en la zona costera.</li> </ul>	<p><b><u>Externalidad negativa</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Señalan que ellos se encontraban en la zona, previo a su construcción y nunca se les dio aviso sobre su inicio de operaciones</li> </ul>	<p><b><u>Externalidad positiva</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Están de acuerdo con nuevas construcciones siempre y cuando se les informe sobre su funcionamiento y riesgos potenciales</li> </ul>	<p><b><u>Externalidad negativa</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Desconocen la existencia de los lodos residuales, cómo se manejan y sus posibles aprovechamientos.</li> </ul>

<sup>1</sup> Maestra en Docencia (M.D.), estudiante del Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 177-56-80. reberemis@ite.edu.mx

<sup>2</sup> Doctor, Investigador Titular, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 174-54-62 ext.115. Imendoza@uabc.edu.mx

		<p>(Rojas-Remis, 2012).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se han inconformado por los olores que desprende la PTAR.</li> <li>• Aun no cuentan con drenaje y tienen una toma comunal de agua potable (Rojas-Remis, 2012).</li> </ul>	<p>(Rojas-Remis, 2012).</p>	
<b>Beneficiarios del reúso del agua tratada (agricultores)</b>	<p><b><u>Externalidad positiva</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• CESPE invirtió en la colocación de tubería, para llevar el agua tratada de la PTAR “El Naranjo” a un tanque receptor ubicado en el área de cultivo de Maneadero para ser utilizada por los agricultores en el riego de sus parcelas.</li> <li>• Están de acuerdo con la utilización del agua tratada para el riego de sus parcelas.</li> </ul>	<p><b><u>Externalidad negativa</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Han tratado de llegar a acuerdos sobre el precio del agua tratada para que se utilice para riego de parcelas agrícolas en el Valle de Maneadero, al no lograrlo, el agua tratada sigue sin aprovecharse y la infraestructura instalada por la CESPE para su distribución en el Valle continúa siendo desaprovechada</li> </ul>	<p><b><u>Externalidad positiva</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• El 0.1% de los lodos residuales es aprovechado para hacer composta que es regalada a instituciones públicas y empresas como abono orgánico para jardines ornamentales. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Existen beneficios (reducción de olores, reducción de las emisiones de gases a la atmosfera y generación de energía eléctrica sustentable) si los lodos son digeridos anaeróbicamente.</li> </ul> </li> </ul>	<p><b><u>Externalidad negativa</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Los habitantes de la zona desconocen los beneficios de aprovechar los lodos residuales para la generación de energía eléctrica.</li> <li>• CESPE comenta que hace falta la realización de proyectos de inversión que contemple el aprovechamiento de los lodos residuales para disminuir el volumen y por lo tanto los gastos generados por manejo.</li> </ul>
<b>Sector Académico</b>	<p><b><u>Externalidad positiva</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pueden realizar investigaciones sobre calidad del agua, para ampliar la gama de los tipos de aprovechamiento.</li> <li>• Facilitador entre gobierno y agricultores de Maneadero para la aceptación de utilizar</li> </ul>	<p><b><u>Externalidad negativa</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La CESPE tiene presupuestos pre asignados por lo que se le dificulta realizar grandes inversiones para nuevas construcciones o adquisición de tecnología de punta (Rojas-Remis,</li> </ul>	<p><b><u>Externalidad positiva</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Proyecto de investigación sobre sistema autosustentable para el aprovechamiento de lodos residuales con la finalidad de producir energía eléctrica y cuyos residuos (lodos</li> </ul>	<p><b><u>Externalidad negativa</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La CESPE necesita evaluar los proyectos de inversión con la finalidad de poder solicitar el recurso financiero necesario para su implementación y puesta en marcha (Rojas-Remis,</li> </ul>

<sup>1</sup> Maestra en Docencia (M.D.), estudiante del Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 177-56-80. reberemis@ite.edu.mx

<sup>2</sup> Doctor, Investigador Titular, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 174-54-62 ext.115. Imendoza@uabc.edu.mx

	<p>el agua tratada en sus cultivos.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Investigaciones sobre la utilización de nueva tecnología para mejorar la eficiencia del funcionamiento de la planta de tratamiento.</li> </ul>	<p>2012).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hace falta personal en la CESPE que se encuentre capacitado para el manejo de equipo y tecnologías de vanguardia por lo que es necesario invertir en capacitación y contratación de nuevo personal (Rojas-Remis, 2012), con la finalidad de integrar en sus planes y programas de desarrollo los proyectos generados por el sector académico.</li> </ul>	<p>digeridos) pueden ser utilizados como fertilizantes agrícolas, mejorador de suelos y composteo.</p>	<p>2012).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La CESPE necesita contar con personal especializado en el manejo de sistemas de digestión anaerobia y plantas de biogás, así como capacitar a sus técnicos, con la finalidad de integrar en sus planes y programas de desarrollo la implementación de este tipo de proyectos.</li> </ul>
<p><b>Gobierno Estatal (CESPE)</b></p>	<p><b><u>Externalidad positiva</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La construcción de la planta se realizó antes de que se vendieran los terrenos aledaños, se eligió esa ubicación debido a que no existía población urbana alrededor.</li> <li>• Construcción de un tanque receptor y sistema de bombeo de agua tratada para agricultores del valle agrícola de Maneadero.</li> <li>• CESPE puede buscar apoyos de financiamiento con otras instituciones gubernamentales con la finalidad de llevar a cabo proyectos de inversión</li> </ul>	<p><b><u>Externalidad negativa</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• El gobierno estatal contrató a una empresa para que realizara el diseño del sistema de tratamiento de aguas residuales; dicha empresa garantizó la eficiencia del sistema y la disminución de las emisiones de gases y olores generados por la operación del sistema. Sin embargo, una vez en operación no funcionó como se planteó en el diseño.</li> <li>• CESPE no lleva a cabo un control y medición de la emisión de olores y gases, por el costo</li> </ul>	<p><b><u>Externalidad positiva</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La CESPE está dispuesta a recibir propuestas de proyectos de inversión que ayuden al tratamiento de lodos residuales, con la finalidad de disminuir su volumen y contribuir a la reducción de los gastos operativos de la PTAR “El Naranja”.</li> </ul>	<p><b><u>Externalidad negativa</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• El diseño original de la planta de tratamiento generaría una mínima cantidad de lodos residuales, que serían estabilizados y podrían utilizarse para hacer composta. Sin embargo, una vez en operación, no funcionó como se planteó en el diseño.</li> <li>• En la operación del sistema se genera un elevado volumen de lodos residuales, por lo que incrementa los gastos operativos de la PTAR.</li> <li>• En la PTAR “El Naranja” se reciben</li> </ul>

<sup>1</sup> Maestra en Docencia (M.D.), estudiante del Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 177-56-80. reberemis@ite.edu.mx

<sup>2</sup> Doctor, Investigador Titular, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 174-54-62 ext.115. Imendoza@uabc.edu.mx

	encaminados a la reducción de emisiones.	elevado del equipo y falta de personal experto en el área. <ul style="list-style-type: none"> <li>• El agua tratada es descargada al mar mediante tubería, sin ser reutilizada en riego de jardines ornamentales o riego de cultivos agrícolas.</li> </ul>		los lodos residuales de las otras 4 PTAR de la ciudad. <ul style="list-style-type: none"> <li>• CESPE conoce las consecuencias del depósito de lodos residuales a cielo abierto y depende de autorización de fondos de inversión para la implementación de proyectos que permitan disminuir los gastos operativos por manejo y el impacto ambiental generado.</li> </ul>
<b>Normatividad (Gobierno Federal)</b>	<p><b><u>Externalidad positiva</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se cuenta con normatividad para el aprovechamiento del agua residual tratada en irrigación de productos agrícolas o recarga de acuíferos</li> <li>• Se cuenta con normatividad para la regulación de la calidad del agua tratada para ser descargada al mar.</li> </ul>	<p><b><u>Externalidad negativa</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hace falta normatividad para regular las emisiones de olores y gases de PTAR.</li> </ul>	<p><b><u>Externalidad positiva</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Existe normatividad para determinación de la calidad de lodos residuales y su aprovechamiento. <ul style="list-style-type: none"> <li>• El gobierno puede instrumentar mecanismos de supervisión, medición y control para dar cumplimiento a la normatividad y que se realice el aprovechamiento adecuado de lodos residuales, con la finalidad de disminuir las emisiones al ambiente.</li> </ul> </li> </ul>	<p><b><u>Externalidad negativa</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hace falta normatividad sobre consideraciones para el manejo y disposición de lodos residuales (se basa en el reglamento de residuos sólidos urbanos, considerado como de manejo especial). <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hace falta normatividad para regular las emisiones de olores y gases producidos por los lodos residuales.</li> <li>• Hace falta normatividad para la construcción y operación de sistemas de tratamiento y estabilización de lodos.</li> </ul> </li> </ul>

Fuente: Elaboración propia.

<sup>1</sup> Maestra en Docencia (M.D.), estudiante del Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 177-56-80. reberemis@ite.edu.mx

<sup>2</sup> Doctor, Investigador Titular, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 174-54-62 ext.115. Imendoza@uabc.edu.mx

## CONCLUSIÓN

La utilización de los sistemas complejos para analizar el sistema y los procesos de las PTAR es de gran utilidad pues permite visualizar todos los componentes como un todo y encontrar posibles soluciones a problemas generados por la generación interna de nuevos procesos.

En el caso del análisis como sistema complejo de la PTAR “El Naranja” fue posible detectar los nuevos procesos que no se visualizaron en el diseño original y de esta forma determinar la condición observada y deseada, para que las acciones de los actores involucrados puedan encaminarse a llegar a la condición deseada o la “ideal”.

Las acciones sugeridas para transitar de la condición observada a la deseada son:

- Realizar acuerdos entre el Gobierno Estatal (CESPE) y el sector académico para la realización de investigación y desarrollo con la finalidad de incentivar la implementación de la tecnología y la aplicación de los conocimientos generados para minimizar el impacto ambiental y los efectos nocivos.
- Que los tres niveles de gobierno gestionen los recursos necesarios para la construcción de infraestructura necesaria para causar un mínimo de daño al medio ambiente y a la salud pública
- Ampliar las regulaciones y la normatividad aplicada con la finalidad de detallar todos los componentes del sistema y que estos fuesen de carácter obligatorio. Asimismo, implementar la supervisión del cumplimiento por parte de actores externos que permitan transparencia y garanticen la aplicación de las normas y reglamentos.

<sup>1</sup> Maestra en Docencia (M.D.), estudiante del Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 177-56-80. reberemis@ite.edu.mx

<sup>2</sup> Doctor, Investigador Titular, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 174-54-62 ext.115. Imendoza@uabc.edu.mx

- Involucrar a los habitantes cercanos a la PTAR mediante diversas estrategias de comunicación que les permitan conocer el sistema como un todo, sus componentes y que puedan opinar sobre los nuevos proyectos y participar en las soluciones.
- Implementación de tecnología y sistemas autosustentables y de aprovechamiento de lodos residuales para producir energía eléctrica sustentable y que los lodos digeridos puedan ser utilizados como fertilizantes, mejorador de suelos y composta (para ser regalados o vendidos a habitantes de la zona, instituciones y agricultores).
- Llegar a un acuerdo razonable entre Gobierno y Agricultores para la utilización de agua tratada para el riego de cultivos en el valle de Maneadero.
- Buscar apoyos económicos para la implementación de sistemas que reduzcan las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera.

## **AGRADECIMIENTOS**

Se agradece a la Universidad Autónoma de Baja California por su apoyo académico, a CESPE por la cooperación para la obtención de la información necesaria para la realización del análisis y al CONACYT por el apoyo de beca para el desarrollo del proyecto de tesis.

## **REFERENCIAS**

Comisión Estatal de Servicio Públicos de Ensenada CESPE. (Comunicación personal, 10 de octubre, 2010).

<sup>1</sup> Maestra en Docencia (M.D.), estudiante del Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 177-56-80. reberemis@ite.edu.mx

<sup>2</sup> Doctor, Investigador Titular, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 174-54-62 ext.115. Imendoza@uabc.edu.mx

- Coronado, Margarito, Oropeza, Rafael & Rico Enrique. (2005). *TRIZ, la metodología más moderna para inventar o innovar tecnológicamente de manera sistémica*. México, D.F: Panorama Editorial, S.A. de C.V., 145 p.
- Escofet, Ana María. (2010). *Reflexiones sobre la Complejidad*. Congreso Nacional Naturaleza y Sociedad. Tlaxcala, México. 17-19 noviembre.
- Garcés, Juan, Morales, Juan & König, Hernán. (2008). *Olores en Plantas de Tratamiento de aguas servidas: Un problema ambiental a resolver con criterios de ciencia posnormal*. XXXI Congreso interamericano de ingeniería sanitaria y ambiental ALDIS. Chile. 12-15 Octubre.
- García, Rolando. (2006). *Sistemas Complejos, conceptos, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria*. Barcelona: GEDISA Editorial, 200 p.
- Instituto nacional de estadística y geografía. (2012). Estadísticas y censo poblacional. Recuperado Febrero, 2012, desde <http://www.inegi.org.mx/>
- Morín, Edgar. (2005). *Introducción al pensamiento complejo*. España: GEDISA Editorial, 167 p.
- Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Diario oficial de la federación L.E.G.E.P.I.R. (2007).
- Onyeche, Theodore. (2010). *Economic benefits of low pressure sludge homogenization for wastewater treatment plants*. CUTEC-Institute GMBH, 1, 417-422.
- Renner, Rebecca. (2002, 1 de septiembre). NRC targets pathogens in sludge for research. *Environmental Science & Technology*. Recuperado de <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es022404s>

<sup>1</sup> Maestra en Docencia (M.D.), estudiante del Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 177-56-80. [reberemis@ite.edu.mx](mailto:reberemis@ite.edu.mx)

<sup>2</sup> Doctor, Investigador Titular, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 174-54-62 ext.115. [Imendoza@uabc.edu.mx](mailto:Imendoza@uabc.edu.mx)

Rojas-Remis, Rebeca (2012). Entrevistas realizadas a habitantes de la colonia Praderas del Ciprés II. Trabajo no publicado. Proyecto de tesis doctoral, Universidad Autónoma de Baja California.

Rojas-Remis, Rebeca (2013). Análisis del potencial de producción de energía eléctrica, utilizando los lodos residuales de la PTAR “El Naranja” como materia prima. Trabajo no publicado. Proyecto de tesis doctoral, Universidad Autónoma de Baja California.

Suárez Vásquez, A. 1998. *Oportunidades y amenazas para la implementación de las políticas ambientales de protección en el corredor costero Tijuana-Ensenada; área Puerto Nuevo–La Misión*. Tesis de Maestría en Administración Integral del Ambiente. COLEF-CICESE. Tijuana-Ensenada, Baja California.

<sup>1</sup> Maestra en Docencia (M.D.), estudiante del Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 177-56-80. reberemis@ite.edu.mx

<sup>2</sup> Doctor, Investigador Titular, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 174-54-62 ext.115. Imendoza@uabc.edu.mx

# **GESTIÓN SUSTENTABLE DE LODOS RESIDUALES: PROPUESTA PARA LA RECUPERACIÓN ENERGÉTICA Y REDUCCIÓN DE IMPACTOS.**

<sup>1</sup>Rebeca Rojas Remis, <sup>2</sup>Leopoldo G. Mendoza Espinosa, <sup>3</sup>Maria del Carmen Alcalá Álvarez.

<sup>1</sup> Maestra en Docencia (M.D.), estudiante del Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 177-56-80. reberemis@ite.edu.mx

<sup>2</sup> Doctor, Investigador Titular, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Km 107 Carretera Tijuana-Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México, Tel: (646) 174-54-62 ext.115. lmendoza@uabc.edu.mx

<sup>3</sup> Doctora, Profesora-Investigadora, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Calzada Universidad 14418 Parque Industrial Internacional Tijuana, C.P. 22390, Tijuana, Baja California, México, Tel: (664) 979-75-05 ext.54725. alcalá@uabc.edu.mx

## **RESUMEN**

El aumento poblacional en México ha hecho que se incremente la red de drenaje y la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), aumentando la generación de lodos residuales. En México para el 2011 las 2,029 PTAR públicas generaron 640,000 toneladas de lodos. Se espera que para el 2030 se incremente a 880,000 toneladas por año (CONAGUA, 2011). Los lodos residuales no sólo representan un problema ambiental y social, también representan un problema de manejo para los administradores de las PTAR, ya que se estima que el 45% de sus gastos anuales son usados para su manejo y disposición (Onyeche, 2010). En el caso de la ciudad de Ensenada, Baja California, la PTAR “El Naranja”, operada por la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Ensenada (CESPE), maneja 28,800 toneladas de lodos anualmente. Por lo anterior, se realiza un análisis para la instalación de un sistema de digestión anaerobia con recuperación energética, que colabore en la gestión sustentable de estos lodos. Para evaluar los beneficios que representa la incorporación de este tipo de sistema a las PTAR, se utilizó el análisis de ciclo de vida (ACV) y el análisis costo-impacto (ACI) con el fin de determinar su costo por unidad de impacto. Como resultado, se obtuvo que la incorporación del sistema propuesto representa un ahorro anual para CESPE del 59% en gasto energético, un 27% en gasto por manejo de lodos, y existe una disminución del 67% en el impacto ambiental (gases de efecto invernadero-GEI, residuos y consumo energético) que genera el manejo actual de estos lodos.

## ABSTRACT

Population growth in Mexico has led to an increase in sewage collection, and the construction of wastewater treatment plants (WWTP) resulting in the increase in sludge that requires treatment. In Mexico in 2011, the 2029 operating WWTP generated 640,000 tons of sludge and the volume is expected to increase to 880,000 tons per year by 2030 (CONAGUA, 2011). Sewage sludge not only represent an environmental and social problem due to the pollution they generate, but they also represent a management problem for WWTP operators; an estimated 45% of its annual expenditure is used for management and disposal of sludge (Onyeche, 2010). In the particular case of the city of Ensenada, Baja California, the WWTP "El Naranjo", operated by the Comision Estatal de Servicios Publicos de Ensenada (CESPE), handles 28,800 tons of sewage sludge per year. Therefore, an analysis of the installation of an anaerobic digestion system with energy recovery is performed to assist in the sustainable management of the sewage sludge. To evaluate the benefits associated with incorporating this type of system to a WWTP, the life cycle analysis (LCA) and cost-impact analysis (CIA) were performed in order to determine the cost per unit of impact. It was found that the incorporation of the proposed system would represent annual savings of 59% in energy consumption and 27% in sludge management. Furthermore, there is an expected 67% reduction in the environmental impact (greenhouse gases emissions, waste and energy consumption) compared to current sludge management.

## 1. GENERACIÓN Y MANEJO DE LODOS RESIDUALES: PROBLEMÁTICA.

En todo el mundo la crisis del agua se debe, entre otras cosas, al incremento y concentración de la población. Esto ha implicado el crecimiento de las redes de distribución de agua potable, así como de captación de aguas residuales (drenaje), lo que ha generado la necesidad de más plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) con la finalidad de tratar estas aguas hasta niveles aceptables.

El proceso de tratamiento de aguas residuales también implica la generación de lodos conocidos como lodos residuales, compuestos principalmente por materia orgánica y por los elementos contaminantes que fueron removidos del agua. De ahí que los lodos residuales deban ser tratados para eliminar o transformar sus elementos contaminantes y que no representen un riesgo para la salud o el ambiente. Por ello, es importante que las PTAR no sólo contemplen cómo tratar el agua sino también deben de plantear qué hacer con los lodos residuales generados (Daguer, 2004).

De acuerdo con lo anterior el manejo de lodos residuales representa un problema importante a nivel mundial; sin embargo, estos por lo general no son considerados un tema importante en las políticas públicas del manejo de residuos y, por lo tanto, ni se controlan ni se tratan adecuadamente (UN-HABITAT, 2008).

Adicionalmente el manejo, disposición y aprovechamiento de los lodos residuales implica un reto económico y de ingeniería, puesto que el volumen y las cantidades que se generan involucran tanto inversión en infraestructura como el desarrollo de tecnologías que reduzcan su volumen y los estabilicen con la finalidad de reducir o eliminar sus propiedades contaminantes (Snyman, 2000).

En todos los países del mundo se generan lodos residuales en mayor o menor escala debido al tratamiento y efectividad de los procesos que tratan las aguas residuales. Se estima que los 17 países con la economía más desarrollada del mundo (**Cuadro I**) generan por año alrededor de 18.2 millones de toneladas (UN-HABITAT, 2008).

En el caso particular de México para el 2011 las 2,029 PTAR públicas generaron 640,000 toneladas de lodos residuales (**Cuadro I**). Se espera que para

el 2030 el volumen de generación de lodos residuales generados se incrementa a 880,000 toneladas por año (CONAGUA, 2011).

Existen diferentes tratamientos que se aplican a los lodos residuales con la finalidad de reducir su volumen y estabilizarlos, es decir, que los lodos pierdan sus propiedades contaminantes y que puedan ser reutilizados o aprovechados. Una vez que los lodos se encuentran estabilizados son denominados biosólidos y pueden ser aprovechados con diferentes propósitos: composta, fertilizantes, mejorador de suelos, reutilización en procesos industriales y producción de energía eléctrica (recuperación energética) mediante digestión anaerobia (Mahamud, 1996).

La conveniencia para la implementación de un sistema de digestión anaerobia con recuperación energética, radica en que reduce en un 24% el volumen de lodos residuales y produce un 25% adicional de energía, por lo que representa una reducción del 30% en el costo anual de manejo y disposición de lodos residuales, el cual se estima representa el 45% del gasto anual de una PTAR (Onyeche, 2010).

Es importante mencionar que en promedio los países desarrollados utilizan un 15% de sus lodos residuales para la recuperación energética por medio de digestores anaerobios (**Cuadro I**). La energía producida es utilizada para abastecer los requerimientos energéticos de la PTAR donde se encuentra instalado el sistema de digestión (UN-HABITAT, 2008).

En México de acuerdo con Jiménez y Wang (2006) de las 640,000 toneladas de lodos residuales que se generan, el 51% es estabilizado mediante digestión anaerobia, sin embargo no se realiza la recuperación energética (**Cuadro I**).

**Cuadro I.** Generación de lodos residuales/biosólidos en México y el mundo y su aprovechamiento para la recuperación energética (información extraída de UN-HABITAT 2008).

País	Lodos residuales (millones t/a).	Cantidad depositada como relleno en tierra (%).	Cantidad utilizada para recuperación energética (%).
Estados Unidos	7.2	15	5
Canadá	0.550	17	7

Unión Europea	9.2	18	23
China	2.9	34	0
Japón	2.0	20	5
Brasil	0.48	45	0
México	0.640	76	0

En el caso particular de la ciudad de Ensenada, Baja California, la PTAR “El Naranja”, operada por la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Ensenada (CESPE), con capacidad de 500 litros por segundo (lps) maneja 28,800 toneladas de lodos anualmente (ton/año). Por lo anterior, se realiza un análisis para la instalación de un sistema de digestión anaerobia con recuperación energética, que colabore en la gestión sustentable de estos lodos. Para evaluar los beneficios que representa la incorporación de este tipo de sistema a la PTAR, se utiliza el análisis de ciclo de vida (ACV) y el análisis costo-impacto (ACI) con el fin de determinar su costo por unidad de impacto.

## **2. RECUPERACION ENERGETICA UTILIZANDO LODOS RESIDUALES.**

En los sistemas de digestión anaerobia se degradan los lodos residuales produciendo biogás durante el proceso. El biogás es un gas biocombustible, limpio y barato, por lo que puede utilizarse como fuente para la generación de energía eléctrica (Malik, 2009); el biogás está compuesto principalmente por un 40-75% de CH<sub>4</sub>, 25-40% de CO<sub>2</sub> y en menor cantidad otros gases como H<sub>2</sub>S, N, O, H, CO y vapor de agua (Cisneros, 2005; Duque, 2006; Arthur, 2010; Gilroyed, 2010).

Para aprovechar mejor el biogás como biocombustible para la producción de energía eléctrica es necesario limpiarlo, con la finalidad de eliminar principalmente el contenido de CO<sub>2</sub> y de H<sub>2</sub>S, y obtener CH<sub>4</sub> casi puro aumentando su eficiencia energética.

Es importante mencionar que de acuerdo con el Instituto de Investigaciones Eléctricas, en México existe un potencial de generación de energía eléctrica de 3,000 MW proveniente de la utilizando de biogás y de metano obtenido a partir de la digestión de residuos animales, residuos sólidos urbanos y de los lodos residuales generados durante el tratamiento de las aguas residuales (IMTA, 2012).

Por lo anterior se propone la incorporación de un sistema de digestión anaerobia con recuperación energética en la PTAR “El Naranjo” operada por la CESPE, con la finalidad de dar un manejo sustentable a sus lodos residuales, al aprovecharlos para producir energía eléctrica y reducir el volumen a disponer.

## **2.1 Potencial de recuperación energética utilizando lodos residuales de la PTAR “El Naranjo” de la ciudad de Ensenada, Baja California.**

Con la finalidad de determinar cuál es el potencial de recuperación energética de los lodos residuales generados por la PTAR “El Naranjo” al ser sometidos a un proceso de digestión anaerobia, se realizaron 3 experimentos.

Para la realización de estos experimentos se fabricó un digester anaerobio en acero inoxidable con capacidad de 30 litros (**Figura 1**), monitoreando 5 variables: temperatura interna de los lodos, temperatura interna del biogás, temperatura externa (temperatura ambiente), masa inicial y masa final de los lodos sometidos a digestión.



**Figura 1.** Prototipo experimental de digester anaerobio fabricado en acero inoxidable con termómetros para biogás y lodos residuales, así como válvula de seguridad y llave de drenado (Fotografía propia).

Los experimentos fueron realizados de Septiembre de 2012 a Enero de 2013, utilizando una digestión tipo batch o por lotes, es decir se sometieron los lodos residuales al proceso de degradación en una sola exhibición retirándose después del tiempo de retención de 31 días, esto de acuerdo con el trabajo de Agler *et al.* (2010) en el que el tiempo de retención óptimo para lograr una producción de biogás constante es de 15 a 32 días.

Los niveles de las variables consideradas para cada experimento se presentan en el **Cuadro II**.

**Cuadro II.** Medición de las variables consideradas durante los experimentos realizados para determinar el potencial de recuperación energética a partir de la digestión de los lodos residuales de la PTAR “El Naranja” (Elaboración propia).

Experimento	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>E</sub>	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>
1	25	27	22	12.46	7.2	42	28
2	20	23	20	12.46	11.20	10.2	5
3	18	22	14	12.46	12.20	2.1	0

T<sub>1</sub>: Temperatura media interna lodos residuales (C°).  
T<sub>2</sub>: Temperatura media interna biogás (C°).  
T<sub>E</sub>: Temperatura media externa/ambiente (C°).  
M<sub>1</sub>: Masa inicial de lodos residuales (kg).  
M<sub>2</sub>: Masa final de lodos residuales/biosólidos (kg).  
R<sub>1</sub>: Reducción de masa después de la digestión (%).  
R<sub>2</sub>: Reducción de volumen después de la digestión (%).

De acuerdo con el trabajo de Agler *et al.* (2010) la temperatura mínima a la que se deben someter los lodos residuales con la finalidad de generar biogás es de 22°C. Por lo que los datos obtenidos en el experimento 1 se utilizaron para calcular la cantidad de biogás producido por cada kg de lodos residuales digerido, a una temperatura de 25 C°.

Para calcular la cantidad de biogás producido se utilizaron las formulas de Duque *et al.* (2006) y de sistemas termodinámicos (Cengel, 1997), las cuales consideran las variables antes mencionadas, dando como resultado que la capacidad de producción de biogás es de **0.032 m<sup>3</sup>/kg**.

En el caso del biogás obtenido a partir de la digestión anaeróbica de lodos residuales el contenido de CH<sub>4</sub> es de 60-65% (Cisneros, 2005; Duque, 2006;

Arthur, 2010; Gilroyed, 2010), por lo que se consideró el valor mínimo de contenido de CH<sub>4</sub> para realizar los cálculos correspondientes del potencial de generación de energía.

Adicionalmente se consideraron los siguientes datos:

- 1) Potencial térmico del CH<sub>4</sub>= **37.78 MJ/m<sup>3</sup>**
- 2) Potencial de generación de energía eléctrica de 1 MJ= **0.278 kwh.**
- 3) Eficiencia del moto generador= **94%**

Como se mencionó anteriormente, la PTAR “El Naranjo” maneja 28,800 ton/año de lodos residuales, por lo que si se instalara un sistema de digestión anaerobia con recuperación energética se reduciría el volumen de lodos residuales a manejar y también el consumo de la energía eléctrica suministrada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) al convertirse en un sistema autosustentable (**Cuadro III**).

**Cuadro III.** Potencial de generación de energía eléctrica utilizando los lodos residuales de la PTAR “El Naranjo”, como materia prima (Elaboración propia).

Lodos generados (ton/año)	Biogás generado (m <sup>3</sup> /kg)	CH <sub>4</sub> generado (m <sup>3</sup> /kg)	Potencial térmico del CH <sub>4</sub> (MJ/año)	Energía eléctrica generada (kwh/año)*	Lodos/biosólidos finales a manejar (ton/año)
28,800	921,600	552,960	20,914,830	5,454,827.52	16,704

\*Se considero una eficiencia del 94%.

Se considera que el consumo energético del sistema de digestión anaerobia es de 50 kwh por tonelada de lodos residuales digeridos (Grupo Aqua Limpia, 2011), por lo que el requerimiento energético de la PTAR “El Naranjo” se incrementará en un 18%. Sin embargo, la capacidad de recuperación energética del sistema propuesto alcanzará para abastecer el requerimiento energético del sistema y cubrir el 59% del requerimiento energético actual de la PTAR (**Cuadro IV**).

**Cuadro IV.** Requerimiento energético de la PTAR “El Naranjo”, del sistema de digestión anaerobio con recuperación energética propuesto y ahorro en energía suministrada por CFE (Elaboración propia).

Requerimiento energético PTAR (kwh/año)	Requerimiento energético del sistema (kwh/año)	Requerimiento energético PTAR+Sistema (kwh/año)	Recuperación energética (kwh/año)	Ahorro energía suministrada por CFE (kwh/año)
7,794,136	1,440,000	9,234,136	5,454,827	3,779,309

Lo anterior demuestra la factibilidad de generación de energía eléctrica mediante la utilización de lodos residuales como materia prima, además de contar con beneficios adicionales como la disminución de gases de efecto invernadero (GEI) y por ende la disminución del impacto ambiental ocasionado por la gestión actual de estos lodos.

### **3. ANALISIS DE CICLO DE VIDA (ACV) DEL SISTEMA DE DIGESTION CON RECUPERACION ENERGETICA.**

La gestión actual de los lodos residuales de la PTAR “El Naranjo” consiste en depositarlos en terrenos posteriores a la planta como relleno en tierra a cielo abierto; su descomposición genera principalmente CH<sub>4</sub> (Beecher, 2008) considerado como uno de los principales GEI.

Tan sólo las actividades relacionadas con las aguas residuales generan a nivel mundial el 9% del CH<sub>4</sub> emitido a la atmósfera. Se estima que México emitió 4,637 millones de toneladas de CH<sub>4</sub> en 2006 de las cuales el 13.5% se debió a las actividades relacionadas con aguas residuales municipales (Arvizu, 2008), dando como resultado que el promedio de emisión para el país fuese de 1.767 kg de CH<sub>4</sub> por habitante por año (Mantilla, 2008).

En México las emisiones de CH<sub>4</sub> emitidas por el manejo y tratamiento de las aguas residuales representa el 24.9% del total, como consecuencia al incremento en el volumen de aguas residuales tratadas en nuestro país y a las nuevas políticas públicas establecidas con la finalidad de depurar las aguas residuales (INE, 2006). Sin embargo aún no se ha considerado incluir en las PTAR sistemas de digestión anaerobia con recuperación energética.

En el caso de México, el 76% de los lodos residuales y biosólidos son depositados en vertederos o rellenos a cielo abierto (Jiménez, 2011), que por lo general se encuentran en terrenos aledaños a las PTAR, por lo que implican un impacto ambiental y un riesgo a la salud para los habitantes de la zona donde se encuentran ubicadas.

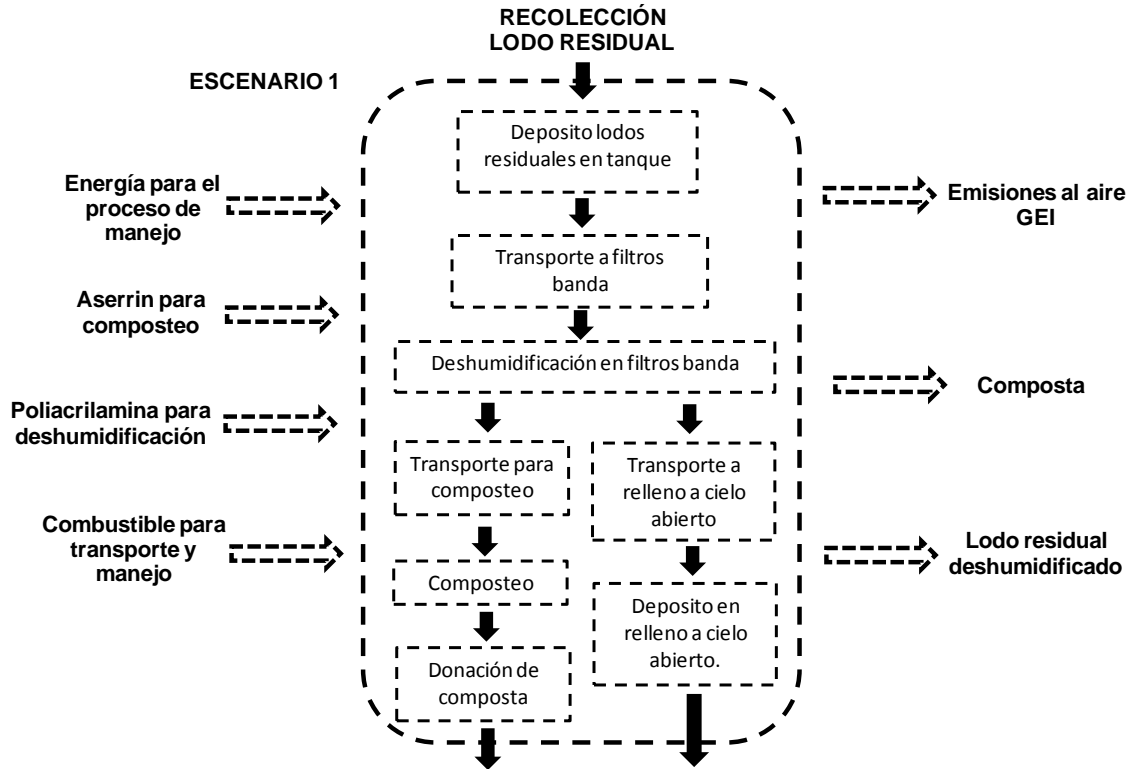
En total, la depositación de lodos residuales como relleno en tierra a cielo abierto, contribuyen con el 10.5% de los GEI generados en el país (Mantilla, 2008).

Por lo anterior, se realizó un análisis de ciclo de vida (ACV), ya que es una herramienta que permite evaluar el impacto ambiental generado por uno o más sistemas, con la finalidad de conocer cuál es el que contribuye en menor escala al deterioro del medio ambiente (Hoof, 2008).

El análisis se basó en la comparación de dos escenarios: el **escenario 1** es el sistema de gestión actual de lodos residuales, los cuales son depositados como relleno en tierra a cielo abierto; por su parte el **escenario 2** es el sistema de gestión sustentable propuesto, el cual consiste en instalar un sistema de digestión anaerobia con recuperación energética. Con lo anterior se pretende demostrar que este tipo de sistema es autosustentable y puede contribuir a la disminución del impacto ambiental generado por el manejo de lodos residuales en las PTAR.

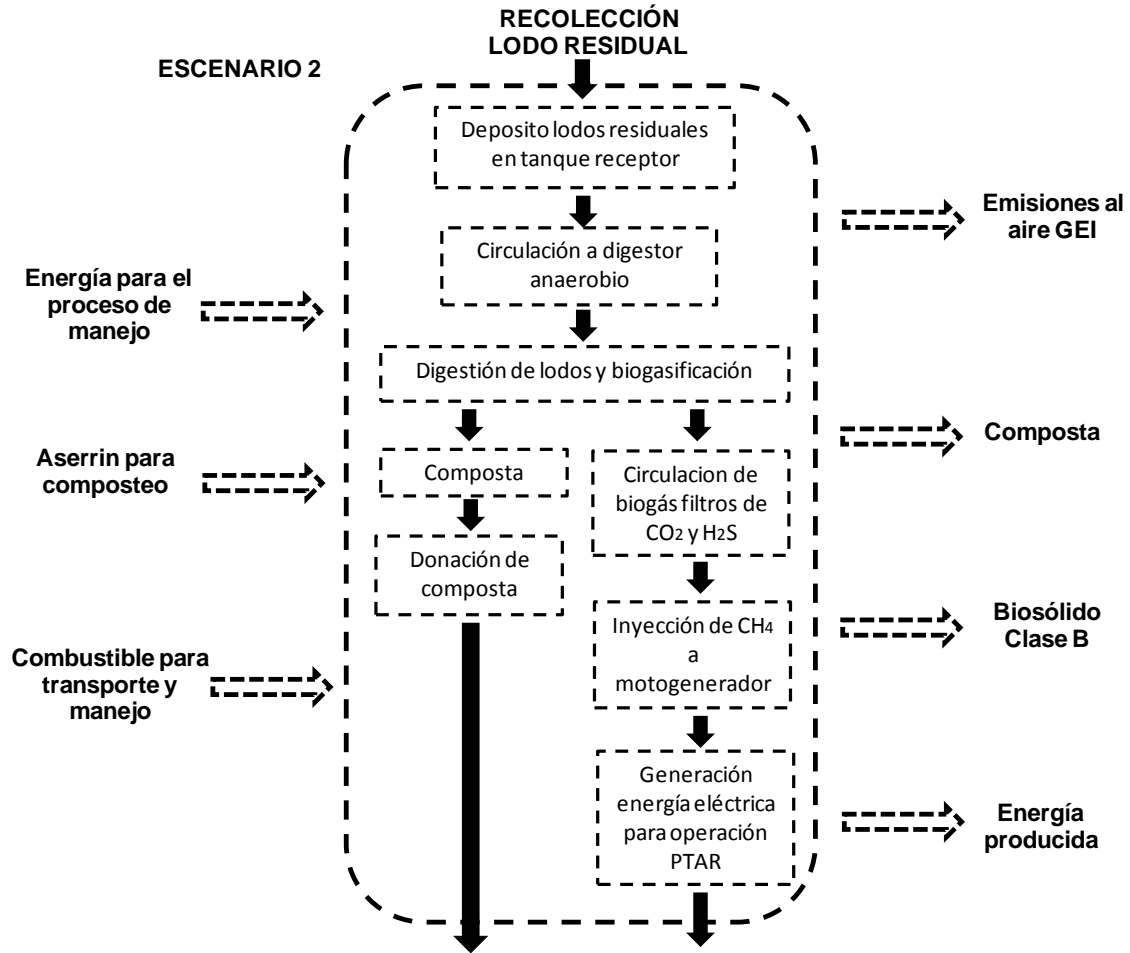
Con la finalidad de poder comparar de manera real ambos escenarios, evitando una interpretación errónea, el ACV evalúa la carga ambiental del sistema completo (denominado “de la cuna a la tumba”), es decir, las entradas y salidas de materiales y energía, así como los procesos internos (Perilhon, 2012).

En el manejo actual (escenario 1), los lodos residuales son transportados de las diferentes PTAR de la ciudad de Ensenada a la PTAR “El Naranja” donde son depositados en el espesador de lodos, junto con los lodos generados por esta PTAR; posteriormente son enviados a filtros banda donde se les añade poliacrilamina para su deshumidificación. El 1.3% de estos lodos deshumidificados son utilizados para elaborar composta, el resto son dispuestos en terrenos posteriores a la PTAR como relleno en tierra a cielo abierto, generando emisiones al aire (**Figura 2**).



**Figura 2.** Diagrama de entradas, procesos y salidas para el sistema actual de gestión de lodos residuales en la PTAR “El Naranjo” (Elaboración propia).

En el sistema de manejo propuesto (escenario 2), los lodos residuales son transportados de las diferentes PTAR de la ciudad de Ensenada a la PTAR “El Naranjo” donde son depositados en el espesador de lodos, junto con los lodos generados por esta PTAR; posteriormente son circulados al digestor anaerobio, con la finalidad de digerirlos y producir la biogásificación. El 1.3% de los biosólidos resultantes son utilizados para elaborar composta y el resto puede ser aprovechado como fertilizante de cultivos ornamentales o bien depositado como relleno a cielo abierto puesto que, al haberse digerido, emitirán menos GEI. El biogás generado se limpia para eliminar el CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S y que quede CH<sub>4</sub> casi puro, el cual es utilizado como combustible para generar energía eléctrica, y abastecer los requerimientos energéticos de la PTAR (**Figura 3**).



**Figura 3.** Diagrama de entradas, procesos y salidas para el sistema de digestión anaerobia con recuperación energética propuesto para la PTAR “El Naranja” (Elaboración propia).

Una vez elaborados los diagramas para cada escenario, se realizó el inventario que consistió en cuantificar todas las entradas y salidas de materiales y energía para cada sistema (McDougall, 2003).

Como apoyo para la realización del inventario y del ACV para cada escenario se utilizó el software especializado para ACV de sistemas de manejo y disposición de residuos sólidos IWM2 ver.2003. Los datos utilizados para alimentar el software fueron los que se mostraron en el punto 2 del presente, así como información proporcionada por CESPE (2011); estos datos se presentan a detalle en el **Cuadro V**.

Cabe mencionar que en Ensenada se trata el 100% de las aguas residuales recolectadas en el sistema de alcantarillado de la ciudad (CESPE, 2013), por lo

que se consideró para ambos escenarios que la población total atendida es de 466,814 habitantes, con un total de 129,671 casas habitación cuyo promedio de habitantes por casa es de 3.6 (INEGI, 2012). Adicionalmente, como ya se ha mencionado, los lodos residuales generados anualmente son de 28,800 toneladas, lo que equivale a 62.7 kg por persona por año.

**Cuadro V.** Datos de entrada para la realización del inventario y del ACV para los escenarios 1 y 2 (Elaboración propia).

<b>Escenario 1</b>		<b>Escenario 2</b>	
<b>Entradas</b>		<b>Entradas</b>	
Energía (manejo)	7,059,159 kwh/año	Energía (manejo)	3,042,786 kwh/año
Aserrín	90 ton/año	Aserrín	90 ton/año
Poliacrilamina	18,000 kg/año	-----	-----
Diesel (transporte)	28,953 litros/año	Diesel (transporte)	21,437 litros/año
<b>Salidas</b>		<b>Salidas</b>	
Emisiones al aire (GEI)	70,893,119 CO <sub>2</sub> -eq*	Emisiones al aire (GEI)	14,931,379 CO <sub>2</sub> -eq*
Composta	360 ton/año	Composta	360 ton/año
Lodos residuales deshumidificados	28,800 ton/año	Biosólido	16,704 ton/año
		Energía producida	5,454,827 kwh/año

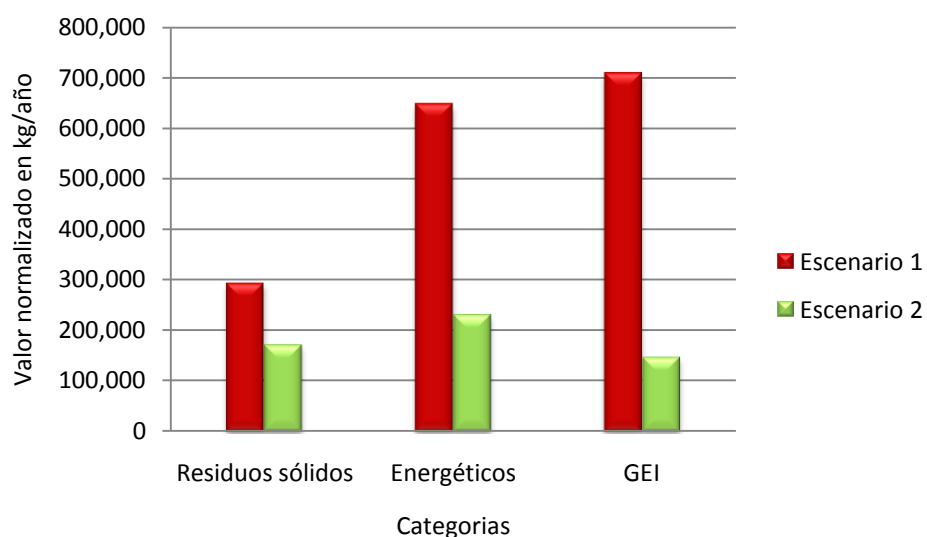
\*Unidad de medición utilizada para indicar el potencial de calentamiento global de los GEI en comparación con el CO<sub>2</sub>.

Con el empleo del software se procesaron los datos del inventario realizado para cada escenario (**Cuadro V**). El software clasifica las salidas del sistema por categorías, las cuales son: Residuos sólidos generados, Energéticos consumidos y GEI emitidos, proporcionando la cantidad normalizada en kg/año que sale del sistema por cada categoría (**Cuadro VI**).

La comparación en cuanto a las cantidades generadas para cada categoría por escenario se presenta en la **Figura 4**.

**Cuadro VI.** Datos normalizados resultantes de la cantidad generada por categoría para el escenario 1 y 2 (Elaboración propia).

Escenario 1		Escenario 2	
Residuos sólidos	294,360 kg/año	Residuos sólidos	171,190 kg/año
Energéticos	647,767 kg/año	Energéticos	230,138 kg/año
GEI	708,931 kg/año	GEI	147,122 kg/año



**Figura 4.** Grafica comparativa de las cantidades en kg/año generadas por cada categoría para cada escenario (Elaboración propia).

Como se puede observar en la **Figura 4**, el escenario 2 consume menor cantidad de energéticos y genera menor cantidad de residuos sólidos y GEI que el escenario 1 (**Cuadro VII**).

**Cuadro VII.** Porcentaje de disminución para cada categoría del escenario 2 con respecto al escenario 1 (Elaboración propia).

Residuos sólidos	42%
Energéticos	64%
GEI	79%

Es importante mencionar que cada salida representada por una categoría constituye un impacto, es decir produce efectos nocivos sobre el medio ambiente (**Cuadro VIII**).

**Cuadro VIII.** Impacto que genera cada salida representada por una categoría (Información extraída de Renner, 2002; Hoof,2008 y Perilhon, 2012).

Categoría	Impacto	Efecto nocivo
Residuos sólidos	Salud humana	Erupciones en la piel, irritación en los ojos y garganta, problemas pulmonares, asma e infecciones gastro intestinales.
	Calidad del ecosistema	Eco toxicidad, acidificación, eutrofización acuática y contaminación del suelo.
Energéticos	Agotamiento de los recursos naturales	Explotación no sustentable de fuentes energéticas no renovables.
GEI	Calentamiento Global	Efecto invernadero.

Por lo anterior como resultado de la aplicación del ACV, el instalar un sistema de digestión anaerobia con recuperación energética representa una disminución en el impacto ambiental del **67%** con respecto al manejo actual de lodos residuales, ya que la implementación de este sistema disminuye la cantidad de residuos sólidos generados, la energía no renovable consumida para la realización de sus procesos y los GEI emitidos a la atmosfera.

Adicionalmente es importante que los datos obtenidos como resultado del análisis del potencial de recuperación energética y del impacto ambiental del sistema propuesto se integren en la realización del análisis costo-impacto (que se presenta a continuación), ya que este análisis permite evaluar la relación entre los costos de implementación y el impacto social estimado (CEPAL, 2006).

#### **4. ANALISIS COSTO-IMPACTO (ACI) DE LA IMPLEMENTACION DEL SISTEMA DE DISGESTION CON RECUPERACION ENERGETICA.**

El ACI es la metodología que permite seleccionar la alternativa que maximiza el impacto social al menor costo posible. De manera similar que el ACV, se trabajó con dos alternativas; la **alternativa 1** fue el sistema actual de gestión de lodos residuales (no hacer nada), mientras que la **alternativa 2** consistió en la incorporación a la gestión actual de un sistema de digestión anaerobia con recuperación energética.

El tiempo de vida útil considerado para el sistema de digestión con recuperación energética es de 25 años (Grupo Aqua limpia, 2011; Empresa ACZIA, 2012), para la determinación de la depreciación anual del equipo e infraestructura se tomó como base la lista publicada por el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 15 de agosto de 2012.

Los datos para determinar todos los costos asociados a cada una de las alternativas fueron proporcionados por CESPE (2012a y 2012b) y el Grupo Aqua Limpia (2011).

Para la alternativa 1 los costos que se consideraron fueron los siguientes:

**Costo de inversión:** Estos costos son el desembolso que debe hacerse para la ejecución de la alternativa. Para este caso se consideró el valor actual del edificio donde se encuentran ubicados los filtros banda (se realizó la depreciación anual desde el año 1999, año en el que comenzó operaciones la PTAR hasta el año 2012 a una tasa del 4% anual) y el valor actual de estos filtros (depreciación del 10% anual), donde se lleva a cabo el proceso de deshumidificación de los lodos residuales (DOF, 2012) (**Cuadro IX**).

**Cuadro IX.** Costo de inversión (pesos Mexicanos) para la alternativa 1 en el año cero (1999) (Elaboración propia).

<b>COSTOS DE INVERSION</b>	
Edificio filtros banda	\$ 2,267,516.27
Filtros banda de lodos residuales	\$ 979,889.28
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 3,247,405.55</b>

**Costo de mantenimiento:** Son los costos necesarios para mantener las condiciones óptimas de funcionamiento del equipo para el manejo de lodos residuales; estos se calcularon como una proporción del valor actual, por lo que para el edificio de filtros banda se consideró para el año 1 el 3%, y para el resto de los años una inflación del 4.5% anual. En el caso de los filtros banda se consideró para el año 1 el 6% de su valor actual y para el resto de los años el 6% adicional por compra de refacciones y la inflación anual (Grupo Aqua limpia, 2011) (**Cuadro X**).

**Costo de operación:** Es la adquisición de bienes o el pago de servicios con la finalidad de que el sistema opere adecuadamente (**Cuadro X**) se dividen en:

- 1) **Costos directos:** Con la finalidad de determinar estos costos se consideraron todos los materiales y consumibles indispensables para el funcionamiento del sistema actual, tomando en cuenta el consumo eléctrico total de la PTAR y gastos por manejo de lodos residuales como la renta de maquinaria y la adquisición de poliacrilamina para deshumidificación de los lodos para el año 2012 (CESPE, 2012b). Se consideró el 4.5% de inflación anual.
- 2) **Costos indirectos:** Dentro de estos costos se tomó en consideración el gasto por nómina de los empleados administrativos y operativos de la PTAR para el 2012 (CESPE, 2012a), debido a que sus funciones no son exclusivas para el manejo de lodos residuales. Se consideró el 4.5% de inflación anual.

**Costo de habitantes de la zona:** En los proyectos donde el beneficio económico no se ve reflejado directamente en la población, es necesario determinar los costos en los que incurrirán indirectamente los habitantes cercanos a la instalación del proyecto. Para este caso se considero un 25% adicional en los gastos promedio por medicamentos de la población cercana a la PTAR asociados con dolor de cabeza, irritación de ojos y garganta, ya que de acuerdo con Renner *et. al* (2002) este es el porcentaje en el que la población cercana a una PTAR que deposita sus lodos residuales como relleno a cielo abierto es mayormente propensa. Adicionalmente se consideró el riesgo por incendio o explosión (UDLAP, 2007) por vivir cerca de una PTAR, con el manejo actual de lodos, el cual se considera como local, es decir, solamente causa daño al personal operativo y a las instalaciones y equipo de la PTAR (**Cuadro X**).

**Cuadro X.** Costos totales en pesos Mexicanos para la alternativa 1 a 25 años (Elaboración propia).

<b>COSTOS DE MANTENIMIENTO</b>	
Mantenimiento edificio filtros banda	\$ 1,310,069.15
Mantenimiento filtros banda	\$ 7,464,370.42
<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 8,774,439.57</b>
<b>COSTOS DIRECTOS</b>	
Consumo de electricidad PTAR	\$ 304,336,524.21
Consumo de electricidad filtros banda	\$ 8,010,828.26
<b>Manejo de lodos residuales</b>	
Renta maquinaria y camiones	\$ 93,056,779.30
Polímeros (poliacrilamina)	\$ 53,665,426.06
<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 459,069,557.84</b>
<b>COSTOS INDIRECTOS</b>	
Empleados administrativos PTAR	\$ 94,804,253.82
<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 94,804,253.82</b>
<b>COSTOS DE HABITANTES DE LA ZONA</b>	
Medicamentos por problemas salud	\$ 3,529,211.69
Riesgo por incendio o explosión	\$ 32,868,159.09
<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 36,397,370.78</b>
<b>COSTO TOTALES A 25 AÑOS</b>	<b>\$ 562,648,251.22</b>

Para la alternativa 2 los costos que se consideraron fueron los siguientes:

**Costo de inversión:** Los costos necesarios para construir el sistema de digestión anaerobia con recuperación energética (se consideraron 3 digestores, con capacidad de 30,000 ton/año de lodos residuales), la adquisición del equipo electromecánico para el buen funcionamiento de los digestores, los filtros de CO<sub>2</sub> y de H<sub>2</sub>S y un moto generador con capacidad de 78 m<sup>3</sup>/h de CH<sub>4</sub> (Grupo Aqua limpia, 2011) (**Cuadro XI**).

**Cuadro XI.** Costo de inversión (pesos Mexicanos) para la alternativa 2 en el año 0 (Elaboración propia).

<b>COSTOS DE INVERSION</b>	
Infraestructura (obra civil)	\$ 16,212,837.94
<b>Equipamiento</b>	
Equipo electromecánico para funcionamiento	\$ 7,375,900.00
Equipo de Filtrado de CO2 y H2S	\$ 700,954.65
Moto generador de biogás	\$ 1,377,520.00
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 25,667,212.59</b>

**Costo de mantenimiento:** Como se mencionó para la alternativa 1, los costos por mantenimiento fueron calculados como un porcentaje del costo de inversión. En el caso de la infraestructura se consideró para el año 1 el 3% y para el resto de los años el 4.5% de inflación anual (DOF, 2012).

Para el equipo electromecánico se consideró el 6% de su valor actual y el mismo valor para su mantenimiento anual por compra de refacciones y la inflación correspondiente.

De acuerdo con información proporcionada por el Grupo Aqua Limpia (2011) para el equipo de filtración se considero el 10% y para el moto generador el 5% de su valor actual y los mismos valores para su mantenimiento anual (**Cuadro XII**).

**Costo de operación:** El detalle de estos costos se presenta en el **Cuadro XII** y de igual forma se determinaron:

- 1) Costos directos:** A diferencia de la alternativa 1, se consideró el consumo eléctrico de la PTAR (tomando en cuenta que el 59% de la energía será cubierta por la recuperación energética) y del sistema de digestión anaerobia, así como la renta de maquinaria, pues la poliacrilamina para deshumidificación no será necesaria (CESPE, 2012b); de igual manera se considero el 4.5% de inflación anual.
- 2) Costos indirectos:** Al igual que para la alternativa 1 se tomó en consideración el gasto por nómina de los empleados administrativos y operativos de la PTAR para el 2012 (CESPE, 2012a), ya que con los

mismos trabajadores (capacitándolos) se puede operar el nuevo sistema; de igual forma se considero el 4.5% de inflación anual.

**Costo de habitantes de la zona:** Para esta alternativa se estimó que la afectación a la salud de los habitantes cercanos a la PTAR, disminuye el 25% adicional en gastos por medicamentos, considerado para la alternativa 1, ya que la digestión anaerobia estabiliza los lodos residuales y los GEI son capturados durante su digestión para la recuperación energética. Sin embargo, el riesgo por incendio o explosión calculado (UDLAP, 2007) se incrementó en un 45% por el riesgo que conlleva el manejo del biogás y su combustión, esto debido a que este riesgo implica daños no solamente al personal operativo e instalaciones de la PTAR, sino también implica un riesgo para los habitantes ubicados a 500 m a la redonda y sus viviendas (**Cuadro XII**).

**Cuadro XII.** Costos totales en pesos Mexicanos para la alternativa 2 a 25 años (Elaboración propia).

<b>COSTOS DE MANTENIMIENTO</b>	
Mantenimiento infraestructura	\$ 21,675,855.90
<b>Mantenimiento del equipo</b>	
Equipo electromecánico para funcionamiento	\$ 24,280,509.24
Equipo de Filtrado de CO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> S	\$ 3,446,841.43
Moto generador de biogás	\$ 6,574,503.32
<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 34,301,853.99</b>
<b>COSTOS DIRECTOS</b>	
Consumo de electricidad PTAR	\$ 118,847,040.76
Consumo de electricidad sistema Digestión Anaerobia	\$ 73,158,248.97
<b>Manejo de lodos residuales</b>	
Renta maquinaria y camiones	\$ 67,000,881.10
<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 259,006,170.84</b>
<b>COSTOS INDIRECTOS</b>	
Empleados administrativos PTAR	\$ 94,804,253.82
<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 94,804,253.82</b>
<b>COSTOS DE HABITANTES DE LA ZONA</b>	
Medicamentos por problemas salud	\$ 2,823,369.17

Riesgo por incendio o explosión	\$ 47,651,805.16
<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 50,475,174.33</b>
<b>COSTO TOTALES A 25 AÑOS</b>	<b>\$ 438,587,452.98</b>

Una vez que se elaboraron los flujos de costos para cada una de las alternativas fue necesario realizar la actualización de estos costos, es decir, calcular su valor presente (VP) al momento del análisis con la finalidad de poder realizar su comparación. El costo total VP para cada alternativa se presenta en el **Cuadro XIII**.

**Cuadro XIII.** Costo total VP para las alternativas 1 y 2 a 25 años (Elaboración propia).

ALTERNATIVAS	COSTO TOTAL VP EN PESOS MEXICANOS
1. No hacer nada seguir con el manejo actual	\$ 34,663,151.58
2. Sistema de digestión anaerobia con recuperación energética	\$ 48,358,651.39

De acuerdo con el **Cuadro XIII**, la alternativa 1 tiene un menor VP, pues no es necesaria una inversión inicial, ya que se cuenta con el equipo desde que la PTAR “El Naranjo” inició operaciones en 1999. Sin embargo, aun cuando para la alternativa 2 hay que realizar una inversión inicial, los costos por manejo de lodos residuales (la suma de los costos de mantenimiento, operación y de los habitantes de la zona) para la vida útil del proyecto es un **27%** menor, que el de la alternativa 1, es decir, \$143, 266,222.34 de pesos mexicanos.

Una vez que se calculó el VP, se determinó el costo total anual (CTA) de cada alternativa (**Cuadro XIV**), es decir, el costo promedio anual ajustado por la tasa de descuento, la cual se consideró del 12% anual (CEPAL, 2006).

**Cuadro XIV.** Costo total anual para las alternativas 1 y 2 (Elaboración propia).

ALTERNATIVAS	COSTO TOTAL ANUAL EN PESOS MEXICANOS
1. No hacer nada seguir con el manejo actual	\$ 4,419,550.78
2. Sistema de digestión anaerobia con recuperación energética	\$ 2,958,483.57

Lo anterior indica que, considerando la inversión inicial y los costos por manejo de lodos residuales, la alternativa 2 representa un ahorro anual del **34%** con respecto a la alternativa 1.

En la valoración de proyectos con beneficio social, se debe determinar el costo por habitante del proyecto, para este caso en particular se consideró el costo por habitante de la zona de influencia de la PTAR, la cual es de 1 km a la redonda (Renner, 2002). Así pues, los habitantes afectados o beneficiados por cada alternativa considerada para este análisis fue de 436 (INEGI, 2012).

Por lo tanto, el costo por habitante (CUP) a 25 años indica que la alternativa 2 representa un **33%** menos costo por habitante (**Cuadro XV**).

**Cuadro XV.** Costo por habitante durante la vida útil de las alternativas 1 y 2 (Elaboración propia).

ALTERNATIVAS	CUP PESOS MEXICANOS
1. No hacer nada seguir con el manejo actual	\$ 10,137.00
2. Sistema de digestión anaerobia con recuperación energética	\$ 6,786.00

En los análisis ACI, no sólo es importante determinar los costos asociados para cada alternativa, sino que es necesario evaluar el impacto que tienen esas alternativas en la sociedad, con la finalidad de determinar si las alternativas producen cambios en la dirección de los fines perseguidos y estimar la magnitud de dichos cambios (CEPAL, 2006).

Por lo anterior se definieron las metas que se pretenden alcanzar por ambas alternativas, que para este análisis en particular son las que resultaron de la

realización del ACV, a las cuales se les asignó un valor de importancia (**Cuadro XVI**) para poder calcular el impacto total ponderado (ITP) de cada una de las alternativas (**Cuadro XVII**), es decir, el nivel de importancia de cada meta perseguida con respecto al impacto que generaron.

**Cuadro XVI.** Metas por alcanzar al implementar cada una de las alternativas (Elaboración propia).

Metas perseguidas para las alternativas	Nivel de Importancia (%)
1. Disminuir los residuos sólidos que provocan riesgos a la salud	45
2. Disminuir las emisiones GEI que favorecen el calentamiento global	25
3. Disminuir el riesgo por vivir cerca de una PTAR	35

**Cuadro XVII.** Impacto total ponderado para cada una de las alternativas (Elaboración propia).

ALTERNATIVAS	ITP
1. No hacer nada seguir con el manejo actual	23
2. Sistema de digestión anaerobia con recuperación energética	31

Se observó que la alternativa 2 es la que tiene un mayor ITP, es decir, que genera un mayor beneficio para los habitantes de la zona al cumplir con mayor eficacia con cada una de las metas perseguidas.

Una vez que ya se analizaron los costos para cada una de las alternativas así como sus impactos, se determinó la relación costo-impacto (CUI), es decir el costo que hay que afrontar en cada alternativa para lograr el impacto deseado de cada meta.

El presente análisis considera 3 metas para ambas alternativas (**Cuadro XVI**), por lo que se tienen 3 diferentes CUI por alternativa. Tales CUI se presentan en el **Cuadro XVIII**.

**Cuadro XVIII.** Costo por unidad de impacto (CUI) por cada meta para cada una de las alternativas (Elaboración propia).

ALTERNATIVAS	COSTO POR UNIDAD DE IMPACTO (%/\$)		
	CUI <sub>1</sub>	CUI <sub>2</sub>	CUI <sub>3</sub>
1. No hacer nada seguir con el manejo actual	55,244	73,659	36,830
2. Sistema de digestión anaerobia con recuperación energética	18,491	24,654	49,308

En la alternativa 1 la meta que representa un menor costo-impacto es la de disminuir el riesgo por vivir cerca de una PTAR, debido a que en el manejo actual de lodos residuales los combustibles que pueden provocar un incendio o explosión, son mínimas. Por su parte, para la alternativa 2 esta meta representa el mayor costo-impacto, debido a que la incorporación de un sistema de digestión anaerobia con recuperación energética, implica trabajar con mayor cantidad de combustible (biogás) y tanques sujetos a presión (digestores), aumentando el riesgo por incendio o explosión.

Es importante mencionar que aunque para la alternativa 2 el costo-impacto de la meta de disminuir el riesgo por incendio o explosión aumenta, el costo-impacto total de la alternativa (CUI<sub>A</sub>) es menor que el costo-impacto asociado a la alternativa 1 (**Cuadro XIX**).

**Cuadro XIX.** Costo- impacto total (CUI<sub>A</sub>) para cada una de las alternativas (Elaboración propia).

ALTERNATIVAS	CTA	ITP	CUI <sub>A</sub>
1. No hacer nada seguir con el manejo actual	4,419,551	23	1,901
2. Sistema de digestión anaerobia con recuperación energética	2,958,484	31	962

Por lo anterior se considera que la alternativa 2 que consiste en la incorporación de un sistema de digestión anaerobia con recuperación energética para el manejo sustentable de lodos residuales en la PTAR “El Naranja” representa un menor costo-impacto, es decir reduce los costos por manejo y el impacto negativo social y ambiental generado.

## EN CONCLUSION

Los lodos residuales son un problema de gestión a nivel mundial, pues los volúmenes que se generan a consecuencia del crecimiento poblacional implica que se consideren como un residuo sólido que debe ser manejado y dispuesto sustentablemente, de manera que el impacto ambiental que generen sea el mínimo posible.

Es importante que las PTAR en México consideren no sólo tratar eficazmente las aguas residuales, sino también los lodos generados como consecuencia de este tratamiento, con la finalidad de que estos se estabilicen convirtiéndose en biosólidos y puedan ser aprovechados benéficamente.

El incorporar sistemas de digestión anaerobia a las PTAR permite estabilizar los lodos residuales generados y que estos puedan ser aprovechados como composta y materia prima para la generación de energía eléctrica, que ayude a cubrir sus requerimientos energéticos.

Para el caso específico de la PTAR “El Naranjo” con capacidad de 500 lps, resulta factible la incorporación de un sistema de digestión con recuperación energética, ya que reduce el volumen de lodos a manejar en **42%** anual y genera el **59%** de energía eléctrica para cubrir sus propios requerimientos energéticos.

Adicionalmente al implementar este tipo de sistemas los GEI generados por los lodos residuales durante su proceso de descomposición son capturados, por lo que las emisiones al ambiente se reducen en un **79%** y la utilización de combustibles fósiles en un **64%**, lo que implica que el impacto ambiental de estos sistemas sea de un **67%** menor que los sistemas de gestión tradicional que se lleva a cabo en las PTAR del país.

La incorporación de un sistema de digestión anaerobia con recuperación energética en la PTAR “El Naranjo” no sólo representa un beneficio ambiental, sino también económico, pues la incorporación de digestores y el aprovechamiento del biogás para producir energía representa un ahorro del **27%** anual en gastos operativos para la PTAR, un ahorro en los habitantes de la zona ocasionados por afectación a su salud del **25%** y una disminución del **67%** en el impacto ambiental ocasionado por el manejo de lodos residuales; por lo que si la

PTAR “El Naranja” incorpora este tipo de sistema, el manejo de sus lodos se consideraría como un sistema de gestión sustentable al minimizar los costos y sus impactos.

## REFERENCIAS

- Agler, M.T., Aydinkaya, Z., Cummings, T.A., Beers, A.R., y Angenent L.T (2010). Anaerobic digestion of brewery primary sludge to enhance bioenergy generation: A comparison between low- and high-rate solids treatment and different temperatures. *Bioresource Technology*. 101, 5842-5851.
- Arthur, R. y Brew-hammond, A. (2010). Potential biogas production from sewage sludge: A case study of the sewage treatment plant at Kwame Nkrumah university of science and technology. *International Journal of Energy and Environment*. 1(6), 1009-1016.
- Arvizu, J. (2008). Actualización del inventario nacional de gases de efecto invernadero 1990-2006 en la categoría de desechos. Instituto de investigaciones eléctricas e Instituto Nacional de Ecología. México, D.F. p. 137.
- Beecher, N. (2008). A Greenhouse gas emissions analysis of biosolids management options for Merrimack, NH. North East Biosolids and Residuals Association (NEBRA). New Hampshire, EUA. p. 35.
- Cengel, Y. (1997). Termodinámica. México, D.F: Editorial McGraw-Hill.
- Cisneros, M., Araluce, R., Vargas, A., Morgan-Sagastume, J.M., y Noyola, A. (2005). Digestión anaerobia en dos etapas de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales. Universidad Autónoma de México (UNAM). p. 6.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) (2006). Metodologías e Instrumentos para la formulación, evaluación y monitoreo de programas sociales: Análisis costo-impacto. Recuperado de <http://www.comfama.com/contenidos/servicios/GerenciaSocial/Cursos/Cepal/Descargar/CEPAL-An%C3%A1lisis%20Costo%20Impacto.pdf>

- Comisión Estatal de Servicio Públicos de Ensenada CESPE (2011). Comunicación personal.
- Comisión Estatal de Servicio Públicos de Ensenada CESPE (2012a). Plantilla de personal 2012. Recuperado de <http://www.transparenciabc.gob.mx/portal/areas/paraestatales/cespe.html>
- Comisión Estatal de Servicio Públicos de Ensenada CESPE (2012b). Adquisiciones y servicios 2012. Recuperado de <http://www.transparenciabc.gob.mx/portal/areas/paraestatales/cespe.html>
- Comisión Estatal de Servicio Públicos de Ensenada CESPE (2013). Datos sobre infraestructura. Recuperado de <http://www.cespe.gob.mx/?id=infraestructura>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2011). Agenda del agua 2030. p. 70.
- Daguer, G. (2004, 29-31 de octubre). *Gestión de biosólidos en Colombia*. En: Congreso internacional ACODAL sociedad, ambiente y futuro. Memorias. Santiago de Cali.
- Diario Oficial de la Federación de México (DOF) (2012). Parámetros de estimación de vida útil. Recuperado de [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5264340&fecha=15/08/2012](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5264340&fecha=15/08/2012)
- Duque, D., Galeano, U., y Mantilla, G. (2006). Evaluación de un digestor tipo "Plug Flow". Recuperado de <http://www.lrrd.org/lrrd18/4/duqu18049.htm>.
- Empresa ACZIA (2012). Información Técnica sobre la vida útil de plantas de biogás. Recuperado de <http://www.aczia-biogas.es>
- Gilroyed, B. H., Reuter, T., Chu, A., Hao, X., Xu, W., y McAllister, T.A. (2010). Anaerobic digestion of specified risk materials with cattle manure for biogas production. *Bioresource Technology*. 101, 5780-5785.
- Grupo Aqua Limpia. (2011). Información Técnica de moto generadores para combustión de metano. Recuperado de <http://www.aqualimpia.com>. 04/11/2011.
- Hoof, B., Monroy, N., y Saer, A. (2008). Producción más limpia. México, D.F: Editorial Alfaomega.
- Instituto Nacional de Ecología (INE) (2006). Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero. Instituto Nacional de Ecología. p. 50.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI. (2012). Estadísticas y censo poblacional. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/>
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). (2012). Programa de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua, Horizonte 2030. México, D.F. p. 57.
- Jiménez, B., y Wang, L. (2006). Sludge Treatment and Management. En: IWA Publishing (Ed). *Municipal Waste Water Management in Developing Countries: Principles and Engineering* (pp. 237-292). Londres, UK.
- Jiménez, B. (2011). Latin America: Mexico. En: L. Spinosa (Ed). *Wastewater sludge: a global overview of the current status and future prospects* (pp. 47-50). Londres, UK.
- McDougall, F., White, P., Franke, M., y Hindle, P. (2003). Integrated solid waste management: a Life Cycle Inventory. Berlin, Alemania: Editorial Blackwell Science.
- Mahamud, M., y Gutiérrez, A. (1996). Biosólidos generados en la depuración de aguas (I): Planteamiento del problema. *Ingeniería del Agua*. 3(2), 47-62.
- Malik, S., y Bharti, U. (2009). Biogas production from Sludge of Sewage Treatment Plant at Haridwar. *Asian J. Exp. Sci.* 23(1), 95-98.
- Mantilla, G., Chacón, J., y Moeller, G. (2008). Emisiones de gas de efecto invernadero: Aportes generados por el tratamiento y descarga de aguas residuales domésticas en México. En: Memorias, XXXI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Santiago, Chile.
- Onyeche, T. (2010). Economic benefits of low pressure sludge homogenization for wastewater treatment plants. *CUTEC-Institute GMBH*. 1, 417-422.
- Perilhon, C., Alkadee, D., Descombes, G., y Lacour, S. (2012). Life cycle assessment applied to electricity generation from renewable biomass. *Energy Procedia*. 18, 165-176.
- Programa de las naciones unidas para los asentamientos humanos, Comisión Canadiense para el manejo de lodos y Comisión de alcantarillado y lodos residuales (UN-HABITAT) (2008). Global atlas of excreta, wastewater sludge, and biosolids management: moving forward the sustainable and

welcome uses of a global resource. 2a ed. United Nations Human Settlements Programme. New Brunswick, Canada.

Renner, R. (2002). NRC targets pathogens in sludge for research. *Environmental Science & Technology*. Recuperado de <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es022404s>

Snyman, H.; Alexander, W. and Marx, C. (2000). Land disposal and agricultural reuse of sewage sludge within the framework of the current south african guidelines. En: Memorias, WISA 2000 Biennial Conference. Sun City, South Africa.

Universidad de las Américas Puebla (UDLAP) (2007). Evaluación de riesgos. Recuperado de [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/mgc/solismj/capitulo4.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/mgc/solismj/capitulo4.pdf).