

**UNIVERSIDAD METROPOLITANA
ESCUELA GRADUADA DE ASUNTOS AMBIENTALES
SAN JUAN, PUERTO RICO**

**PLAN PARA EL DESARROLLO DE UNA PLANTA DE GAS NATURAL LÍQUIDO EN
EL SISTEMA DE RELLENO SANITARIO DE PONCE, PUERTO RICO**

Requisito parcial para la obtención del
Grado de Maestría en Planificación
en Planificación Ambiental

Por
Agustín Moreno Muñoz

1 de diciembre de 2010

DEDICATORIA

*A Dios por las oportunidades que la vida me
ha brindado y por enseñarme lo que es al amor universal.
A toda mi familia por ser el pilar donde se apoyan todos mis logros.
“El incremento en la productividad de los recursos
será el sello de la Próxima Revolución Industrial”
Paul Hawken*

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a mi comité de tesis, a mi mentor el Dr. Ervin Martínez y a mis lectores el Dr. Carlos Padín y al Dr. Santos Rohena por creer en este proyecto, por su valioso tiempo y por haberme brindado el apoyo necesario para lograrlo. También quiero agradecer la gran ayuda brindada por el Sr. Robert Simkins, Director del Burlington County Eco-Complex en el Estado de New Jersey, por ofrecerme información técnica basada en sus 25 años de experiencia. Al Sr. Timothy Logan de la firma SCS Ingenieros por su apoyo técnico con la interpretación del modelo de gas.

También quiero agradecer a todos los que de una manera u otra me ayudaron y me brindaron apoyo e información necesaria y útil para la culminación de este proyecto como: Oscar Cedeño de la firma EcoEléctrica; Vivian Pérez y Marjorie Rey de la Autoridad de Desperdicios Sólidos; Eduardo González y Myrek Núñez de la Agencia de Protección Ambiental; Chad Ireland y Rick Rickert de la firma consultora Golder y Asociados; y Efraín Camis, Marcos Elizondo, John Wong y Scott Trebus de la compañía Republic Services, operadora del SRS Ponce.

Por último y no menos importante quiero agradecer a mi familia, a mi esposa Rita Mariela y mi hija Estela Cecilia por ser la inspiración de mi vida, por su incondicional apoyo y por su infinito esfuerzo. A mi Madre Juana M. Muñoz, maestra de escuela intermedia por más de 25 años, y a mi Padre Agustín B. Moreno porque ambos me enseñaron lo que significa compromiso y dedicación al trabajo. A todos muchas gracias.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE APÉNDICES.....	viii
LISTA DE ABREVIATURAS.....	ix
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT.....	xii
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
Trasfondo del problema.....	1
Problema de planificación.....	5
Justificación del proyecto.....	9
Meta y objetivos.....	14
CAPÍTULO II: REVISIÓN DE LITERATURA.....	15
Trasfondo histórico del manejo de los desperdicios.....	15
Desarrollo sustentable.....	17
Sistema de relleno sanitario.....	22
Sistema de relleno sanitario bioreactor.....	29
Generación y recuperación de biogas o LFG en los sistemas de relleno sanitario.....	37
Producción de combustible a base de metano líquido proveniente del gas de un sistema de relleno sanitario (proyecto LFG a LNG).....	40
Marco legal.....	44
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....	53
Área de estudio.....	53
Objetivos.....	54
Análisis físico espacial del Sistema de Relleno Sanitario Ponce.....	58
Estudio de caso.....	58
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DEL PROBLEMA.....	60
Estimado del volumen de biogas que será producido a través de la vida del SRS de Ponce y resultado del rendimiento equivalente de gas natural líquido o LNG como producto.....	60
Determinación del periodo de repago sobre la inversión de capital.....	61
Distribución del terreno disponible para futuro desarrollo.....	63
Resultados operacionales del estudio de caso Sistema de Relleno Sanitario Bioreactor de Yolo County en el Estado de California.....	65
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	68
Conclusiones.....	68
Limitaciones.....	69
Recomendaciones.....	71

CAPÍTULO VI: ESTRATEGIAS Y PLAN DE ACCIÓN	72
Estrategias para implementar el uso de la tecnología que transforma el LFG	72
Estrategias para diseñar, construir y operar las celdas RCRA Sub-D como bioreactor.....	74
Estrategias para comercializar el producto principal LNG	78
Matriz de estrategias para el Sistema de Relleno Sanitario Ponce.....	80
LITERATURA CITADA.....	82

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Distribución regional de instalaciones que procesan desperdicios sólidos no peligrosos en Estados Unidos	89
Tabla 2. Volumen anual estimado de generación de LFG y potencial producción de combustible LNG	90
Tabla 3. Análisis financiero para calcular el periodo de repago sobre la inversión de capital.....	91
Tabla 4. Volumen diario y anual de ventas estimadas	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Pico de generación en la producción estimada de LNG en galones por día. ..	94
Figura 2. Foto aérea del Sistema de Relleno Sanitario Ponce.....	95
Figura 3. Foto aérea que demuestra distancia lineal entre SRS Ponce y EcoEléctricaEcoEléctrica.....	96

LISTA DE APÉNDICES

Apéndice 1. Modelo LandGEM para el Sistema de Relleno Sanitario Ponce.....	98
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS

ADS	Autoridad de Desperdicios Sólidos
BAT	Mejor tecnología disponible
Btu	Unidad termal británica
CAA	Ley Federal de Aire Limpio
CFR	Código Federal de Regulaciones
CH ₄	Metano
CNG	Gas natural comprimido
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
CWA	Ley Federal de Agua Limpia
DS	Desperdicios sólidos
EEUU	Estados Unidos de América
EPA	Agencia Federal de Protección Ambiental
FML	Revestimiento de membrana flexible
gal	Galón de LNG
GCCS	Sistema de colección y control de gases
GI	Gas invernadero
GLER	Evaluación y reporte sobre el revestimiento geosintético
GWP	Potencial de calentamiento global
HAP	Contaminante peligroso del aire
HDDT	Camiones diesel de alto rendimiento
HDPE	Polietileno de alta densidad
H ₂ S	Sulfuro de hidrogeno
JCA	Junta de Calidad Ambiental
LFG	Gas proveniente de un sistema de relleno
LNG	Gas natural líquido
MmBtu	Millón de unidad termal británica
MSW	Desperdicios sólidos domestico-municipales
NEPA	Ley Nacional de Política Ambiental

NO _x	Óxidos de nitrógeno
NOAA	Administración Nacional de Oceanografía y Atmosfera
O ₂	Oxígeno
PM	Materia particulada
PR	Puerto Rico
RCRA	Ley Federal de Conservación y Recuperación de Recursos
RRA	Ley Federal de Recuperación de Recursos
scfm	Pie cubico estándar por minuto
SLER	Evaluación y reporte sobre el revestimiento arcilloso
SOP	Plan de operación de la instalación
SO _x	Óxidos de azufre
SR	Sistema de relleno
SRC	Sistema de revestimiento compuesto
SRS	Sistema de relleno sanitario
SRSB	Sistema de relleno sanitario bioreactor
Sub-D	Subtitulo D de la Ley Federal RCRA
SWANA	Asociación de Desperdicios Sólidos de Norte América
SWDA	Ley Federal para la Disposición de Desperdicios Sólidos
TPD	Toneladas por día
VOC	Compuestos orgánicos volátiles

RESUMEN

Los sistemas de relleno sanitarios son lugares necesarios y ambientalmente complejos a la misma vez. La descomposición orgánica en estos sistemas genera un gas que contribuye a la contaminación de la atmosfera. El sistema de colección y control de gas requerido por el Subtitulo D de la Ley Federal de Conservación y Recuperación de Recursos vigente controla de forma parcial e ineficiente los gases vertidos a la atmosfera en especial el gas metano considerado gas de invernadero. El Sistema de Relleno Sanitario Ponce comienza a instalar la primera fase de su sistema de colección y control de gas cumpliendo con los requisitos de la Ley RCRA. Sin embargo, las tecnologías modernas y los conocimientos y mercados desarrollados durante los últimos años hacen atractiva la posibilidad de convertir el SRS Ponce en un sistema bioreactor donde la generación, recuperación, transformación y comercialización del gas pudiese representar una oportunidad económica mientras se minimizan las emisiones y el daño ambiental. La cogeneradora de electricidad EcoEléctrica de Puerto Rico está ubicada a menos de siete millas lineales del SRS Ponce, opera un terminal diseñado para recibir, almacenar y utilizar gas natural líquido para la generación de electricidad y potencialmente podría comprar el 100% de la producción de LNG. Por esto, es sumamente necesaria la preparación de un plan que proponga y describa, utilizando los conceptos de eficiencia y desarrollo sustentable, el desarrollo de una planta de gas natural líquido en el SRS Ponce. Luego de hacer un análisis físico espacial del área de estudio, estimamos el volumen de gas que será generado por 140 años utilizando un modelo matemático llamado LandGEM. Los resultados de este modelo fueron utilizados para evaluar la viabilidad económica de este proyecto aplicando el concepto económico de periodo de repago. También, analizamos los resultados de un estudio de caso en un sistema de relleno sanitario en el Estado de California. El análisis físico espacial y los resultados operacionales del estudio de caso demostraron que el SRS Ponce tiene potencial para ser operado como un sistema bioreactor y comercializar el gas que genera. Los resultados del modelo LandGEM revelaron la posibilidad de producir combustible LNG de forma rentable por un periodo de aproximadamente 65 años mientras el periodo de repago se estimó en 4.52 años, tiempo aceptable dentro de la empresa privada para recuperar su inversión. La distancia relativamente corta entre el SRS Ponce y EcoEléctrica de Puerto Rico hace atractiva la integración de ambas industrias a través de la compraventa del combustible producido mientras ambas industrias mejoran su eficiencia e incrementan la productividad de sus recursos.

ABSTRACT

Sanitary landfills are necessary but environmentally complex systems. Organic decomposition generates gas that contributes to atmospheric contamination. The Subtitle D from the Resource Conservation and Recovery Act requires the installation of a gas collection and control system. These systems control in a partial and inefficient manner the emissions to the atmosphere, especially methane gas, a greenhouse gas. Ponce Landfill just started the installation of their first gas collection and control system in compliance with RCRA. However, the new technologies and knowledge obtained from developing markets during recent years makes attractive the possibility to turn Ponce Landfill into a bioreactor landfill where gas generation, collection, transformation and commercialization represents a unique economic opportunity while minimizing the emissions and associated environmental damages. EcoElectrica Puerto Rico is a power company located less than seven linear miles from Ponce Landfill and operates a terminal designed to receive, store, and use liquefied natural gas as fuel for power generation. EcoElectrica could buy a 100% of the LNG production. This is why it is necessary to prepare a plan that proposes and describes, applying the concepts of efficiency and sustainable development, the development of a liquefied natural gas plant in Ponce Landfill. After evaluating the spatial analysis made to the study area, we estimated the gas volumes that will be generated for a period of 140 years using a software called LandGEM. Using the results from the LandGEM model we evaluated the project's economic feasibility using the payback period economic concept and analyzed the results from a case study in a sanitary landfill in the State of California. The spatial analysis as well as the operational results from the case study demonstrated that Ponce Landfill has the potential to be operated as a bioreactor landfill and commercialize the generated gas. The results obtained from the LandGEM model revealed the possibility of producing LNG fuel in a profitable manner for a period of approximately 65 years while the payback period was estimated in 4.52 years, acceptable time inside the private sector for the return on investment. Also, the relative short distance between Ponce Landfill and EcoElectrica Puerto Rico makes attractive the integration of two industries throughout the commercial exchange of LNG fuel while both industries improve their efficiency and increase their resources productivity.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Trasfondo del problema

Las experiencias adquiridas durante el pasado siglo XX han demostrado de forma contundente que las prácticas y técnicas tradicionales aplicadas a los sistemas de manejo de desperdicios sólidos no han sido suficientes para asegurar una protección adecuada a la salud pública y al medio ambiente. El manejo ineficiente de los desperdicios sólidos (DS) y la construcción inadecuada de estos sistemas pueden tener como resultado la contaminación de los cuerpos de agua y del aire entre otros diversos factores. Todo Sistema de Relleno (SR) en Puerto Rico (PR) presenta una serie de retos que deben ser manejados adecuadamente en las fases de planificación, diseño, construcción, operación y cierre para asegurar la preservación de la salud pública y que el impacto en el ambiente sea mínimo (Nazario, 2003).

Hoy en el año 2010, ninguno de estos sistemas en PR cumple en su totalidad con la compleja gama de regulaciones que estos predios confrontan por ser sistemas ambientalmente complejos. Esto debido a que su operación está directamente relacionada con múltiples dimensiones ambientales que si no son manejadas adecuadamente podrían representar un riesgo de contaminación a la salud humana y/o al ambiente. En la mayoría de los casos se puede atribuir o relacionar la falta de cumplimiento en estos predios a los altos costos operacionales que los controles ambientales representan para estos sistemas y que en algunos casos puede amenazar la costo-efectividad de los mismos. Los administradores de estos sistemas, ya sean municipios o compañías privadas, en muchas ocasiones optan por operar estos

sistemas al margen del cumplimiento hasta tanto las autoridades gubernamentales les hagan cumplir con toda la fuerza de la ley estos reglamentos.

Según Tchobanoglous & Kreith (2002), un Sistema de Relleno Sanitario (SRS) es un método creado por la ingeniería para disponer los desperdicios sólidos en el suelo en una forma que protege la salud humana y el ambiente. Aceptando esta premisa como cierta, primero hay que diferenciar y nombrar adecuadamente los sistemas de manejo de desperdicios sólidos en Puerto Rico.

- Vertederos . son los primeros sistemas donde se permitía la disposición de los desperdicios, peligrosos y no peligrosos, en el suelo. También se permitía la quema abierta al aire libre y no se contemplaba la cubierta diaria con tierra.
- Sistemas de Relleno - en los años 1970s la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por su siglas en inglés) propuso que los llamados vertederos comenzaran a cubrir los desperdicios diariamente con tierra con el propósito de evitar los olores objetables, los riesgos de explosión o fuego y la propagación de vectores y enfermedades.
- Sistemas de Relleno Sanitario . son los sistemas modernos que existen hoy día y que tienen la obligación de cumplir con el programa Subtitulo D establecido por la Ley Federal de Conservación y Recuperación de Recursos (RCRA, por sus siglas en inglés) tras su enmienda e implementación en el año 1993. Este programa Subtitulo D establece en forma de Estatuto, y con el objetivo principal de proteger la salud pública y el ambiente, una extensa y compleja serie de requisitos de planificación, diseño, ingeniería, construcción, operación y procesos de cierre y post-cierre que aplica a los

sistemas de relleno que han obtenido un permiso de expansión lateral o nuevos sistemas que fueron o serán construidos después del 9 de octubre de 1993. Dentro de la amplia gama que agrupa a estos requisitos podemos identificar tres áreas sumamente importantes y pertinentes para este proyecto que son: el control de gases, el control de lixiviados y los parámetros para la cubierta diaria, intermedia y final.

También, los desperdicios sólidos se clasifican generalmente como peligrosos y no peligrosos. En este proyecto, por razones de conveniencia, la palabra desperdicios sólidos será utilizada refiriéndose específicamente a los desperdicios sólidos no peligrosos ya que los desperdicios sólidos peligrosos entran en otra categoría bajo la Ley RCRA y estos no serán considerados en este trabajo.

El Sistema de Relleno Sanitario de Ponce, ubicado en la ciudad de Ponce PR y foco principal de este estudio, abrió sus puertas por primera vez en el año 1965. Por ende, este sistema ha operado como cada uno de los sistemas mencionados anteriormente. Su evolución ha trascendido desde operar como un vertedero hasta operar como un Sistema de Relleno Sanitario. En los años 1960s este sistema recibía desperdicios peligrosos y practicaba la quema al aire libre. En los años 1970s comenzó a practicar la cubierta diaria. Hoy, este sistema opera bajo las regulaciones establecidas por el Subtitulo D de la Ley RCRA vigente (RCRA Sub-D) y lucha diariamente por cumplir a cabalidad con esta compleja gama de regulaciones. Actualmente, y como parte de los requisitos de RCRA Sub-D, el SRS Ponce planea instalar su primer sistema de colección y control de gases (GCCS, por sus siglas en inglés). Sin embargo, el sistema en consideración, aunque cumple con los estándares RCRA Sub-D, no es el más eficiente en términos ambientales y económicos.

Podemos identificar el aumento significativo y continuo de la acumulación y disposición de los DS como una problemática social-ambiental que principalmente surge como consecuencia de la Revolución Industrial a mediados del siglo XIX. Esta revolución trajo cambios en el comportamiento social y en el desarrollo económico que explican el aumento vertiginoso en la generación y disposición de los DS. Los factores más significativos para el aumento de estos son: aumento de la población, desarrollo económico y cultura. Los efectos inmediatos y futuros de estos factores se observan particularmente en los países desarrollados como también en los países en vías de desarrollo. Este crecimiento desmesurado en la producción de desperdicios, desafortunadamente, no compara con el nivel de crecimiento en el campo del manejo de los mismos desperdicios (Rohena, 2006). Si comparamos la generación de los DS a través del tiempo podemos darnos cuenta de este incremento. En el año 1970 en Puerto Rico se generaron 1.92 millones de toneladas de DS (Junta de Calidad Ambiental y Departamento de Salud de Puerto Rico, 1971) comparado con el año 2003 que se generaron 3.60 millones de toneladas (Autoridad de Desperdicios Sólidos, 2003). Esta simple comparación demuestra que la generación de DS en Puerto Rico incrementó casi el doble (47%) en un periodo de prácticamente 30 años.

El desarrollo urbano e industrial que ha experimentado la isla de PR en los últimos años, sumado a la mentalidad consumista adoptada de los países desarrollados, ha tenido como consecuencia un crecimiento constante en la cantidad y variedad de los desperdicios sólidos. La composición de los desperdicios sólidos municipales (MSW, por sus siglas en inglés) varía de acuerdo a la fuente. Sin embargo, en todos los casos el material orgánico y vegetativo son los mayores componentes dentro de estos desperdicios.. Solo una pequeña parte de los desperdicios generados

termina en las plantas de reciclaje o de composta, el resto termina enterrado en los SR locales. Por esto, no hay duda que los SR o SRS terminan siendo el medio más importante para el manejo de los DS en PR. Esta situación obliga a Puerto Rico a adoptar medidas sanitarias responsables que en todo momento busquen la protección de la salud pública, ambiental y económica (Nazario, 2003).

En la actualidad existe una nueva manera global de visualizar los DS y los lugares donde la mayoría de estos están siendo depositados, los sistemas de relleno. En Puerto Rico esta nueva visión se resume en un titular de un periódico local - ~~la~~ ~~basura~~ no es basura ~~ya~~+ refiriéndose a la amplia y ascendente oportunidad que tienen los DS para ser comercializados a través de diferentes métodos o vías. De acuerdo con el Profesor de Ingeniería Civil de la Universidad de Toronto David Bagley citamos, ~~nos~~ estamos moviendo hacia un futuro donde podemos ver nuestros desperdicios como recursos+. Algunos ejemplos probados de mercados establecidos con programas de comercialización económicamente exitosos pueden ser el mercado de reciclaje y aún uno más joven, pero con una demanda en continuo crecimiento, el de energía o combustible extraído de los SR en forma de biogás.

Problema de planificación

Los SRS, incluyendo el SRS Ponce, son lugares necesarios y ambientalmente complejos a la misma vez. La descomposición orgánica en estos sistemas genera grandes cantidades de gas y las emisiones del mismo han sido históricamente grandes contribuyentes de contaminantes vertidos a la atmosfera. El Subtitulo D de la ley RCRA vigente requiere la instalación y utilización de un sistema para la colección y el control de gases. Este sistema requerido por ley, básicamente colecta el gas y lo dirige a una

cámara de combustión donde el gas es incendiado a altas temperaturas en forma de llamarada. Este proceso de combustión puede controlar eficientemente los riesgos de fuego, explosión y los olores objetables pero controla de forma parcial e ineficiente los contaminantes vertidos a la atmósfera en especial el gas metano, un gas de invernadero potente asociado al calentamiento global. El sistema GCCS que actualmente considera instalar el SRS Ponce cumple con los requisitos mínimos del RCRA Sub-D. Sin embargo, las tecnologías modernas y los conocimientos y mercados desarrollados a través del tiempo hacen atractiva la posibilidad de convertir estos predios en bioreactores donde la generación, recuperación y comercialización del gas representa una oportunidad económica mientras se minimizan las emisiones y el daño ambiental.

Los SR y SRS son áreas críticas para el control de gases de invernadero (GI) como lo es el gas metano (CH_4) y el dióxido de carbono (CO_2). Las emisiones producidas por los SR alrededor del mundo son responsables de cerca del 10% de las emisiones hacia la atmósfera del CH_4 antropogénico total y por lo tanto son una gran fuente de emisiones de gases de invernadero (Bogner, Meadows & Repa, 1998). El CH_4 , en conjunto con el CO_2 , son gases de invernadero que son generados de forma natural como producto de la descomposición de los materiales depositados en los SR, especialmente los materiales orgánicos. Un alto por ciento de los DS, especialmente los MSW, está compuesto por material orgánico que con el tiempo se descomponen, se volatilizan y a través de reacciones químicas se generan de forma natural cantidades significativas de gas siendo los de mayor concentración el CH_4 y el CO_2 . El CO_2 y el CH_4 liberado en los SR son GI que contribuyen significativamente al calentamiento global (Ferrey, 2007). Las emisiones de GI pueden ser incrementadas por la fuga

descontrolada de gas metano debido a la disposición impropia de los residuos orgánicos en los grandes SR (Al-Dabbas, 1998).

Se estima que en los Estados Unidos de Norteamérica (EEUU) se vierten a la atmósfera de 412 a 613 billones de pies cúbicos de CH₄ anualmente (EPA, 2006). Esta cantidad de metano, recuperado de forma eficiente, podría producir hasta 4,000 megavatios de electricidad, suficiente para energizar tres millones de hogares (EPA, 2006). En el plano internacional, y como iniciativa de los Estados Unidos de Norteamérica, los EEUU y otros 17 países firmaron una alianza en julio del 2004 llamada *Methane to Markets* para trabajar en conjunto con la recuperación de las emisiones de gas metano, responsable del 16% de las emisiones ligadas al calentamiento global, y promover la producción de energía limpia. La meta de este acuerdo es capturar nueve millones de toneladas de gas metano para el año 2015 (Goldstein, 2004).

Muchas de las instalaciones de SRS carecen de los recursos vitales tales como: equipos adecuados; personal capacitado; buena planificación; diseño apropiado; e infraestructura básica para el control ambiental y para maximizar la operación y el uso de los terrenos disponibles en cumplimiento con las reglamentaciones vigentes (Nazario, 2003). Estas instalaciones pueden ser mejor manejadas gracias a los desarrollos tecnológicos recientes, las reglamentaciones vigentes y los mercados que se han desarrollado alrededor de tan dinámica industria que obligan en todo momento a maximizar los recursos disponibles.

En la actualidad, podemos identificar dos sistemas de control de gases utilizados comúnmente dentro de los SRS: sistema pasivo y sistema activo. Dentro del sistema activo existen tres formas principales para disponer los gases generados en los SRS

luego de ser recolectados. La primera y más común es un sistema de llama abierta (*flare*) en el cual el gas pasa por un proceso de combustión a altas temperaturas y es liberado al aire sin ningún tipo de aprovechamiento posterior. Este sistema controla parcialmente algunos contaminantes del aire como los compuestos orgánicos volátiles, los olores objetables y los riesgos de fuego y explosión pero no controla eficientemente las emisiones de GI a la atmosfera. Además, representa una pérdida significativa de un recurso de energía y una falta de responsabilidad ambiental y operacional de parte de los dueños y operadores de los SRS (Gongaware, Barclay, Barclay & Skrzykowski, 2004). La segunda opción dentro de los sistemas activos es utilizar el gas para aplicaciones de energía, en la mayoría de los casos eléctrica, utilizando tecnologías sencillas que convierten el gas proveniente de un sistema de relleno (LFG, por sus siglas en inglés) a gas natural de bajo contenido de unidad termal británica (BTU). La tercera opción, es la producción de gas natural líquido o comprimido (LNG o CNG, por sus siglas en inglés respectivas) o también conocido como metano líquido.

La producción de combustible LNG como producto tras el procesamiento del LFG es la opción menos común pero con el mayor potencial de desarrollo para el SRS Ponce. En este proceso el LNG termina siendo un producto equivalente al combustible diesel con la gran diferencia que su producción trae consigo unas ventajas económicas, ambientales y sociales significativas, especialmente por el potencial de demanda al ser un producto sustitutivo al combustible diesel y por las bajas emisiones generadas luego de su combustión.

En resumen, la recuperación y transformación del LFG proveniente del SRS Ponce para su conversión y eventual comercialización como combustible LNG, no solo representa una oportunidad económica para los dueños y operadores de estos

sistemas, también representa una reducción significativa de contaminantes vertidos a la atmosfera y un modelo de economía inteligente que impactará positivamente la región. De esta manera podemos resolver el problema de planificación y el dilema de necesidad versus contaminación armonizando las dimensiones sociales, ambientales y económicas.

Justificación del proyecto

El SRS Ponce actualmente se prepara para instalar su primer sistema de recolección y control de gas en sus celdas. El sistema actualmente en consideración es el sistema convencional de combustión y quema del gas, sistema de procesamiento mínimo requerido por RCRA Sub-D. Este método no controla eficientemente las emisiones de gases de invernadero y por ende contamina la atmosfera. El gas producto del SRS Ponce presenta un potencial para ser convertido a LNG.

Por otro lado, la cogeneradora de electricidad EcoEléctricaEcoEléctrica de Puerto Rico ubicada a menos de 7 millas lineales del SRS Ponce, es uno de los ocho puertos en todos los EEUU diseñado para recibir, almacenar y utilizar el LNG como combustible para la generación de electricidad. Actualmente EcoEléctrica importa el combustible LNG proveniente de la isla de Trinidad y Tobago en unos barcos tanqueros especialmente diseñados para el transporte de este combustible. Entonces, tenemos dos operaciones diametralmente distintas con el potencial de intercambiar un producto en común, el LNG. Esto representa una oportunidad única para que ambas industrias puedan ser integradas mientras la región se beneficia de las ventajas sociales, ambientales y económicas que resultan de esta integración.

Por esto, es sumamente necesaria la preparación de un plan que proponga, utilizando los conceptos de eficiencia y sostenibilidad, la integración del gas proveniente del SRS Ponce a las operaciones de la cogeneradora EcoEléctrica. De esta manera podemos aportar a la reducción de la alta dependencia de los combustibles fósiles en PR, los daños que estos causan a la salud pública y al ambiente, y se reduce de manera significativa las emisiones de gases de invernadero que promueven el calentamiento global mientras se promueve una actividad económica local que produciría empleos directos e indirectos como resultado de la producción y compra-venta del combustible.

Es un hecho que el consumo de energía ha incrementado sustancialmente alrededor del mundo en los pasados años y se proyecta que este comportamiento continúe indefinidamente hacia el futuro. Puerto Rico no es la excepción. La fuente principal de energía para PR son los combustibles convencionales derivados del petróleo. El impacto negativo más evidente por el uso de estos combustibles convencionales son el calentamiento global, pobre calidad de aire y efectos adversos a la salud pública (Zietsman et al., 2008). Todo esto ha despertado un nuevo interés por explorar los combustibles alternativos y dentro de estos se encuentra la posibilidad de convertir el LFG, regularmente quemado y vertido al aire sin ningún aprovechamiento posterior, en un recurso de combustible renovable ~~verde~~ y atractivo por su potencial económico y su combustión limpia. ~~Los~~ usuarios de combustibles a base de petróleo y los de gas natural que están en aumento andan buscando alternativas costo efectivas al combustible. El LFG es un sustituto popular y viable para estos combustibles. Muchas compañías están implementando exitosamente los productos convertidos del LFG+ (Hansen, 2006).

El LFG es un gas no convencional que puede ser muy versátil. El mismo puede ser transformado a combustible tipo gas natural comprimido (CNG, por sus siglas en inglés) o gas natural líquido (LNG). El gas natural es una de las más útiles, limpias y eficientes formas de energía y es un componente vital en el suministro energético mundial. Con el propósito de hacer más conveniente su almacenamiento y transportación, el gas natural es refinado y condensado en un líquido llamado LNG (Cheng, Lin, Hsu & Shu, 2009).

Los nuevos y renovables sistemas de recursos energéticos ofrecen prospectos atractivos porque son libres de contaminantes, ilimitados y baratos (Akinbami, 2001). Cada día más compañías multinacionales, nacionales y locales despiertan su interés por mercadear su conciencia ambiental y exigen que sus operaciones, internas, externas o sub-contratadas, cumplan con los más altos estándares de eficiencia de modo que puedan reducir el impacto ambiental que estas operaciones generan a la misma vez que incrementan su ventaja competitiva. Algunos expertos utilizan el término de eco-ventaja asegurando que ~~el~~ el mercadeo de la conciencia ambiental y las compañías vendiendo su compromiso con el movimiento verde crea valor, incrementa la ventaja competitiva y es un retorno seguro a la inversión+(Esty & Winston, 2006).

A pesar de que los SRS son lugares altamente contaminados y ambientalmente complejos, también pueden ser lugares con un gran potencial para el desarrollo de energía renovable si los mismos se planifican y se manejan basado en los conceptos de eficiencia. Es posible ver a los SRS a través de un nuevo lente: como áreas dotadas para el desarrollo potencial de energía renovable que pueden ser magnetos para la adquisición de incentivos (Ferrey, 2007). Estos incentivos pueden ir desde créditos

contributivos hasta preferencias para financiamiento e incentivos económicos entre otros.

Los SRS son sistemas muy importantes al momento de discutir el tema de los gases de invernaderos y el calentamiento global. Se sabe que los gases producidos por la descomposición orgánica dentro de los SRS son en su gran mayoría CH₄ y CO₂. Ambos gases son grandes contribuyentes a la problemática del calentamiento global. Se estima que el CH₄ tiene 23 veces más potencial de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés) que el CO₂ sobre un periodo de 100 años (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001). Sin embargo, ambos gases tienen el potencial para aplicaciones útiles y limpias que promueven el manejo eficiente de los DS. El manejo efectivo de los MSW se ha convertido en una gran preocupación social y ambiental (Erses & Onay, 2003). Los estudios demuestran que, en términos de las emisiones de gases y en términos económicos, es más ventajoso tener un gran SRS que produzca energía del LFG en vez de tener muchos y pequeños SRS a pesar de la reducción significativa en transportación de los últimos (Wanichpongpan & Gheewala, 2007).

Según Gordon, Burdelski & Cannon (2003), las motivaciones principales para el uso LFG son variables. Entre ellas están las más comunes como: cumplimiento con regulaciones ambientales, ventajas económicas, mercadeo y relaciones públicas, y salud ocupacional.

Entonces, si adoptamos y ponemos en práctica los conocimientos que Europa y tienen sobre la transformación de los SRS en bio-reactores energéticos y lo aplicamos al SRS Ponce, podríamos promover en PR una actividad económica sustentable y ejemplar. La integración del LFG proveniente del SRS Ponce a la co-generadora EcoEléctrica resuelve diferentes dimensiones del problema de planificación como la

contaminación ambiental y los efectos del calentamiento global asociados a estas operaciones. Más aún, promueve un desarrollo económico inteligente que busca la promoción y generación de nuevos mercados que integran la comercialización de tecnologías y la conservación de los recursos desde una perspectiva de desarrollo sustentable.

Preguntas del proyecto de planificación

- ¿Sería realmente alcanzable y económicamente viable la implementación de tecnologías, prácticas y/o alternativas que permiten la comercialización del LFG a la misma vez que se minimiza el impacto ambiental y se promueve actividad económica?
- ¿Cuáles son las ventajas si implementamos estas tecnologías, prácticas y/o alternativas?
- ¿Cuáles son las desventajas si implementamos estas tecnologías, prácticas y/o alternativas?
- ¿Las ventajas se sobreponen a las desventajas en una forma económica y ambientalmente viable?
- ¿Existen leyes y/o reglamentos que apoyen e incentiven de alguna manera la implementación de estas tecnologías, prácticas y/o alternativas?

Meta

Desarrollar un plan para implementar una planta de gas natural líquido en el Sistema de Relleno Sanitario del Municipio de Ponce, PR.

Objetivos

1. Estimar el volumen de biogas que será producido a través de la vida del Sistema de Relleno Sanitario de Ponce para determinar el rendimiento equivalente de gas natural líquido o LNG como producto.
2. Evaluar el rendimiento de la producción de combustible LNG para determinar el tiempo de repago en la inversión de capital.
3. Determinar las estrategias para operar el SRS Ponce como un sistema bioreactor en las celdas por desarrollar.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

Trasfondo histórico del manejo de los desperdicios

Después de la Segunda Guerra Mundial la economía global se elevó significativamente, la producción de artículos de consumo y la natalidad incrementaron en muchas ciudades de Europa y América. Estos territorios experimentaron un crecimiento sustancial que trajo como resultado problemas para la disposición de los desperdicios. Esta nueva era de bonanza económica trajo nuevas industrias con nuevos productos y nuevos y más complicados desperdicios peligrosos. El resultado de todos estos cambios en la composición de los desperdicios fue un refinamiento en las tecnologías de disposición que trajo el desarrollo de nuevos estándares para el diseño de un sistema de relleno. A partir de todas estas nuevas preocupaciones por mejorar el sistema de manejo de los DS se crea la primera ley en 1965 llamada Ley para la Disposición de los Desperdicios Sólidos la cual describe métodos para la disposición de los desperdicios y autoriza fondos para programas estatales de manejo de desperdicios. Esta ley es la precursora de la Ley de Recuperación y Conservación de Recursos (RCRA, por sus siglas en inglés) aprobada en el 1976.

En 1971 un estudio hecho por la Junta de Calidad Ambiental describe el problema de los desperdicios sólidos en Puerto Rico y demuestra que ~~las~~ prácticas actuales para la recolección y disposición son inadecuadas+ (Junta de Calidad Ambiental, 1971). En 1988, un estudio de reconocimiento llevado a cabo por la Junta de Calidad Ambiental (JCA) reporta que de los 62 sistemas de relleno que operaban para aquel tiempo, un 27% o 17 de ellos habían sido encontrados deficientes a tal punto

que se convirtieron en candidatos para cierre y un 77% o 48 de ellos estaban operando deficientemente. Por otro lado, la Autoridad de Desperdicios Sólidos (ADS) reporta en 1989 que solo dos SR operaban eficientemente. También en 1988, el Centro de Energía e Investigación Ambiental de la Universidad de Puerto Rico, en un estudio llevado a cabo sobre los SR existentes, reporta que el 92% o 57 de ellos estaban operando deficientemente (Autoridad para el Manejo de los Desperdicios Sólidos, 1991). Estos números comprueban lo establecido en las primeras líneas de la introducción de este trabajo, ~~las~~ las experiencias adquiridas durante el pasado siglo XX han demostrado de forma contundente que las prácticas y técnicas tradicionales aplicadas a los SR no han sido suficientes para asegurar una protección adecuada a la salud pública y al medio ambiente+.

En octubre del año 1993 surge un avance muy importante. Esta fecha marca un nuevo giro para la industria del manejo de los desperdicios sólidos siendo la fecha límite para la implementación del conocido Subtitulo D de la ley RCRA para SRS nuevos o SR que tuviesen aprobada una expansión lateral y fueran a recibir DS de esta fecha en adelante. Esta sección de la ley RCRA requiere, entre otras cosas, que cada estado someta un plan para el manejo de los DS y establece los requisitos y estándares mínimos para la operación y el manejo de un SRS. Los requisitos más significativos y relevantes a este estudio establecidos en el RCRA Sub-D del Código de Regulaciones Federales (CFR, por sus siglas en inglés) son: la instalación de un sistema de control de lixiviados (CFR 40 258.26-27) mediante la utilización de una membrana geo-sintética impermeable, y la instalación de un sistema de recolección y control de gases (CFR 40 258.23-24).

Desarrollo sustentable

La planificación contemporánea debe ir dirigida en todo momento a resolver el conflicto utilizando bases que promuevan el desarrollo sustentable. La transición a la sustentabilidad va a requerir una nueva revolución industrial basada en nuevos conocimientos científicos y sofisticación tecnológica del más alto nivel. La protección ambiental, como es usualmente concebida, no puede resolver este problema por sí sola. Una modernización completa de nuestra infraestructura tecnológica será requerida para eliminar los desperdicios y la contaminación de forma que podamos aumentar la productividad de los recursos y cerrar el lazo de contaminación en los procesos industriales imitando a los procesos biológicos y naturales (Lovins & Lovins, 2005).

En el 1987, el Reporte de Brundtland, también conocido como Nuestro Futuro Común, es publicado por un panel internacional de políticos, civiles y expertos en desarrollo y ambiente. Este panel desarrolla la definición más utilizada actualmente para el término popular de desarrollo sustentable con el fin de alertar al mundo sobre la urgencia de progreso hacia un desarrollo económico sin disminución de los recursos naturales o daños al ambiente. El Reporte Brundtland define el desarrollo sustentable como el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la habilidad para que futuras generaciones puedan satisfacer sus propias necesidades. Aunque esta definición ha provocado diversas opiniones a través del tiempo, especialmente por la amplitud de sus términos, de ella se desprenden tres dimensiones o pilares intrínsecos que son generalmente considerados en la discusión del concepto desarrollo sustentable. Estos pilares son: crecimiento económico, justicia social y protección ambiental. Este reporte reconoce que, aunque el mantenimiento de estas

tres dimensiones puede llevarse a cabo de forma simultánea, esto podría requerir grandes cambios tecnológicos y de comportamiento social.

Scott Campbell, un profesor asistente de planificación urbana de la Universidad de Michigan, desarrolló un triángulo muy popular en la planificación contemporánea: el triángulo de prioridades para la planificación y los conflictos asociados. Este triángulo representa de forma visual las prioridades y conflictos que el planificador debe tener en cuenta cuando dirige sus esfuerzos hacia el desarrollo sustentable. Las esquinas del triángulo representan las tres prioridades: crecimiento económico, justicia social y protección ambiental. Mientras los lados del triángulo representan tres conflictos asociados: propiedad, desarrollo y recursos. La parcialidad a nivel profesional de cada planificador es definida por la ubicación de éste dentro del triángulo (Campbell, 1996). Campbell también define el centro del triángulo como la ~~%~~representación del desarrollo sustentable+. La sustentabilidad, redefinida e incorporada en un marco amplio de comprensión sobre los conflictos políticos en la sociedad industrial, puede convertirse en un principio de planificación útil y poderoso (Campbell, 1996). El papel del planificador es engranar los retos del desarrollo sustentable con una estrategia dual interactiva: (1) manejando y resolviendo el conflicto; y (2) promoviendo creativamente soluciones técnicas, arquitecturales e institucionales (Campbell, 1996).

Este proyecto de planificación utiliza como base fundamental los conceptos del desarrollo sustentable y atiende cada una de las prioridades asociadas a dicho concepto. Esto significa que las prioridades y conflictos discutidos son tomados en consideración y resueltos simultáneamente aplicando estrategias y planes de acción técnicos que buscan balancear al máximo estas prioridades y conflictos.

Crecimiento económico

Las estrategias propuestas en este proyecto para la recolección, control, procesamiento y transformación del biogas generado en el SRS Ponce incluyen la integración y comercialización del biogas convertido a combustible líquido a las operaciones de la co-generadora EcoEléctrica. La palabra comercialización representa un intercambio económico producto de la compra-venta. La comercialización del biogas generado en el SRS Ponce, una vez sea transformado en combustible LNG, tendrá la capacidad de aumentar ingresos y generar ganancias, requisitos básicos para cumplir con la prioridad de crecimiento económico a través del concepto de comercialización de tecnología. Este aumento en la capacidad de ingresos se dará a la par con el concepto de eficiencia definida como: obtener la mayor producción al menor costo posible. El biogás es un recurso energético indiscutiblemente comercializable y un producto de los procesos de manejo de desperdicios sólidos que está presente y disponible de forma gratuita en el SRS Ponce y por ley hay que controlarlo de una forma u otra. El método tradicional de combustión por llama cerrada, actualmente considerado para ser instalado, no representaría ningún beneficio económico para esta instalación, sus dueños u operadores. Todo lo contrario, representa una carga económica debido a los costos de mantenimiento del sistema mientras el recurso energético (biogás) se libera a la atmosfera sin ningún aprovechamiento posterior. Esto, además de causar daños al ambiente, viola los conceptos de eficiencia. Sin embargo, la captura, el procesamiento y la comercialización del mismo no sólo traerían múltiples beneficios económicos, sino ambientales y sociales también.

Protección ambiental

El sistema para la transformación de biogás a combustible LNG que se pretende proponer en este proyecto para ser instalado y operado en el SRS Ponce, y la integración del mismo a las operaciones de la co-generadora EcoEléctrica, también representa múltiples beneficios ambientales relacionados a la calidad de aire como por ejemplo la disminución de emisiones de contaminantes al mismo. La producción de un combustible alternativo ~~verde~~+ que sustituya a los combustibles convencionales es posible debido a la gran cantidad de biogas que los SRS generan y la gran demanda de combustible asociada a la industria de energía eléctrica. Los SRS y las plantas generadoras de electricidad convencionales que utilizan combustible fósiles para generar electricidad son operaciones totalmente distintas pero comparten algo en común, la gran cantidad de emisiones que ambas emiten al aire tales como: metano, dióxido de carbono, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre y materia particulada entre otros. Generalmente, los SRS y las generadoras de electricidad convencionales están ubicadas en zonas de no cumplimiento según los estándares federales para la calidad de aire. Sin embargo, las alternativas técnicas propuestas en este proyecto de planificación como lo es la transformación del LFG y su comercialización como Biometano líquido o LNG minimizan de forma significativa las emisiones de contaminantes al aire protegiendo este importante recurso en dos zonas particularmente catalogadas como zonas de no cumplimiento.

Justicia social

La actividad económica generada en conjunto con los beneficios ambientales, traen de la mano la justicia social. La actividad económica genera empleos directos e indirectos y promueve la economía local de una forma inteligente y sustentable mientras

los beneficios ambientales mejoran las condiciones ambientales y salubres del área. La producción y comercialización del LNG promueve una actividad económica que abre el acceso a los modos de producción en una forma sustentable e inteligente. Los empleos directos estarían relacionados a la operación de captura, limpieza, separación, transformación y producción del LNG y serían absorbidos por el SRS Ponce o la compañía que fuese subcontratada para ejercer esta operación dentro de los predios del SRS. Algunos ejemplos de los empleos indirectos estarían relacionados a la operación y mantenimiento de la planta productora, a la transportación y despacho del combustible y toda actividad económica que esta operación demanda. Por otro lado, los beneficios ambientales discutidos también proveen justicia social cuando las comunidades adyacentes a ambas instalaciones se ven beneficiadas por la mejora significativa en la calidad de aire previniendo potenciales problemas de salud que comúnmente son asociados a estos predios.

Solución de Conflictos

El desarrollo sustentable, utilizado como base esencial para el diseño de este plan, también resuelve cada uno de los conflictos asociados demostrando que la propuesta presentada en este proyecto se mantiene al centro del triángulo promoviendo la representación real de lo que es el desarrollo sustentable.

Entre las prioridades de crecimiento económico y justicia social tenemos el conflicto de propiedad donde se define el límite entre el interés privado y el bien común. El interés privado genera capital y ganancias como resultado de la comercialización del biogas mientras el bien común se satisface a través de la creación de empleos directos e indirectos y el fortalecimiento de la economía local en una forma inteligente y sustentable.

Por otro lado, entre las prioridades de crecimiento económico y protección ambiental tenemos el conflicto de recursos que define el límite entre la explotación y la conservación de estos. La explotación de recursos se minimiza cuando aprovechamos un recurso energético gratis, eficiente y disponible de forma natural en el SRS Ponce. La conservación de los abastos de petróleo y gas natural se promueve cuando se produce combustible como producto de los desperdicios sólidos dispuestos en el SRS.

Finalmente, entre las prioridades protección ambiental y justicia social tenemos el conflicto de desarrollo que define los límites entre la preservación del ambiente y la equidad social. La preservación del ambiente se alcanza cuando dos industrias altamente contaminantes se combinan eficientemente para mejorar la calidad del aire mediante la reducción significativa de sus emisiones. La equidad social se consigue cuando las comunidades adyacentes pueden ver una mejoría en la calidad de aire y la disminución en problemas de salud relacionados.

Sistema de relleno sanitario

En el primer capítulo definimos el sistema de relleno sanitario como un método creado por la ingeniería para disponer los desperdicios sólidos en el suelo en una forma que protege la salud humana y el ambiente (Tchobanoglous & Kreith, 2002). Más aún, los SRS son predios industriales muy organizados y su propósito principal es aislar los desperdicios del medio ambiental. Son lugares en donde se lleva a cabo una operación continua de construcción y movimiento de tierra en la cual los desperdicios sólidos son colocados y compactados en capas y donde se aplican una serie de controles ambientales para evitar la contaminación de los suelos, las aguas subterráneas y superficiales, y el aire.

Existen diferentes métodos para disponer los DS pero el SRS termina siendo el método más utilizado en EEUU y PR para la disposición final de los DS (Tabla 1). Aproximadamente 54% de los desperdicios sólidos municipales (MSW) generados en los Estados Unidos son dispuestos en los sistemas de relleno y el resto son manejados a través del reciclaje, composta y combustión (EPA, 2008). Este nivel de preferencia es atribuible a la sencillez y versatilidad de la tecnología utilizada para manejar estos sistemas. Las tecnologías aplicadas en los SRS actuales, además de evitar los riesgos de contaminación mencionados, también facilitan la operación para evitar molestias históricamente asociadas a estos predios como: olores objetables, población de vectores y riesgos de fuegos o explosiones. Esto no significa que los SRS están libres de representar riesgos de contaminación ambiental. Aún después de cerrados, el proceso de descomposición de los DS continúa y puede seguir generando grandes cantidades de lixiviados y gas metano que pudiesen representar un posible riesgo al ambiente (Bilitewski, 1994). Por eso es muy importante tomar en consideración estos factores a la hora de planificar, diseñar, operar y aplicar los controles ambientales dentro de un SRS.

Un SRS moderno es un sistema que ha sido diseñado y cumple con todos los estándares estipulados en RCRA Sub-D. Es un sistema muy distinto a los pasados sistemas de rellenos y los comúnmente llamados vertederos. La Parte 258 del Código de Regulaciones Federales nombrada como "criterios para los sistemas de relleno sanitario que aceptan desperdicios sólidos municipales" establece los criterios mínimos para la localización, operación y diseño de estos sistemas. Dentro de los criterios de diseño existen tres controles ambientales muy importantes que aplican específicamente a los SRS tipo MSW tras la implementación de las regulaciones RCRA Sub-D cuando

en octubre de 1993 entró en vigor la enmienda a la ley. Es aquí donde han surgido los cambios más significativos y donde las tecnologías se han desarrollado exponencialmente durante los pasados años. Básicamente estos criterios de diseño son los que diferencian a los SRS sobre los otros sistemas predecesores como los sistemas de relleno o vertederos. Estos controles ambientales son: sistema de revestimiento compuesto, sistema de colección de lixiviados y sistema de colección y control de gas.

Sistema de revestimiento compuesto

El sistema de revestimiento compuesto es un sistema que consiste de dos componentes: el componente superior y el componente inferior. El componente superior está compuesto por un material sintético llamado revestimiento de membrana flexible (FML, por sus siglas en inglés) y debe tener un espesor mínimo 60-mil de polietileno de alta densidad (HDPE) cuando 1-mil es igual a 0.001pulgadas o una milésima de pulgada. El componente inferior está compuesto por materiales naturales, generalmente tierra arcillosa compactada a un espesor mínimo de dos pies y con una conductividad hidráulica no mayor de 1×10^{-7} centímetros por segundos. Ambos componentes, superior e inferior, deben estar en contacto directo y uniforme entre sí. El propósito principal del sistema de revestimiento compuesto (SRC) es sellar o impermeabilizar la celda para evitar la contaminación de los subsuelos por la filtración de lixiviados. Para asegurar que el SRC cumpla con todos los estándares y especificaciones de protección, el operador tiene que someter al estado un documento de seguridad de calidad que revela las especificaciones del fabricante, las medidas tomadas de control de calidad, pruebas de calidad (durante y después de la instalación) y un documento de construcción finalizada. Como no existe un sistema de

revestimiento que pueda prevenir la migración de lixiviados, la localización de un SRS y los suelos existentes que éste tenga debajo se convierten en la barrera protectora a largo plazo. Por esto es muy importante tomar en consideración las características geológicas e hidrogeológicas del lugar cuando se propone la instalación de un SRS nuevo.

Sistema de colección de lixiviados

Uno de los propósitos principales en el diseño de un SRS es evitar la contaminación de los subsuelos y aguas subterráneas por contacto directo con los lixiviados. El sistema de revestimiento compuesto discutido en la sección anterior impermeabiliza e impide la filtración de los lixiviados al subsuelo. Por esto es necesario que los SRS estén equipados con un sistema de colección de lixiviados instalado arriba del revestimiento compuesto. Este sistema extrae el líquido depositado en el fondo de la celda disminuyendo la presión hidráulica que pueda ser ejercida en la base del revestimiento en un SRS.

Los lixiviados están definidos en RCRA como "líquido que ha pasado o emergido de los desperdicios sólidos y que contiene material soluble, suspendido o miscible extraído de los mismos desperdicios" (40 CFR 258.2). Este líquido está principalmente compuesto por la precipitación y por el contenido de humedad de los desperdicios depositados (Bilitewski, 1994). Las propiedades del lixiviado dependen de diferentes factores. Entre los más importantes se encuentra la clasificación de los desperdicios depositados, el grado de contacto con los desperdicios, el clima y el tiempo que llevan depositados en la celda entre otros. Típicamente los niveles de contaminantes del lixiviado disminuyen con el incremento en tiempo. La preocupación

principal para los SRS tipo MSW es la cantidad de constituyentes orgánicos en sus lixiviados.

Uno de los criterios de diseño para un SRS requerido por RCRA Sub-D es la instalación de un sistema de colección de lixiviados. Este sistema tiene que estar construido y diseñado de forma tal que mantenga menos de 30 centímetros de lixiviados (aproximadamente 1 pie) por arriba del revestimiento. El proceso de remoción de lixiviados depositados en el fondo de la celda del SRS está compuesto por tres partes: colección, almacenamiento y disposición. El sistema de colección o drenaje es básicamente un sistema de tuberías perforadas, colectores, cuencas y bombas que dirigen el lixiviado hacia el lugar de almacenamiento. La base o el suelo de la celda está nivelado por diseño para intencionalmente dirigir los lixiviados a estas tuberías perforadas, colectores y cuencas que a su vez están protegidas con material altamente permeable como granulado fino o agregado que facilitan el movimiento del líquido. En la cuenca hay instalado un sistema de bombas que dirigen el lixiviado hacia el área de almacenaje y también hay instalado unos transductores que miden por presión hidrostática el nivel o la altura del lixiviado en relación al revestimiento. Estos niveles en la cuenca de infiltración tienen que ser registrados en la bitácora operacional del SRS (obs. pers.). El área de almacenamiento consiste en uno o varios tanques que retienen el líquido temporariamente. Una vez el lixiviado ha sido recolectado y almacenado, es transportado por tuberías sanitarias o por camiones tanques a la planta de tratamiento de aguas usadas municipal para su tratamiento y disposición final.

Como mínimo, éste sistema tiene que estar en operación el mismo tiempo que la vida productiva del sistema de revestimiento. Esto significa que el sistema de colección de lixiviados va a operar por muchos años. Por eso, es sumamente importante que la

calidad del diseño y construcción sean del más alto nivel para asegurar la operación del sistema por largos periodos de tiempo. También, el buen funcionamiento del sistema debe ser examinado periódicamente y reparado inmediatamente en caso de alguna falla.

Sistema de colección y control de gas

El sistema de colección y control de gas (GCCS, por sus siglas en inglés) es una red de tuberías interconectadas que capturan y dirigen el gas generado en las celdas de un SRS tras la descomposición de los desechos orgánicos desde el punto de colección hasta el punto de tratamiento utilizando un sistema de ventilación al vacío (obs. pers.).

Hace varias décadas en los llamados vertederos, cuando se permitía la quema abierta de los desperdicios y todavía no había sido introducido el concepto de sistema de relleno sanitario, existía muy poco conocimiento sobre la generación de LFG. Para esos tiempos, la cubierta diaria no era contemplada en estos sistemas y por ende el proceso de descomposición de los desperdicios era aeróbico. Una vez se implementa el concepto de sistema de relleno (SR), la cubierta diaria impide la entrada del aire a la biomasa y el proceso de descomposición pasa a ser uno anaeróbico donde el gas metano y el dióxido de carbono son generados como resultado de este proceso. La descomposición anaeróbica en los SR comienza a traer grandes preocupaciones porque la acumulación de estos gases puede traer riesgos de explosión, fuegos como también molestias por olores objetables. Entonces la ley RCRA hace mandatorio la instalación de un GCCS para los SRS tipo MSW que sobrepasan los estándares mínimos especificados de generación de gas. La mayoría de estos sistemas de control de gas han sido instalados con el propósito de prevenir los riesgos potenciales de

explosión que son asociados a la migración del gas hacia la superficie y para controlar los olores objetables.

Los estándares operacionales dentro del RCRA Sub-D para estos sistemas GCCS especifican que el sistema debe ser instalado si se han depositado desperdicios sólidos tipo MSW por cinco años o más en la parte activa del SRS o por dos años o más si está cerrado o en su elevación final. También estos estándares especifican que el sistema debe operar sus pozos de extracción con presión negativa (sistema activo) y esto se logra a través del uso de ventiladores que generan vacío y minimizan la entrada de aire a la biomasa.

Si el gas no va a ser recuperado con propósitos beneficiosos, el mismo tiene que ser liberado a la atmosfera después de ser desodorizado o quemado. Este método de combustión o quema es el más común para los SRS que operan actualmente en PR un sistema GCCS. Existen dos tipos de quemadores o sistemas de combustión por llama: sistema de combustión por llama abierta y cerrada. La tecnología utilizada en estos sistemas es conceptualmente sencilla: el gas hace contacto con el aire y es incendiado a temperaturas altas para quebrar físicamente ciertos contaminantes.

Sistema de combustión por llama abierta

El sistema de llama abierta es un sistema muy sencillo donde el gas es quemado abiertamente y la llama puede extenderse varios pies por arriba del escudo protector de viento. La ventaja principal de este sistema es su costo. Estos sistemas, dado su sencillez, tienden a ser relativamente económicos en términos de adquisición, operación y mantenimiento. Sin embargo, estos sistemas abiertos son ineficientes y la calidad de emisiones resulta ser muy pobre comparado a los sistemas encerrados. Existen varias razones por la cual estos sistemas son ineficientes. Las más notables

son: no retiene el gas en términos de tiempo de residencia, no mantiene altas temperaturas y el aire exterior enfría la periferia de la llama afectando las reacciones. Estos sistemas generalmente demuestran cerca de su llama un alto contenido de hidrocarburos y de monóxido de carbono que fueron liberados al aire sin haber sido quemados apropiadamente.

Sistema de combustión por llama cerrada

El sistema de llama cerrada es relativamente más complejo y costoso. Al contrario del sistema de llama abierta, este sistema tiene sus quemadores localizados en la base de la cámara de combustión. En estos sistemas es más fácil mantener una temperatura uniforme a lo largo de la cámara eliminando las bajas temperaturas causantes de combustión incompletas. La cámara de combustión está diseñada para mantener un cierto tiempo de residencia del gas haciendo la combustión mucho más eficiente. También tiene material aislante para mantener la temperatura adecuada y reduce el tamaño de la flama haciéndola menos visible.

Sistema de relleno sanitario bioreactor

Los sistemas de relleno sanitario convencionales son esencialmente ~~6~~ bombas secas+ en las cuales los desperdicios sólidos son acomodados en celdas y donde los componentes orgánicos se descomponen lentamente (Rynk, 2000). Un sistema de relleno sanitario bioreactor (SRSB) es muy similar en términos operacionales a un SRS convencional. Los DS se van depositando capa sobre capa en una celda diseñada para esta operación, se compactan y se cubren diariamente con tierra o con un material de cubierta alternativo aprobado por el estado. La diferencia más notable es que el SRSB está específica e intencionalmente diseñado para acelerar la descomposición de la

parte orgánica de los DS que se depositan en él con el propósito de recuperar beneficiosamente el gas generado. Una de las ventajas mayores de los SRS bioreactores es la esperada aceleración en la producción de LFG la cual aumenta la viabilidad para recuperar LFG para usos beneficiosos (Tolaymat et al., 2010). El aceleramiento en el proceso de descomposición se logra a través de la aplicación de técnicas operacionales que generalmente buscan incrementar el factor de humedad en la columna de los desperdicios.

El alto contenido de humedad que caracteriza a un SRSB, y que a la misma vez lo diferencia de un SRS convencional, provee mejores condiciones para el crecimiento de microorganismos que se encargan de agilizar y mejorar el proceso de descomposición de la parte orgánica de los DS. El procedimiento más común para aumentar el contenido de humedad es conocido como recirculación. La recirculación es el proceso por el cual los lixiviados son redirigidos y distribuidos de forma uniforme en las celdas de un SRSB. La Asociación de Desperdicios Sólidos de Norte América (SWANA, por sus siglas en inglés) ha definido el SRS Bioreactor como cualquier SRS o celda con permiso bajo el Subtitulo D de RCRA en el cual líquido o aire es inyectado a la masa de los desperdicios de una forma controlada con el propósito de acelerar o mejorar la estabilización biológica de los desperdicios. Existe un interés significativo en la aceleración de la descomposición de los desperdicios por SRS que operan como bioreactores en los cuales los lixiviados son recirculados, y en algunos casos, otros líquidos suplementares son añadidos (Benson, Barlaz, Lane, & Rawe, 2002). La característica principal que comparten todos los SRSB es el aumento en humedad a través de la inyección de lixiviados u otros líquidos a la masa de los desperdicios

(recirculación). Sin embargo, la inyección de aire no ocurre en todos los SRSB. Según EPA (2009) hay identificados tres tipos o configuraciones diferentes de SRSB.

- Aeróbico . En un SRSB aeróbico el lixiviado es extraído del fondo de la celda, bombeado a los tanques de almacenamiento y devuelto a la masa en una forma controlada (recirculación). También, aire es inyectado a la masa de los desperdicios a través de tuberías horizontales o verticales para acelerar la descomposición de una forma aeróbica.
- Anaeróbico - En un SRSB anaeróbico el lixiviado es extraído del fondo de la celda, bombeado a los tanques de almacenamiento y devuelto a la masa en una forma controlada (recirculación). Sin embargo, este tipo de bioreactor evita la entrada de aire y la descomposición ocurre en ausencia de oxígeno (anaeróbica). El producto principal de la descomposición anaeróbica es gas, principalmente gas metano. En una unidad anaeróbica el gas metano es generado en etapas más tempranas de la vida del SRSB y a mayores concentraciones comparado a los SRS convencionales. Este gas puede ser recuperado para aplicaciones de energía.
- Híbrido (aeróbico-anaeróbico) . el SRSB híbrido acelera el proceso de descomposición empleando tratamientos secuenciales aeróbicos y anaeróbicos que descomponen de forma rápida la parte superior (aeróbica) del SRSB mientras se extrae gas de la parte inferior (anaeróbica).

El incremento en humedad a través de la recirculación es el factor común en los tres tipos de SRSB y es la técnica más importante para promover una descomposición acelerada. La eficiencia de un SRSB depende del mantenimiento óptimo del contenido de humedad. EPA (2009) sugiere que la capacidad de campo . contenido de humedad

que la masa de los desperdicios puede sostener bajo la influencia de la gravedad - debe mantenerse entre 35 a 65% de humedad, y si es necesario se debe añadir líquido para mantener este por ciento. Esto significa que si el SRSB no genera suficiente lixiviado para ser inyectado a la masa por recirculación y alcanzar el por ciento óptimo de humedad, se pueden considerar otros líquidos como aguas de escorrentías y/o aguas residuales o lodos provenientes de plantas de tratamientos municipales. Se presupone que si el contenido de humedad es menor del 35% el sistema no descompone a niveles óptimos y si es mayor del 65% podría representar un riesgo de estrés estructural en los suelos o la base del SRSB. La recomendación típica para recircular los lixiviados u otros líquidos es 20 galones por cada tonelada generada por día (TPD, por sus siglas en inglés) aunque diferentes factores como la clasificación de los DS depositados y la precipitación en el SRSB pudieran cambiar este número. Cada Plan de Operación para la Instalación (SOP, por sus siglas en inglés) especifica el método de aplicación que será utilizado para recircular ya sea por inyección en zanjas horizontales, inyección en pozos verticales o una combinación de ambos.

Las diferencias más notables, específicamente en los criterios de diseño entre un SRSB y un SRS convencional, se encuentran precisamente en los tres controles ambientales discutidos en la sección anterior: sistema de revestimiento compuesto, sistema de control de lixiviados y sistema de colección y control de gas. En específico, la recirculación de los lixiviados y la recuperación de metano para usos energéticos son prácticas conducidas que particularmente identifican los sistemas de relleno sanitarios bioreactores.

Sistema de revestimiento compuesto para un SRSB

El sistema de revestimiento compuesto, uno de los controles establecidos en el RCRA Sub-D, es una de las razones principales que hacen posible convertir un SRS convencional a un SRSB. Se sabe que con el tiempo el SRC se podría degradar y perder su integridad. Así que uno de los argumentos más comunes a favor de los SRSB es que la descomposición acelerada, característica principal de estos sistemas, ocurre durante las etapas tempranas en la operación de este sistema cuando el SRC es más efectivo.

Un sistema de doble revestimiento es actualmente utilizado en algunos SRS tipo MSW y en todos los SRS que manejan desperdicios peligrosos en EEUU. Como sugiere la palabra, este sistema tiene dos revestimientos tipo FML, el primario y el secundario. El revestimiento primario funciona como barrera principal para la contención de los lixiviados y arriba de este se encuentra el sistema de colección de lixiviados, mientras el secundario funciona como un sistema de respaldo al sistema primario.

Los estándares federales actuales establecidos en RCRA Sub-D requieren como mínimo el SRC convencional de dos pies de tierra arcillosa compactada con una conductividad hidráulica de 1×10^{-7} y la utilización de un FML de 60-Mil. Sin embargo, la ley federal permite a los estados alterar estos requisitos siempre y cuando sean más restrictivos que los mínimos federales. Actualmente Puerto Rico no opera ningún SRS Bioreactor pero algunos de los estados que actualmente operan SRSB, como por ejemplo Florida y California, están requiriendo la instalación de un sistema de doble revestimiento para los SRSB con el fin de asegurar la protección de los subsuelos y las aguas subterráneas y evitar la posibilidad de contacto con los lixiviados recirculados.

Sistema de Control de Lixiviados para un SRSB (Recirculación)

El sistema de colección de lixiviados para un SRSB no es muy distinto al discutido en la sección anterior y comúnmente utilizado en un SRS convencional. La diferencia más significativa estriba en la sustitución de la transportación y tratamiento de los lixiviados fuera del predio por la recirculación de los mismos in situ. También el sistema de tuberías, aunque muy similar al de un SRS convencional, es diseñado para manejar un volumen considerablemente mayor de líquidos. La recirculación de los lixiviados y otros líquidos, factor común que diferencia un SRSB de un SRS convencional, es una tecnología emergente que ofrece diferentes ventajas. Distintos investigadores han documentado los beneficios que ofrecen el incremento en humedad y el movimiento de los líquidos a través de la columna de los desperdicios. Los sistemas más comunes utilizados para la recirculación son: pozos verticales y/o trincheras horizontales. Diferentes estudios han demostrado que los pozos verticales no son suficientes para humedecer la parte superior del relleno y que las trincheras horizontales no son suficientes para humedecer la parte inferior sugiriendo la combinación de ambos métodos como el medio más eficiente para la recircular los lixiviados.

Un SRSB que no genera suficientes cantidades de lixiviados y líquido producto de la condensación en las tuberías de gas para llegar a su capacidad de campo entre 35 a 65% de humedad, pudiese considerar la aplicación de otros líquidos tales como: aguas de escorrentías, aguas residuales de plantas de tratamiento y lodos húmedos entre otros.

Sistema de colección y control de gases para un SRSB

La descomposición acelerada, característica de un SRSB anaeróbico por su alto contenido de humedad, produce más cantidad de gas que un SRS convencional. El sistema de colección y control de gas para un SRSB es igual al sistema de un SRS convencional ya discutido. La diferencia es que un SRSB busca recuperar el gas colectado para aplicaciones energéticas como energía eléctrica, calor, o en este caso para convertirlo a combustible LNG. Por lo tanto es común ver en los SRSB un sistema de combustión por llama (abierta o cerrada) como sistema de apoyo, pero el sistema principal es una planta de tratamiento que la limpia y transforma el LFG recuperado. No importa cuál sea la aplicación final, la ventaja más común sobre la recuperación de metano es la disminución de gases de invernadero a la misma vez que se genera actividad económica mediante la comercialización de un combustible renovable.

Ventajas y desventajas de un SRSB

El alto contenido de humedad debido a la recirculación de lixiviados y otros líquidos, característica principal de un SRSB, acelera el proceso de descomposición anaeróbica. Esto trae como resultado un aceleramiento en la tasa de asentamiento que aumenta la vida útil del SRSB disminuyendo la necesidad de expansiones en SRS existentes o la construcción de nuevos y más SRS. También, la descomposición anaeróbica más avanzada en un SRSB produce más LFG a concentraciones y periodos de tiempo más predecibles que un SRS convencional aumentando la viabilidad económica para justificar la inversión en tecnologías necesarias para recuperar el gas y transformarlo a combustible. El proceso de recirculación de lixiviados y otros líquidos tiene otras ventajas como: la estabilización de los lixiviados a través del tiempo reduciendo el riesgo de contaminación; y la reducción significativa de los costos

asociados al transporte, tratamiento y disposición final de los mismos. Todas estas ventajas disminuyen el tiempo y los recursos asociados al manejo de post-cierre.

Algunas de las desventajas comúnmente asociadas a un SRSB son: requiere una inversión inicial mayor para ser operado, requiere más energía, requiere personal con mayor nivel de conocimiento técnico. También, se asocian de forma regular algunos problemas operacionales como: brotes de lixiviados, olores objetables fuera de los predios y asentamiento excesivo.

Si hacemos un análisis objetivo de las ventajas y desventajas que ofrece un SRSB podemos concluir que las ventajas superan las desventajas significativamente. El SRS considerado en este estudio, SRS Ponce, se encuentra en la zona sur de PR donde el promedio anual de precipitación según la Administración Nacional de Oceanografía y Atmósfera (NOAA, por sus siglas en inglés) es 57.44 pulgadas, cantidad considerablemente menor que la precipitación promedio de los dos SR más grandes de PR: Humacao (80.10") y Toa Baja (62.69"). Un SRS convencional con este bajo promedio de precipitación anual como en el SRS de Ponce predispone a tener una tasa de descomposición anaeróbica baja (lenta) debido al limitado factor de humedad. Esto minimiza la producción de gas en menor tiempo y mayor concentración, ventaja que ofrece el SRSB. Algunos estudios demuestran que los SRSB incrementan la viabilidad para la recuperación de LFG de manera costo-efectiva resultando así en la reducción de emisiones fugitivas. La reutilización del LFG en proyectos de recuperación de energía representa una oportunidad económica. A causa de la atención internacional que se le ha dado a las fuentes alternativas de energía limpia, los proyectos que generan energía proveniente de los desperdicios sólidos se han popularizado a nivel mundial, muchos de ellos respaldados por incentivos del propio gobierno. Para estos fines, muchos SRS se

han convertido en bioreactores vivos disponibles para el uso privado y público (Reno, 2008).

Generación y recuperación de biogás o LFG en los sistemas de relleno sanitario

El manejo de los DS a través de los SRS es una de las técnicas de manejo de desperdicios más utilizadas mundialmente que generalmente presentan dos impactos ambientalmente importantes: la producción de aguas contaminadas (lixiviados) y la generación de un gas inflamable (Berrueta & Castrillón, 1992). La generación del biogás o LFG ocurre como resultado de la fermentación anaeróbica espontánea de la materia orgánica también conocida como la biomasa. Esta mezcla gaseosa se compone mayormente de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), además de pequeñas cantidades (trazos) de hidrógeno y nitrógeno entre otros orgánicos (Rodríguez-Iglesias, Vazquez, Maraño, Castrillon & Sastre, 2005). Está comprobado que el CH_4 y el CO_2 son gases de invernadero que contribuyen al calentamiento global. El CH_4 tiene 23 veces más de potencial de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés) que el CO_2 . Además, el LFG contiene otros gases como compuestos orgánicos volátiles (VOC, por sus siglas en inglés) y contaminantes de aire peligrosos (HAP, por sus siglas en inglés).

Las actividades relacionadas al manejo de los desperdicios sólidos contribuyen aproximadamente un 4% de las emisiones globales de gases de invernadero (Papageorgiou, Barton & Karagiannidis, 2009). La mitigación efectiva de las emisiones de GI es un tema muy importante porque además de proveer beneficios ambientales, también puede reducir los impactos adversos a la salud pública dentro de un modelo de desarrollo sustentable (Papageorgiou et al., 2009). Las emanaciones del biogás

pueden producir olores objetables relacionados al contenido de Sulfuro de Hidrogeno (H_2S) y mercaptanos en la mezcla del mismo. El LFG puede aumentar el riesgo de explosión y fuegos como resultado de su alta inflamabilidad si no es liberado en una manera controlada (Rodríguez-Iglesias et al., 2005). Por esto, un SRS tiene que cumplir con un sistema planificado de manejo y control de estos gases llamado Sistema de Colección y Control de Gases (GCCS, por sus siglas en inglés) no solo para cumplir con las leyes y los estándares ambientales sino para también reducir al máximo los riesgos de fuego y explosión que estos representan. Históricamente el LFG ha sido controlado en los SRS con el único propósito de minimizar el riesgo de explosión y reducir los olores objetables. En el pasado, especialmente en los sistemas de relleno no sanitarios, pobres controles del LFG han generado inquietud e incomodidad pública.

El LFG es generalmente extraído de los SRS utilizando una serie de pozos verticales u horizontales y un sistema de ventiladores al vacío. A esto se le conoce como un sistema activo. Los sistemas de control activo son comúnmente utilizados en los SRS que manejan MSW y el diseño de estos sistemas requiere un entendimiento profundo de los patrones en el flujo de gas (Yu, Batlle, Carrera & Lloret, 2009). Este sistema dirige el gas recolectado a un punto central donde puede ser procesado o tratado dependiendo del uso que se le quiera dar. Desde este punto, el gas puede ser: simplemente quemado en un sistema de llama abierta o cerrada o transformado para ser utilizado como un combustible energético. La forma más básica y menos productiva de disponer el CH_4 es quemándolo en un sistema de llama (Zietsman et al., 2008). Este sistema parcialmente eficiente controla los olores objetables y mitiga los impactos a la salud pública destruyendo, a través del proceso de combustión, la mayoría de los contaminantes en especial los mercaptanos y VOCs. Pero este método de combustión

no aporta nada para resolver la problemática de emisiones de GI que presentan los SRS y no persigue los principios de eficiencia para extraer un recurso energético disponible.

Tras todas las controversias que trae el tema del calentamiento global y la inestabilidad política de las regiones productoras de petróleo, han surgido nuevos mercados que buscan la independencia del petróleo concentrando sus esfuerzos en el desarrollo de fuentes renovables de energía. El LFG extraído de los SRS está siendo considerado y utilizado para otras aplicaciones como para la producción de energía eléctrica y como combustible sustituto a los provenientes de fuentes fósiles. Existen compañías desde el nivel internacional hasta el regional interesadas en explotar este mercado y a la misma vez aprovechar la gama de incentivos disponibles para estas operaciones. Estimados recientes apuntan que el LFG está siendo recuperado para uso beneficioso en 425 de los 1812 SRS tipo MSW en los Estados Unidos (EPA, 2010). Actualmente se evalúan tecnologías innovadoras para lograr un manejo eficaz de los gases residuales en los SRS. Sin embargo, las tecnologías para la conversión termoquímica de la biomasa tales como pirolisis y gasificación son ciertamente las opciones menos importantes al presente (Demirbas, 2006).

El LFG puede ser adquirido por diferentes formas. El mismo está compuesto de metano, dióxido de carbono, aire, amonio, monóxido de carbono, hidrogeno, gases sulfurosos, nitrógeno y oxígeno. El CH₄ y el CO₂ representan más de un noventa por ciento del volumen total de gas producido (Demirbas, 2006). Dentro de estos componentes, el gas metano es el más importante de todos ya que puede ser utilizado como fuente de energía considerada renovable. También, el gas metano representa una oportunidad muy atractiva para ser comercializado, particularmente por su

capacidad de sustituir los combustibles fósiles tradicionales como los derivados del petróleo que son actualmente utilizados para el proceso de combustión en los vehículos de motor y en las plantas generadoras de electricidad.

Los beneficios económicos, ambientales y sociales están claramente identificados por (Bodensteiner, 2007):

- Económico: Energía disponible por una fuente renovable y negociación con los créditos de carbón para capitalizar los beneficios ambientales que genera la recuperación de metano. Creación de oportunidades para el desarrollo económico comunitario incluyendo empleos, desarrollo de negocios, rebaja en contribuciones y oportunidades para la inversión en energía verde.
- Ambiental: Mejoras en la calidad de aire por la captura del metano, gas de invernadero veinte veces más dañino a la atmósfera que el dióxido de carbono. Mejoras en la calidad de agua reduciendo el riesgo de contaminación y reducción en el consumo de combustible fósil y las emisiones asociadas a este.
- Social: Reducción en la dependencia de combustible importado y la reducción de los riesgos en seguridad nacional asociados a esta dependencia. Promoción de la responsabilidad corporativa y mejor percepción de las comunidades a las industrias participantes.

Producción de combustible a base de metano líquido proveniente del gas de un sistema de relleno (Proyecto LFG a LNG)

El uso del LNG ha sido reconocido por sus beneficios ambientales y cada día expande su participación en el mercado energético. Parte de estos beneficios incluyen la combustión limpia que resulta en una reducción significativa en las emisiones de

óxidos de nitrógeno (NO_x) y materia particulada (PM) entre otros. El LNG, también conocido como Biometano o metano líquido, es un excelente combustible actualmente utilizado por la compañía EcoEléctrica para la generación de energía eléctrica. Este producto puede cumplir y exceder los requisitos de ley más rigurosos asociados a las emisiones y la contaminación del aire. Con el crecimiento en la demanda de los combustibles fósiles y las expectativas de seguir estas tendencias, el LNG representa una opción viable y costo-efectiva con cualidades que permiten reducciones significativas en las emisiones de contaminantes. El suministro de LNG a nivel mundial ha incrementado a más del doble en los últimos 20 años (Fischer, 2001). El LNG ha probado ser exitoso en aplicaciones como combustible para alimentar plantas generadoras de electricidad y en vehículos pesados como camiones de recogido de basura, vehículos destinados a transportación pública y camiones tractores que acarrear los tráileres de carga. Según dice el Dr. Aldo Belloni, miembro de la junta ejecutiva de la multinacional Linde Group «El LNG se ha convertido en un ingrediente muy importante de la economía energética y su potencial de crecimiento es indiscutible». Las ventajas de convertir el LFG a LNG son significativas. Estas incluyen: ahorros, exenciones contributivas y ayudas económicas para los operadores de flotas y productores del combustible; desarrollo económico local; seguridad energética a través del desplazamiento del petróleo; y reducción significativa en las emisiones de contaminantes incluyendo los gases de invernadero, hidrocarburos, óxidos de nitrógeno y materia particulada entre otros (National Renewable Energy Laboratory, 2005). De acuerdo con la Asociación de Vehículos de Gas Natural, más de 120,000 autobuses de transporte colectivo, taxis, camiones de carga y otros vehículos que operan en EEUU están siendo abastecidos con este gas de quema limpia. Y de acuerdo con la

Asociación Americana de Transito Publico, el LNG es responsable de abastecer el 10.5% de estos vehículos (Center for Liquefied Natural Gas, 2009).

Los SRS son excelentes candidatos para los proyectos de recuperación y conversión de gas a energía o combustible. Estos proyectos pueden representar alternativas para: 1) utilizar de forma inteligente el LFG; 2) responder a las constantes alzas en los precios de los combustibles derivados del crudo. También el LFG es muy atractivo, principalmente por su accesibilidad ya que la mayoría de los SRS están localizados en o cerca de aéreas pobladas y por su disponibilidad ya que la mayoría de los SRS actualmente disponen el gas de forma ineficiente quemándolo en un sistema de combustión sin ningún aprovechamiento posterior. Sin embargo, hay que tomar en consideración la cantidad considerable de limpieza y procesamiento requerido para producir gas de alto grado como lo es el LNG, especialmente por las impurezas que son características del LFG. Esencialmente, el reto está en procesar de forma costo-efectiva el gas impuro a través de distintas etapas de compresión, purificación y separación (Gongaware et al., 2004).

Los pasos del proceso para convertir LFG a LNG son:

- Colección y control de calidad del LFG
- Compresión y deshidratación del LFG
- Remoción de contaminantes y CO₂
- Remoción del CO₂ residual a niveles de ppm regulados
- Licuación y almacenamiento del metano (LNG)
- Distribución, venta y mercadeo del producto

Actualmente existen plantas de LNG a grande escala que se encuentran en completo funcionamiento comercial. Inclusive, Puerto Rico tiene uno de los nueve

puertos en EEUU que opera y recibe LNG importado. Ahí el LNG es utilizado, luego de ser devuelto a su estado natural gaseoso, para alimentar las turbinas de la co-generadora de electricidad EcoEléctrica en la ciudad de Guayanilla. Estas plantas operan con un sistema complejo de refrigeración y equipos especializados y se alimentan de CH₄ extraído en depósitos o bolsillos de gas natural - no considerados fuentes renovables - localizados en diferentes partes del mundo. Sin embargo un SRS que planea convertir el LFG a LNG es considerado una planta a pequeña escala. Aunque la tecnología para estas plantas a pequeña escala todavía está en pleno desarrollo, ya existen varios SRS en EEUU, como en New Jersey, Ohio y California, que están produciendo LNG y comprobando que si es posible la aplicación y comercialización del mismo. La única desventaja, precisamente porque la tecnología todavía se encuentra en desarrollo, es que estos proyectos actualmente podrían confrontar un problema de costo viabilidad debido a la alta inversión de capital inicial. Pero como todo en el mercado tecnológico, a medida que se van desarrollando las tecnologías, los precios van disminuyendo mientras la competencia aumenta.

Tecnología Acrion

Mack Truck Inc. (Allentown, PA), en asociación con Acrion Technologies Inc. (Cleveland, OH) y otros socios en un proyecto piloto llevado a cabo en el Burlington County Landfill EcoComplex de la ciudad de Columbus, NJ, han demostrado que el CH₄ producido por el SRS puede ser convertido a LNG de grado comercial y este puede ser utilizado por diferentes equipos o vehículos diesel de alto rendimiento (HDDT, por sus siglas en inglés) sin problemas posteriores. Esto se logra a través de un proceso llamado CO₂ WASH[®], diseñado y registrado por la compañía Acrion Technologies Inc., compañía que ha estado investigando la producción de metano líquido a base del LFG

por más de 10 años. El CO₂ WASHi es un proceso físico-químico sofisticado que separa el CO₂ y el oxígeno (O₂) del CH₄, proveyendo un gas limpio con un alto contenido de CH₄ el cual puede ser convertido a LNG para ser utilizado como combustible (Zietsman et al., 2008). Uno de los beneficios de la tecnología de Acrion es que utiliza el CO₂ líquido naturalmente encontrado en el LFG para separar los contaminantes eliminando la necesidad de comprar solventes peligrosos para remover los VOCs. Luego de pasar por un complejo proceso termodinámico, obtenemos un gas con un contenido de Unidad Termal Británica (BTU, por sus siglas en inglés) suficiente para ser utilizado como combustible sustituto al diesel demostrando que el LNG de alta pureza puede ser generado como producto del LFG.

Tecnología Kryos

Kryos Energy Inc. (New York, NY) ha desarrollado una tecnología para procesar el LFG llamada Proceso Kryosol, proceso físico de absorción refrigerada que utiliza metanol de grado comercial para absorber los contaminantes. Este proceso ha sido diseñado para remover todos los componentes del LFG como CO₂, oxígeno, nitrógeno, H₂S, niveles de saturación de agua y compuestos misceláneos como cloruros y olefinas entre otros y producir un gas de alta calidad (Vandor, 1999).

Marco legal

Ley Nacional de Política Ambiental (NEPA, por sus siglas en inglés) del 1969

Esta Ley aprobada por el Congreso de los EEUU en el año 1969, es la primera ley que de forma directa establece política pública para reglamentar y dirigir las acciones del gobierno con el fin de proteger el bienestar humano y del ambiente. En esta se declara ~~la~~ política nacional para establecer una armonía entre el hombre y su

ambiente; promover esfuerzos para prevenir o eliminar los daños al ambiente y la biosfera. Esta ley crea la Agencia de Protección Ambiental y la hace responsable de mantener la jurisdicción para dirigir la reglamentación y la fiscalización en el cumplimiento de los estándares establecidos por ella misma y prohibir los proyectos y actividades que violen estas normas.

Ley Federal de Conservación y Recuperación de Recursos (RCRA, por sus siglas en inglés) del 21 de octubre de 1976 según enmendada (L.P. 94-580)

Esta Ley, aprobada por el Congreso de los EEUU en 1976, enmienda a la Ley de Disposición de Desperdicios Sólidos de 1965 (SWDA, por sus siglas en inglés) y la Ley de Recuperación de Recursos de 1970 (RRA, por sus siglas en inglés). El Congreso de los EEUU aprueba estas leyes reconociendo la seriedad del problema y demostrando un compromiso para regular el manejo y disposición de los DS, no obstante, el término de Desperdicio Peligroso no fue definido en ninguna de estas leyes. No fue hasta el 1976 cuando se aprueba la Ley RCRA que ordena a la EPA un programa integral a escala federal para reglamentar el manejo de los desperdicios sólidos incluyendo los peligrosos y los no peligrosos. Los objetivos principales de esta ley son: proteger la salud pública y el ambiente en general; promover el reciclaje de los DS con el propósito de conservar energía y proteger los recursos naturales; y reducir los desperdicios peligrosos en relación al volumen y la toxicidad de estos (Rohena, 2006). La intención del Congreso de los EEUU al aprobar esta ley era transferir esa responsabilidad a los Estados y la EPA se mantendría estableciendo los estándares y requisitos reglamentarios, fiscalizando los programas estatales, y ofreciendo ayuda (técnica y económica) a los Estados. Esta Ley establece cuatro programas donde en el primero de estos programas se identifica el Subtítulo D y el mismo establece las guías

para la operación segura de las instalaciones que manejan DS y ordena a los Estados a desarrollar planes integrales para el manejo de los DS no peligrosos incluyendo los desperdicios domésticos o municipales. Como mínimo, las instalaciones de disposición estatales deben cumplir con los estándares federales a menos que el estado adopte estándares más estrictos.

Partes 257 y 258, Código de Reglamentos Federales, Título 40

Estos reglamentos se promulgaron bajo el Subtítulo D de la Ley RCRA y aplicó a los sistemas de rellenos nuevos, existentes y expansiones laterales que específicamente operan con un permiso para manejo de MSW en o después de octubre 9 del año 1993. El Subtítulo D es básicamente una serie de regulaciones específicas para los dueños y operadores de estos tipos de SR. Estas nuevas regulaciones establecen los criterios mínimos federales que incluyen: restricciones a la localización y a los diseños de las instalaciones; los criterios operacionales; los requisitos para el monitoreo de las aguas subterráneas y de los sistemas de gas; y los requisitos para las acciones correctivas, seguridad financiera y mantenimiento para las etapas de cierre y post-cierre. Cada estado puede establecer de forma individual sus propios criterios y requisitos si estos son más estrictos que los mínimos federales presentados en este Subtítulo. La meta principal de este Subtítulo es establecer un marco de trabajo estandarizado para establecer la cooperación entre los gobiernos federales, estatales y locales y de esta forma controlar el manejo de los desperdicios sólidos no peligrosos.

Ley Federal de Aire Limpio (CAA, por sus siglas en inglés) de 1963 según enmendada (42 U.S.C. sec. 7401 et seq)

Ley administrada por la EPA que surge tras la preocupación por el incremento continuo en el consumo y combustión de material fósil. Bajo esta Ley, la EPA establece los estándares de concentración máxima para ciertos contaminantes llamados críticos en distintas regiones designadas y luego las clasifica como zonas de cumplimiento o zonas de no-cumplimiento.

Ley Federal de Agua Limpia (CWA, por sus siglas en inglés) de 1977 según enmendada (33 U.S.C. et seq)

Esta ley también administrada por EPA aplica a los SR porque estos que generan lixiviados y descargas a las aguas superficiales. Esto representa un problema debido a que muchas plantas de tratamiento de aguas usadas no pueden aceptar estas descargas. Las instalaciones que generan descargas a las aguas superficiales deben usar las mejores tecnologías disponibles (BAT, por sus siglas en inglés) para controlar estas descargas y obtener un permiso de descarga.

Ley Federal de Energía de 2005

La política pública de los EEUU con relación a la energía se establece en esta Ley la cual establece el desarrollo de investigaciones, planes o proyectos, así como programas para mejorar la eficiencia de energía; energía renovable; incentivos contributivos de energía + que ayuden a disminuir la dependencia del petróleo. En el Título II de esta Ley, se presentan las disposiciones para el desarrollo de energías renovables y los incentivos disponibles para aumentar la producción de las mismas. Por otro lado, en el Subtítulo D de esta Ley, se establece el término de Energía

Insular+, el cual establece un mandato al Congreso de los EEUU para crear un comité que atienda los planes de energía para el Caribe y las islas del Pacífico. Dentro de este Subtitulo se simplifica la implementación de cualquier tipo de energía renovable para Puerto Rico y facilita la calificación para obtener los incentivos económicos.

Constitución del Estado Libre Asociado de Puerto Rico (1952)

En el Artículo VI sección 19 de la Constitución del Estado Libre Asociado de Puerto Rico se establece claramente un compromiso a escala constitucional; %Será política pública del Estado Libre Asociado de Puerto Rico la más eficaz conservación de sus recursos naturales, así como el mayor desarrollo y aprovechamiento de los mismos para el beneficio general de la comunidad + Este artículo de la constitución pretende, mediante el establecimiento de política pública, asegurar a las presentes y futuras generaciones la protección de los recursos naturales como base para una sociedad saludable en términos económicos, sociales y ambientales. También, este artículo sienta las bases para la creación posterior de un sinnúmero de leyes y reglamentos ambientales.

Ley 416 del 22 de septiembre de 2004 Ley sobre Política Pública Ambiental

Esta Ley sustituye y deroga la Ley numero 9 de 1970 que crea la Junta de Calidad Ambiental de Puerto Rico reafirmando a esta agencia gubernamental como la responsable de evaluar las acciones y los programas gubernamentales que puedan impedir el cumplimiento con las políticas públicas de PR sobre el ambiente y su desarrollo sostenible.

La razón principal por la cual se crea esta Ley, que es casi una copia fiel y exacta de su predecesora y que fácilmente pudo haber sido enmendada sin la necesidad de crear una nueva, era para ~~la~~ actualizar sus disposiciones y adaptarlas a las necesidades y realidades de nuestros tiempos+..

Esta Ley requiere el establecimiento de acuerdos entre agencias gubernamentales para la implantación de la Ley sobre Política Pública Ambiental y las distintas leyes especiales aplicables a la conservación y manejo de los recursos naturales, el manejo, tratamiento y disposición de los desperdicios sólidos peligrosos y no peligrosos, y la planificación y respuesta a emergencias ambientales. Uno de sus elementos principales es mejorar la calidad de los recursos renovables y velar por el uso juicioso de los que se agotan.

Ley Orgánica de la Autoridad de Desperdicios Sólidos según enmendada, Ley 70 del 23 de junio de 1978

Esta Ley crea a la Autoridad de Desperdicios Sólidos de Puerto Rico y la hace responsable de planificar, financiar y operar los servicios de trasbordo, procesamiento, recuperación y disposición final de los desperdicios sólidos, incluyendo los peligrosos, además de fomentar el reciclaje. La Ley delega a la ADS funciones públicas esenciales de gobierno, para adoptar normas, reglas, reglamentos y procedimientos necesarios para cumplir con los propósitos y poderes que se le confieren (Plan estratégico para el manejo de los residuos sólidos en Puerto Rico, 2004).

Las funciones principales de esta agencia gubernamental son: adoptar reglas para controlar mediante permisos las actividades operacionales en armonía con las normas y reglas adoptadas por la JCA y la EPA; establecer política pública para prevenir desde su origen todo tipo de contaminación y evitar cualquier tipo de

contaminación de aire, descargas a las aguas y la inadecuada disposición sobre el terreno; crear el Programa de Prevención de Contaminación que incluye promover la prevención y reducción de la contaminación en su origen.

Reglamento para el Manejo de los Desperdicios Sólidos No Peligrosos: Reglamento 5717 de 1997 Junta de Calidad Ambiental

Este reglamento es administrado por la JCA y establece los requisitos para el manejo, almacenamiento, transportación, procesamiento y disposición de los desperdicios sólidos no peligrosos, y para la administración y el seguimiento de las actividades relacionadas con las instalaciones de desperdicios sólidos no peligrosos incluyendo los SR y los SRS. Las disposiciones de este Reglamento aplican a todos los desperdicios sólidos no peligrosos, incluyendo desperdicios especiales y también aplica a los dueños y operadores de instalaciones nuevas o existentes y expansiones laterales de rellenos sanitarios.

Ley de Incentivos Económicos para el Desarrollo de Puerto Rico, Ley 73 de 28 de mayo de 2008

El siguiente texto son extractos y citas directas de la propia ley “Ley para establecer los fines de proveer el ambiente y las oportunidades adecuadas para continuar desarrollando una industria local; ofrecer una propuesta contributiva atractiva para atraer inversión directa foránea y fomentar el desarrollo económico y mejoramiento social de Puerto Rico; y crea la Administración de Asuntos Energéticos. Puerto Rico enfrenta un momento histórico de grandes retos. Los avances en las áreas de tecnología, informática, comunicaciones, biotecnología, robótica y energía renovable, entre otras, han cambiado el interés de los inversionistas y las destrezas requeridas al

capital humano. El aumento en los costos energéticos y los costos de hacer negocios en Puerto Rico, en general, perjudican nuestra competitividad.+

También esta ley establece política pública para tomar acción contundente para reducir los costos de energía a través de las diferentes alternativas de fuentes renovables+ Establece como negocio elegible cualquier negocio que se dedique a la producción, sea en escala comercial o no, de energía para consumo en Puerto Rico, mediante el uso de gas natural o carbón; o mediante el uso de fuentes renovables, incluyendo pero sin limitarse a: energía solar, eólica, geotérmicas, océano-térmica, océano-cinética, hidroeléctrica, bio-masa o hidrógeno o desperdicios sólidos, recuperación de metano mediante el uso de alta tecnología para producir energía a costos competitivos, incluyendo, pero sin limitarse, a la tecnología de conversión térmica alterna. Las siguientes unidades participantes en consorcios público-privados se considerarán proyectos estratégicos para fines de esta Ley: (1) La limpieza, recuperación, conversión y restauración de los vertederos que han sido cerrados en Puerto Rico, incluyendo actividades de recuperación de metano y la limpieza de acuíferos; Los negocios exentos, que posean un decreto bajo esta Ley, estarán sujetos a una tasa fija de contribución sobre ingresos sobre su ingreso neto de desarrollo industrial de cuatro por ciento (4%)+

La ley define otros créditos contributivos por:

- Actividad Novedosa Pionera.- si se determina que un negocio exento bajo esta Ley llevará a cabo alguna actividad económica que no haya sido producida ni llevada a cabo, o realizada en Puerto Rico+
- Crédito por Creación de Empleo.- Se concederá a todo negocio exento que inicie operaciones con posterioridad al 1 de julio de 2008, un crédito por cada

empleo creado durante su primer año de operaciones. El monto de este crédito dependerá de la zona de desarrollo industrial donde las operaciones de dicho negocio exento estén localizadas+ñ

- Inversión en Maquinaria y Equipo para la Generación y Uso Eficiente de Energía.- %Cualquier negocio exento que posea un decreto concedido bajo esta Ley o bajo leyes anteriores, podrá reclamar un crédito de cincuenta por ciento (50%)+ñ
- Inversión Elegible.- %La inversión elegible significará la cantidad de efectivo utilizado para la adquisición de maquinaria y equipo para la generación de energía con combustibles alternos al petróleo. Disponiéndose, que a partir del tercer año de vigencia de esta Ley solamente cualificará para este crédito la adquisición de maquinaria y equipo para la generación de energía de fuentes renovables+ñ

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

Como meta de este trabajo, establecimos desarrollar un plan para optimizar la extracción y aprovechamiento del biogas en el Sistema de Relleno Sanitario del Municipio de Ponce.

Área de estudio

El Sistema de Relleno Sanitario de Ponce (SRS Ponce), es el SRS más importante de la zona sur de Puerto Rico. El SRS Ponce está situado en el Municipio de Ponce. Este Municipio está localizado en la costa sur de Puerto Rico y cuenta con una población de 184,350 habitantes y una extensión territorial de 193.6 millas cuadradas. Los límites territoriales de Ponce son: Adjuntas, Utuado y Jayuya por el norte, el Mar Caribe por el sur, Juan Díaz por el este y Peñuelas por el oeste. El área de estudio comprende el SRS Ponce localizado a unas 50 millas lineales al sur de San Juan, capital de Puerto Rico, y a unas 2.5 millas lineales del centro urbano del Municipio de Ponce.

Según el Plan Estratégico para el Manejo de los Desperdicios Sólidos en Puerto Rico, este SRS es el tercero en manejo de toneladas totales para todo Puerto Rico y recibe DS de diferentes fuentes como domésticas, municipales, comerciales e industriales provenientes de distintos municipios considerándose un SRS regional. El SRS Ponce cuenta con una extensión total de terreno de 144 acres. La huella actual total (extensión de terreno donde han sido depositados los DS) es de 85.9 acres. La huella total Sub-D (extensión de terreno donde los DS han sido depositados en celdas

certificadas como RCRA Sub-D) es de 15.8 acres. La distribución de celdas en el SRS Ponce comprende las siguientes: MSW, Fase 1, Fase 2, Fase 3, Área 3 y Área 5. La celda MSW es la celda original que opero el SRS cuando abrió sus puertas en el año 1965. Esta celda es muy antigua, grande en extensión (70.1 acres) y por su antigüedad no cumple con RCRA Sub-D. Esto significa que no cuenta con Sistema de Revestimiento Compuesto y Sistema de Colección de Lixiviados. Las celdas remanentes Fase 1 (3 acres), Fase 2 (2 acres), Fase 3 (2 acres), Área 3 (3.5 acres) y Área 5 (5.3 acres), están certificadas como Sub-D y si cuentan con Sistema de Revestimiento Compuesto y Sistema de Colección de Lixiviados. Fase 1, 2 y 3, así como Área 3 están cerradas habiendo llegado a su capacidad final de diseño. El Área 5 es lo que se conoce como el área activa del SRS donde actualmente se depositan los desperdicios sólidos. Con el permiso actual que opera este SRS, aun quedan 16.3 acres por desarrollar. Actualmente el Sistema de Colección y Control de Gas se encuentra en pleno desarrollo habiéndose perforado los primeros 55 pozos verticales de extracción que dirigen el biogas a un sistema de combustión por llama cerrada. En el 2009 el SRS Ponce recibió un promedio de 1,669 toneladas por día (TPD) de DS siendo su composición 90% domestico-municipal y 10% Industrial (residuos especiales).

Objetivos

1. Estimar el volumen de biogas que será producido a través de la vida del SRS de Ponce para determinar el rendimiento equivalente de gas natural líquido o LNG como producto.

Primero, estimamos el volumen de LG que será producido a través de la vida del SRS Ponce utilizando un modelo matemático desarrollado por la Agencia Federal de Protección Ambiental (EPA). Este modelo llamado LandGEM fue corrido el día 3 de

septiembre de 2009. LandGEM fue diseñado para ayudar a los propietarios y operadores de los SRS, a los futuros consumidores del producto final, o a cualquier otra entidad interesada, para evaluar la viabilidad y los beneficios potenciales que ofrece la recuperación y utilización del LG para energía (EPA, 2007).

LandGEM es una herramienta útil para estimar el LFG que ha producido o producirá un SRS. Mientras más certera es la información aportada, mejor son los resultados. Regularmente existen limitaciones con la información disponible como cambios en diseños o en las prácticas operacionales a través del tiempo. Estos cambios, como por ejemplo añadir a la operación convencional una operación de recirculación de lixiviados o cualquier otro líquido a la masa de los desperdicios (bioreactor), va a tener como resultado la generación de mayor cantidad de gas a una tasa mayor.

LandGEM está basado en una ecuación de primer orden que calcula la tasa de descomposición para cuantificar las emisiones de los desperdicios depositados en sistemas de relleno sanitarios tipo MSW. Este programa provee un acercamiento relativamente sencillo para estimar las emisiones de gas de un SRS tipo MSW utilizando data empírica de los SRS en Estados Unidos recolectada a través del tiempo.

Ecuación de Primer Orden para la Tasa de Descomposición:

$$Q_{CH_4} = kL_o(M_i/10)e^{-kt_{ij}}$$

Donde:

Q_{ch_4} = generación anual de gas metano en el año que se calcula ($m^3/year$)

i = incremento de año a año

n = (año del cálculo) . (año inicial de aceptación de los desperdicios)

j = 0.1 incremento de año a año

k = tasa de generación de metano ($año^{-1}$)

L_o = capacidad de potencial de generación de metano (m^3/Mg)

M_i = masa de los desperdicios aceptados en el año i^{th} (Mg)

T_{ij} = edad de la sección j de la masa de los desperdicios M_i aceptada en el año i (decimales de años. e.g..3.2 años)

El resultado que genera el modelo matemático LandGEM es en forma de tabla y delinea en forma detallada por los próximos 140 años la producción de biogas total, metano, dióxido de carbono y los compuestos orgánicos no-metanos en tres diferentes unidades: mega gramos por año, metros cúbicos por año y promedio de pies cúbicos por minuto.

Luego utilizamos una ecuación que convierte las unidades específicas para la generación de metano a galones de LNG.

Ecuación:

$$\text{LNG} = 83,320 \text{ Btu/gal}$$

Asumiendo 520 Btu por pie cúbico de LFG a un 90% de eficiencia en el proceso:
 $83,320 \text{ Btu} / (520 \text{ Btu/scf} \times 0.90) = 178.08 \text{ scf de LFG por galón de LNG}$

$$1 \text{ galon de LNG} = 178.08 \text{ scf de LFG}$$

Donde:

Btu = unidad termal británica

scf = pie cubico estándar

gal = galón

Para determinar el precio por galón del LNG promediamos los índices del mercado disponibles:

$$1\text{mmbtu} = \$4.98 \text{ (promedio de precios enero a mayo 2010 según Nymex Henry Hub)}$$

$$\text{LNG} = 83,320 \text{ Btu/gal}$$

$$1\text{mmBtu} = 12.0 \text{ Galones de LNG}$$

$$\text{LNG} = \$0.415 \text{ por galón}$$

Estas ecuaciones nos ayudaron a calcular la cantidad en galones de combustible LNG que el SRS Ponce pudiese generar en los próximos 95 años y el potencial de ingresos basado en la venta del mismo. Los resultados de las mismas fueron factores importantes para determinar la viabilidad del proyecto.

2. Evaluar el rendimiento de la producción de combustible LNG para determinar el tiempo de repago de la inversión de capital.

Evaluamos la viabilidad económica que puede ofrecer la producción de combustible LNG utilizando el concepto económico de periodo de repago (pay back). El término periodo de repago es comúnmente utilizado en economía y negocios, y se refiere al periodo de tiempo requerido para recuperar la suma original de una inversión de capital. Este estudio es relativamente sencillo y se caracteriza por cuantificar el tiempo que toma una inversión de capital específica para pagarse así misma. Por ende, el resultado es expresado en tiempo. Un periodo de repago relativamente corto (5 a 7 años) fue el estándar adoptado para determinar si el proyecto es económicamente viable o no.

Ecuación genérica del periodo de repago:

Periodo de repago = costo del proyecto / ingreso neto anual

Los siguientes factores fueron incluidos para determinar el costo del proyecto: inversión de capital para el equipo de conversión LFG a LNG, y costo de mantenimiento y operación del equipo de conversión. Para determinar el ingreso neto anual, consideramos la venta del producto final (LNG). Como la proyección del ingreso neto del proyecto fue variable de año a año debido a que la generación de gas varía a través del tiempo, el resultado se obtuvo sumando los ingresos netos calculados para cada año subsiguiente. Los valores para los costos (capital operacional y de mantenimiento) para el equipo de conversión fueron obtenidos promediando valores de instalaciones que operan equipos similares. Similarmente, los precios de mercado del producto final fueron obtenidos de los índices disponibles para los mercados de productos energéticos.

3. Determinar las estrategias para operar el SRS Ponce como un bioreactor en las celdas por desarrollar.

Para determinar las estrategias sugeridas para operar el SRS Ponce como un bioreactor en las celdas que están por desarrollarse, hicimos un análisis físico espacial del SRS Ponce, en el cual pudimos calcular cuánto terreno se encuentra disponible para desarrollo y delinear las estrategias para la distribución de estos terrenos y sus futuras celdas. También analizamos los datos a través de un estudio de caso del SRS Bioreactor de Yolo County en el Estado de California.

Análisis físico espacial SRS Ponce

Con el propósito de determinar y proponer las mejores estrategias de uso del terreno disponible para el desarrollo de futuras celdas, hicimos un análisis físico espacial que nos ayudó a determinar la mejor distribución del terreno para desarrollar celdas bioreactores. El análisis se concentró en calcular las cuerdas de terreno disponibles para desarrollo a base del permiso de operación y lo comparamos con el plan de relleno de cinco años. Estos datos fueron útiles para determinar el tamaño de las futuras celdas que no necesariamente podrían concordar con lo establecido en el plan de relleno a cinco años actual.

Estudio de caso

Sistema de Relleno Sanitario Bioreactor Yolo County en el Estado de California

El Departamento de Planificación y Obras Públicas del Condado de Yolo en el Estado de California comenzó en el año 2001 la construcción de un sistema de relleno sanitario bioreactor a escala real como parte de un programa establecido por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) llamado Proyecto XL (excelencia y liderazgo). Este

proyecto fue una propuesta innovadora que puso en práctica el concepto de sistema de relleno sanitario bioreactor a escala real. Anteriormente habían hecho un proyecto piloto en una celda pequeña de 9,000 toneladas. El objetivo principal del proyecto fue manejar los desperdicios sólidos en el sistema de relleno sanitario aplicando prácticas que aceleraran la descomposición de los desperdicios obteniendo la máxima generación de biogas a la vez que se recupera el gas metano con propósitos energéticos reduciendo así la huella y controlando las emisiones de gases de invernadero. La descomposición acelerada de los desperdicios mediante la aplicación de técnicas operacionales que distinguen un bioreactor, se logró mejorando las condiciones de los procesos biológicos incluyendo la circulación de cantidades controladas de líquidos como: lixiviados, aguas de escorrentías y aguas residuales. Este proceso es comúnmente conocido como recirculación y es el factor común que comparten todos los sistemas de relleno sanitario bioreactores.

Yolo County construyó en su primera fase dos celdas anaeróbicas, una de 6 acres y la otra de 3.5 acres de extensión. La práctica de recirculación de líquidos fue aplicada en ambas celdas que a su vez han estado altamente instrumentadas para monitorizar el desempeño del sistema bioreactor como la tasa de descomposición de los desperdicios y el cambio en la generación de biogas. Otros sistemas de medición también fueron instalados en diferentes puntos de las celdas para medir temperatura, humedad y presión hidrostática en la base del revestimiento entre otros.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DEL PROBLEMA

Estimado del volumen de biogás producido a través de la vida del SRS de Ponce y resultado del rendimiento equivalente de gas natural líquido o LNG como producto.

Los resultados del modelo matemático diseñado por EPA llamado Modelo de Emisión de Gases para un Sistema de Relleno Sanitario (LandGEM, por sus siglas en inglés) están disponibles en el Apéndice 1. Luego de haber entrado ciertos valores específicos, este programa o modelo computarizado revela resultados matemáticos en forma tabulada que reflejan un estimado del total de LFG, Metano, Dióxido de Carbono y Compuestos Orgánicos No-Metano que serán generados en un periodo de 140 años que comprende desde la apertura del SRS Ponce en el año 1965 hasta el año 2105. La Tabla 2 resume las cantidades estimadas de LFG y la posible producción de LNG generado para este mismo periodo de tiempo. Podemos observar que el pico de generación es en el año 2037 con una producción estimada de 36,485 galones de LNG por día (Figura 1).

El LNG es típicamente generado en plantas a grande escala que operan procesos de refrigeración muy complejos utilizando equipos especializados. La materia prima es el gas natural. Una producción de 15,000 toneladas diaria equivalente a 8.3 millones de galones al día de LNG es común para este tipo de plantas. Estas instalaciones de alta producción tienen la capacidad de generar LNG a un costo por galón relativamente bajo pero los costos de inversión son muy altos.

Por otro lado las plantas a pequeña escala, como la propuesta en este proyecto, se encuentran en pleno desarrollo. Por esta razón la inversión en equipo es

relativamente alta y presenta obstáculos que pudiesen afectar la costo-competitividad. Las compañías que actualmente desarrollan estas tecnologías sugieren que los proyectos con potencial competitivo deberían estar en los 10,000 galones de LNG por día y que menos de 1,000 galones por día no deben ser considerados (National Renewal Energy Laboratory, 2005). Generalmente, la eficiencia se reduce y los costos incrementan cuando la tasa de producción diaria disminuye (Kunert & Larsen, 2007).

La literatura sugiere la producción de 10,000 galones de LNG por día como base para determinar la viabilidad económica. Entonces, los resultados del LandGEM resumidos en la Tabla 2 demuestran que el SRS Ponce tiene potencial económico para producir LNG desde el presente (18,210.24 gal/día) hasta el año 2069 (10,148.25 gal/día), un periodo considerable de aproximadamente 60 años de producción y comercialización del combustible.

Determinación del periodo de repago sobre la inversión de capital

La recuperación de LFG para su transformación a LNG puede representar ahorros económicos asociados a la reducción en la operación y mantenimiento de un sistema convencional de combustión, así como también puede representar nuevas fuentes de facturación e ingresos por la venta y comercialización del combustible producido. Muchas oportunidades de prevención de contaminación y eficiencia de recursos pueden ser rentables pero otras deben ser cuidadosamente analizadas para determinar su posible rentabilidad. El término periodo de repago es comúnmente utilizado en economía y negocios, y se refiere al periodo de tiempo requerido para recuperar la suma original de una inversión de capital. Las organizaciones, especialmente privadas, continuamente valorizan el tiempo de retorno en la inversión

antes de tomar decisión en una inversión particular. Un periodo de repago utilizado comúnmente dentro de la empresa privada es de 5 a 7 años dependiendo de la inversión y el potencial para generar ganancias. La empresa privada siempre estima el tiempo de retorno en una inversión porque el norte de ellas es generar ganancias a corto plazo. El periodo de repago es un método simple para comparar alternativas. El análisis producido (Tabla 3) identifica los costos, ahorros y oportunidades de ingresos del proceso alternativo y provee un resultado que de forma sencilla se puede calcular el tiempo o periodo de repago en años.

En resumen, la inversión inicial de equipo y los ingresos se suman a los costos comunes de operación y mantenimiento, a los costos de cumplimiento ambiental y a los costos no visibles. El resultado de esta suma es el ingreso operacional. Luego, al ingreso operacional se le resta la depreciación de los costos de equipos, construcción y mejoras, instalación, ingeniería e infraestructuras y el resultado es el ingreso tributable. Finalmente, al ingreso tributable se le resta las contribuciones y el resultado es el ingreso neto o flujo de cash.

Como no hay ingresos en el año 0 por ser el periodo de construcción, mejoras, instalación y encendido (*start-up*), el flujo de cash para el año 0 es un número negativo (\$-6,582,000) y es arrastrado al año subsiguiente como inversión inicial para sumarse a la cantidad que tiene que ser recuperada. La Tabla 4 presenta los ingresos diarios y anuales estimados según los resultados del modelo matemático LandGEM. Los ingresos relacionados a la venta del LNG para el año 1 son \$3,163,827. Estos ingresos se suman como se ha explicado en el párrafo anterior a la inversión inicial de equipo, a los costos comunes de operación y mantenimiento, a los costos de cumplimiento y a los costos no visibles. Dentro de los costos comunes de operación y mantenimiento

podemos notar que hay algunos que no son recurrentes como la inversión de equipos, construcción de la planta, instalación, ingeniería e infraestructura. La depreciación fue estimada a 15 años y es un costo es recurrente. A partir del año 1, los ingresos y por consiguiente las contribuciones también son recurrentes. En el año 1 el ingreso neto o flujo de cash es negativo (\$-4,900,173). Como este número es menor que la inversión inicial del año 0 significa que todavía requiere de más tiempo para el repago.

En el año 2 y 3 el resultado para el ingreso neto sigue siendo un número negativo. En el año 4 el ingreso neto es de \$912,798. Como este es el año del repago, el ingreso específico de ese año es dividido por días (365) para obtener el ingreso neto por día (\$5,197). También, al ingreso de ese mismo año se le resta el ingreso neto del año anterior para obtener la diferencia que queda por recuperar (\$984,105). Este número refleja el saldo de la deuda de la inversión inicial que ha ido corriendo de año en año. Esta diferencia es dividida por el ingreso neto por día para ese año y el resultado es el número de días necesarios para recuperar la diferencia (189.36 días). Este número de días es dividido por los días del año (365) y el resultado es una fracción de año (0.52). Entonces, el resultado final para recuperar la inversión o el periodo de repago es en el año 4 siendo la cantidad exacta de 4.52 años o 2 años y 190 días. Un periodo de repago de 4.52 años para una inversión de capital de \$6,582,000 es aceptable dentro de la empresa privada demostrando que este proyecto es económicamente viable.

Distribución del terreno disponible para futuro desarrollo

El SRS Ponce cuenta con una extensión total de terreno de 144 acres (Figura 2). La huella actual total es de 85.9 acres donde 15.8 de ellos comprende la huella total

Sub-D. La distribución de celdas en el SRS Ponce comprende las siguientes: MSW, Fase 1, Fase 2, Fase 3, Área 3 y Área 5. La celda MSW (70.1 acres) es la celda original que opero el SRS cuando abrió sus puertas en el año 1965. Esta no cumple con RCRA Sub-D, por lo tanto no cuenta con Sistema de Revestimiento Compuesto y Sistema de Colección de Lixiviados. Las celdas remanentes Fase 1 (3 acres), Fase 2 (2 acres), Fase 3 (2 acres), Área 3 (3.5 acres) y Área 5 (5.3 acres), están certificadas como Sub-D y si cuentan con Sistema de Revestimiento Compuesto y Sistema de Colección de Lixiviados. Fase 1, 2 y 3, así como Área 3 están cerradas habiendo llegado a su capacidad final de diseño. El Área 5 es lo que se conoce como el área activa del SRS donde actualmente se depositan los desperdicios sólidos. Con el permiso actual que opera este SRS, aun quedan 16.3 acres por desarrollar y se planifica construir 4 celdas dentro de esta extensión de terreno promediando un tamaño de 4 acres o 177,500 pies cuadrados por celda.

El SRS Ponce actualmente recibe un promedio de 1,669 toneladas de DS diarias. El permiso de expansión más reciente se aprobó en el año 2008 extendiendo la capacidad del SRS para depositar un total 18,609,783 yardas cúbicas incluyendo las ya depositadas desde su apertura en 1965. Al cierre del año 2009 quedaban un total de 10,567,934 de yardas cúbicas por depositar que comparándolo con el volumen actual recibido representan unos 21.2 años de vida útil.

Las cuatro celdas aun por desarrollar representan un promedio de 4 acres y 5 años de vida útil por celda. Este tamaño de celda no representa un tamaño optimo para éstas ser operadas como bioreactores. La literatura y los resultados de los bioreactores en práctica sugieren un tamaño de celda que la misma pueda ser cerrada en un periodo de uno a dos años. Por lo tanto un cambio en el plan de construcción y secuencia de

relleno es necesario para optimizar las condiciones del SRS Ponce y convertirse en un Bioreactor. El tamaño de las celdas y su capacidad debe ser reducido.

La celda antigua MSW no cualifica para ser operada como bioreactor porque no cumple con RCRA Sub-D. No obstante, el gas generado por esta celda si puede ser utilizado beneficiosamente en conjunto con el de otras celdas. Las celdas Fase 1, Fase 2, Fase 3 y Área 3 cumplen con los requisitos RCRA Sub-D y aunque no fueron diseñadas como bioreactor, podrían operar un proceso de recirculación de líquidos en forma limitada. El área 5 una vez terminada y cerrada también pudiese operar como bioreactor limitado. Las nuevas celdas por desarrollar deben ser diseñadas para operar como bioreactor.

Resultados operacionales del estudio de caso Sistema de Relleno Sanitario Bioreactor de Yolo County en el Estado de California.

Temperatura interna en la celda

Luego de haber comenzado la operación de relleno como bioreactor controlado, ambas celdas mostraron temperaturas elevadas de 45-60°C (aproximadamente 5-15°C mayor a la temperatura promedio). También, la temperatura en la columna de los desperdicios se mantuvo estable e independiente de la temperatura exterior (ambiente) de la celda. El bioreactor controlado y sus reacciones biológicas mejoradas trajeron como resultado temperaturas elevadas que contribuyeron a un incremento en la tasa de descomposición de los desperdicios y en la producción de gas metano.

Flujo de humedad en la columna de los desperdicios

La infiltración de líquidos resulto ser más lenta y la distribución menos uniforme para estas celdas de mayor extensión comparado con la celda piloto de 9,000 toneladas. Casi todos los sensores de humedad registraron niveles mayores de

humedad. Sin embargo, algunas muestras revelaron que la distribución de los líquidos era un tanto irregular. La aplicación de líquidos fue de 43 gal/ton para la celda de 3.5 acres y 21 gal/ton para la celda de 6 acres en comparación con 55 gal/ton para la celda piloto de 9,000 toneladas. Otros problemas encontrados tras la administración de líquidos fueron filtraciones en las pendientes exteriores, baja permeabilidad en algunos puntos y variaciones en el contenido de humedad, todos relacionados a la utilización de una cubierta de tierra no suficientemente permeable.

Composición de los lixiviados

Los contaminantes comúnmente encontrados en los lixiviados se redujeron y algunos de los parámetros claves como la demanda biológica de oxígeno (BOD) y el pH evidenciaron la existencia de un proceso continuo y estable de producción de gas metano. Otros componentes de los lixiviados como el amoníaco y las sales disueltas llegaron a un nivel relativamente bajo y estable.

Composición y recuperación del LFG

El objetivo principal de este proyecto era generar LFG que eventualmente pudiese ser utilizado como fuente de energía para la generación de electricidad. El contenido de Metano rápidamente alcanzo el 50% tres meses después que comenzara el proceso de recirculación. El contenido de metano es completamente utilizable como fuente de energía para la producción de electricidad. Algo muy interesante fue que se redujeron de forma significativa las concentraciones de algunos contaminantes volátiles y otros componentes no deseables en los gases trazos del LFG como por ejemplo el benceno y el hexano. Estos resultados son parte de los beneficios de la recirculación de líquidos atribuibles a la combinación de la descomposición biológica y a la evaporación de los compuestos.

Generación de gas metano

Las dos celdas bioreactores anaeróbicas demostraron de forma contundente que la producción de gas metano fue realizada entre cuatro y siete veces más que en una celda convencional.

Asentamiento y pérdida de volumen

El asentamiento y la pérdida de volumen son beneficios muy importantes en el manejo de los desperdicios sólidos ya que están directamente relacionados con la capacidad y la vida útil del SRS. El asentamiento promedio en el bioreactor de Yolo fue de 8% mayor al de un SRS convencional.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

La meta de este trabajo fue crear un plan para el desarrollo de una planta de gas natural líquido en el Sistema de Relleno Sanitario Ponce aplicando los conceptos de desarrollo sustentable. El SRS-Ponce actualmente considera instalar un sistema de colección y control de gas convencional como lo es el sistema de combustión por llama cerrada. Este sistema no es eficiente y no controla del todo las emisiones de gases y contaminantes al aire. El SRS-Ponce tiene el potencial de mejorar su eficiencia y e incrementar la productividad de sus recursos si se opera bajo los principios que definen a un sistema bioreactor. Un sistema bioreactor recupera el biogas para comercializarlo como combustible tipo LNG mientras genera ingresos y a la misma vez mejora las condiciones económicas, sociales y ambientales del área. A menos de 7 millas lineales del SRS-Ponce se encuentra uno de los únicos ocho terminales de LNG que tienen permiso de operación en todos los Estados Unidos. Este terminal pertenece a la compañía EcoEléctrica que actualmente adquiere aproximadamente 32.5 millones de galones de LNG importado mensualmente.

Con el fin de trazar estrategias dirigidas a convertir el SRS-Ponce en un sistema bioreactor que tenga la capacidad de comercializar un combustible producto del biogas que genera, estimamos el volumen de biogas que será producido a través de la vida del SRS, determinamos el tiempo de repago para la inversión de capital requerida y analizamos un estudio de caso de un SRS que actualmente opera de forma similar a lo propuesto en este proyecto.

Los resultados de este trabajo demuestran que:

1. El SRS-Ponce tiene el potencial para producir un promedio de 23,500 galones diarios de combustible tipo LNG desde el año 2005 hasta el 2070. Esto es un periodo de 65 años de producción rentable de un combustible que su demanda futura es indiscutible.
2. El periodo de repago para recuperar la inversión necesaria para instalar una planta que transforme el biogas a gas natural líquido en el SRS-Ponce es de 4.52 años. Este periodo de tiempo es aceptable y atractivo para que cualquier firma desarrolladora considere la implantación de este proyecto.
3. La distancia relativamente corta entre el SRS-Ponce y EcoEléctrica (Figura 3), más el ahorro en transporte que EcoEléctrica paga actualmente para importar el LNG desde Trinidad y Tobago en tanqueros transatlánticos hace atractivo el negocio de compraventa del 100% del combustible producido.

El proyecto se encuentra al centro del triángulo del desarrollo sustentable considerando cada una de las prioridades y resolviendo los conflictos asociados. Las condiciones ambientales, geológicas e hidrogeológicas hacen del SRS-Ponce un lugar perfecto para convertirse en un modelo de sustentabilidad único en Puerto Rico y digno de seguir.

Limitaciones

Mientras realizábamos este plan para desarrollar una planta de gas natural líquido en el SRS-Ponce, nos encontramos con algunas limitaciones que pudiesen afectar la implantación o los resultados del mismo:

1. El modelo matemático LandGEM utiliza datos empíricos que promedia valores operacionales de otros sistemas de relleno sanitarios para sugerir un estimado de producción de biogas. Este promedio de valores operacionales posiblemente no considera la operación de bioreactores porque los bioreactores certificados por EPA son muy pocos en comparación con los SRS convencionales.
2. El modelo matemático LandGEM sugiere la posible producción de biogas a través de la vida del SRS-Ponce basándose en los volúmenes de entrada y en la clasificación de los desperdicios actuales. Si uno o ambos valores cambiaran significativamente en un futuro, los resultados y la viabilidad del proyecto pudiesen ser diferentes.
3. La tecnología disponible para licuar el biogas a pequeña escala está en pleno desarrollo lo que la hace muy costosa al momento. Aunque se demostró que el proyecto es económicamente viable en el presente, quizás sería prudente esperar unos años a que la tecnología se desarrolle y los precios disminuyan.
4. El gas natural es una materia prima (commodity) y se cotiza en el mercado de valores. Esto significa que los precios fluctúan continuamente y se incrementa la dificultad para proyectar los precios a largo plazo como hicimos en este proyecto. Sin embargo, se espera que con el tiempo la demanda de gas natural suba y por ende los precios suban reivindicando la viabilidad de este proyecto.
5. El ahorro en transportación que EcoEléctrica paga por importar LNG desde la isla de Trinidad y Tobago no pudo ser estimado por estar bajo contrato y

ser considerado material confidencial. El precio de venta al por mayor del combustible LNG producido por el SRS-Ponce podría ser aun mayor al sugerido debido a que el ahorro en trasportación por parte de EcoEléctrica debe ser un número considerable.

Recomendaciones

Con el propósito de implementar este plan que propone un modelo de desarrollo sustentable y economía inteligente para el SRS-Ponce se recomienda lo siguiente:

1. Continuar con la instalación del sistema de colección y control de gas como planeado. Aunque el sistema de combustión por llama cerrada no es del todo eficiente, el mismo es necesario como sistema de apoyo en caso de que la planta transformadora se averíe o este en mantenimiento. Según RCRA Sub-D el gas tiene que ser colectado y controlado de forma continua, por esta razón siempre hay que tener un sistema de control por llama como apoyo al sistema principal de transformación.
2. La firma Republic Services operadora del SRS-Ponce debe comenzar de forma inmediata el proceso de enmienda o modificación del permiso actual para operar el SRS-Ponce como un bioreactor y para cambiar el plan de relleno a cinco años. Usualmente los procesos que involucran permisos o enmiendas a permisos requieren de mucho tiempo por tratarse de agencias gubernamentales. La aprobación para operar el SRS-Ponce como un bioreactor y el cambio en la secuencia de relleno atraerá más fácilmente la atención de desarrolladores interesados en estos proyectos porque asegura una mejor calidad, cantidad y control del biogas generado.

CAPÍTULO VI

ESTRATEGIAS Y PLAN DE ACCIÓN

Los capítulos anteriores presentan la situación actual del Sistema de Relleno Sanitario de Ponce, así como la viabilidad operacional y económica que tiene el sistema para convertirse en un SRS-Bioreactor. Un sistema como éste sería único en Puerto Rico y representa un verdadero ejemplo de desarrollo sustentable y economía inteligente. Para desarrollar las oportunidades identificadas en el análisis del problema, se presentan las estrategias que serán propuestas para lograr convertir el SRS Ponce en un SRS-Bioreactor. Este SRS-Bioreactor va a operar de la manera más eficiente para generar, capturar y transformar el LFG a un combustible sustentable con capacidad real para ser comercializado. Al final, este capítulo es resumido en forma de matriz donde se establecen las estrategias, las entidades responsables, el costo aproximado, el tiempo requerido y el resultado esperado necesario para atender el problema de planificación y los cursos de acción.

Descripción de estrategias

Estrategias para implementar el uso de la tecnología que transforma el LFG

1. Preparar un aviso de intención y una invitación a subasta

Diferentes firmas desarrolladoras que pertenecen a la industria que recupera LFG para comercializarlo como un componente energético están muy interesadas en desarrollar nuevas plantas alrededor del mundo. Por esto la firma Republic Services, como actual operadora del SRS Ponce, debe contratar a un costo aproximado de \$35,000 dólares una firma de consultores expertos en el tema para

que desarrollen y preparen a nombre de ella un aviso de intención y luego una invitación a subasta. El aviso de intención detallará los atractivos que presenta el SRS-Ponce como potencial productor de LNG y luego la invitación a subasta invitará a los desarrolladores a presentar sus propuestas. Ambos documentos serán distribuidos por el consultor dentro de la industria de desarrolladores de proyectos de recuperación de LFG dentro de un término no mayor de tres meses. Las firmas desarrolladoras, luego de evaluar sus propios estudios, presentarán su interés y revelarán la tecnología que utilizarían para el desarrollo del proyecto y los detalles para una posible negociación con los operadores.

2. Contratar la firma desarrolladora que construirá y operará la planta de conversión

Republic Services, asesorado por la firma de consultores contratada, debe evaluar las propuestas sometidas y determinar cuál es la mejor opción para negociación. Luego, seleccionará la mejor opción subastada, y contratará al desarrollador designado. El costo de consultoría para asesorar en la decisión es de aproximadamente \$3,000 dólares y la decisión final será anunciada dentro de un término no mayor a tres meses. Regularmente en este tipo de contratación el operador, con el consentimiento del Municipio de Ponce como propietario, concede al desarrollador los derechos de propiedad del biogas generado y los permisos para el desarrollo de una planta de transformación de LFG en algún predio adyacente. El operador y la firma desarrolladora acordarán una cantidad que el desarrollador le pagará al operador en forma de regalías por concepto de la venta y comercialización del producto final LNG. Los precios establecidos fluctuarán en relación a los precios establecidos por el mercado. El desarrollador se encargará de todo tipo de inversión relacionada a los costos de desarrollo, construcción, operación, mantenimiento,

comercialización y distribución del producto generado. El Municipio de Ponce como propietario del SRS actualmente recibe regalías por parte del operador relacionadas al tonelaje de DS que entra a diario al SRS. Dentro de la regalía que el desarrollador le pagará al operador por concepto de la venta del combustible, el operador acordará con el propietario un porcentaje designado de las regalías pagadas por el desarrollador.

3. Construir, operar y mantener la planta transformadora de LFG

Luego que el desarrollador es oficialmente contratado por el operador del SRS, este debe comenzar el proyecto de desarrollo y construcción de la planta transformadora de LFG en un término de tiempo no mayor a un año. El costo de construcción para una planta transformadora de LFG varía en relación a la tecnología aplicada. Sin embargo la literatura apunta que el promedio de construcción para una planta como la propuesta es de aproximadamente 5.3 millones de dólares y la operación y mantenimiento es aproximadamente 1 millón por año.

Con esta inversión se espera impactar positivamente la economía local de forma directa promoviendo empleos temporeros en la fase de construcción y permanentes en la fase de operación y mantenimiento. También la economía local se impactará de forma indirecta con los bienes y servicios que demandará esta operación en todas sus fases.

Estrategias para diseñar, construir y operar las celdas RCRA Sub-D como bioreactor

1. Someter a las agencias pertinentes una solicitud que permita al SRS-Ponce ser operado como un sistema bioreactor en sus celdas RCRA Sub-D

Todo SRS en Puerto Rico opera bajo un permiso bien específico otorgado por la ADS. Cualquier cambio en la operación de un SRS debe ser aprobado por ADS

mediante una modificación. La firma operadora del SRS-Ponce Republic Services someterá a la Autoridad de Desperdicios Sólidos de Puerto Rico y a toda otra agencia reguladora pertinente una solicitud para modificar el permiso de operación existente. La firma operadora contratará a un costo aproximado de \$150,000 dólares una firma de consultores expertos en la materia para preparar una modificación al permiso de operación existente. Esta solicitud será sometida para su aprobación a las agencias reguladoras en un término no mayor de seis meses y detallará todos los diseños, los planes de secuencia de relleno, los cambios operacionales y los controles ambientales que serán aplicados a las celdas bioreactores.

2. Construir las nuevas celdas como bioreactor

Una celda es un área designada, planificada, diseñada y muy específica donde los DS serán depositados dentro del SRS. Los estándares específicos para la construcción de la celda como por ejemplo la profundidad de la excavación y el área total van a depender directamente del lugar donde se establecerá la celda de acuerdo con los planes y secuencias de relleno sometidos.

A un costo aproximado de \$1,000,000 por celda, la firma operadora Republic Services construirá celdas diseñadas para funcionar como bioreactor. Estas celdas serán de un tamaño relativamente pequeño en comparación a un SRS convencional y se construirán aproximadamente cada dos años de acuerdo a la necesidad de espacio. Un área promedio de una celda relativamente pequeña, y que ha demostrado ser eficiente y costo-efectiva a la vez podría estar entre los 200,000 a 350,000 pies cuadrados (4.6 a 8 acres) de superficie en el suelo de la celda. Es altamente recomendable hacer un número mayor de celdas de menor tamaño en un

SRS bioreactor, de esta forma se controla y se prolonga con mayor efectividad la generación, la calidad, la consistencia y muy importante la duración a largo plazo de la generación total de gas para ese sistema.

3. Operar las celdas existentes RCRA Sub-D y las nuevas celdas por desarrollar como bioreactor

Los estándares operacionales para un SRS bioreactor que pretende establecer un programa de recuperación y transformación de LFG para ser comercializado como combustible no son muy diferentes a los parámetros y estándares operacionales de un SRS convencional que cumple con RCRA Sub-D. Sin embargo, algunos parámetros van más allá para buscar la maximización en la eficiencia, disponibilidad, producción y tratamiento del LFG que se pretende comercializar.

La recirculación, característica más remarcable en un bioreactor, es el proceso por el cual los lixiviados u otros líquidos son devueltos a la celda con el propósito de aumentar el nivel de humedad. Este incremento en el nivel de humedad aumenta la tasa de descomposición de los DS, la producción de gas y la vida útil de la celda.

El operador del SRS-Ponce Republic Services, a un costo incremental de aproximadamente \$200,00 por año por la vida útil del SRS (21 años), aplicará la práctica de recirculación en sus celdas certificadas como Sub-D y en las celdas nuevas por desarrollar controlando cualquier líquido destinado a la celda y asegurándose que el contenido promedio de humedad de la misma no pase del 50% con el propósito de mantener la integridad del sistema de revestimiento compuesto, el suelo de la celda y el subsuelo del SRS (35 a 40 es el por ciento ideal). La recirculación será aplicada utilizando el método de inyección por trincheras. Este método es menos agresivo y controla de mejor forma los olores

objetables que el de rocío por manguera en el área de tiro. Sin embargo, se tomará en consideración la distancia entre los pozos y las pendientes exteriores para evitar los brotes y la filtración de los lixiviados.

Al igual que en un sistema convencional se instalará un sistema de recuperación y control de gases (GCCS, por sus siglas en inglés). Este es un sistema complejo de pozos, tuberías, motores, bombas, válvulas, paneles eléctricos y controles que trabajan al vacío para recuperar, controlar y procesar el LFG.

Cabe destacar que aunque la celda antigua MSW, considerada pre Sub-D, tendrá también un sistema GCCS que aportará a la planta de transformación, la práctica de recirculación no será aplicada en esta celda por sus limitaciones en el sistema de revestimiento. El sistema de revestimiento en esta celda no es uno compuesto y no cuenta con la tecnología reciente de membrana flexible.

Por último, se instalará un revestimiento plástico flexible tipo FML entre la cubierta intermedia y la final en las celdas Sub-D. Cuando toda la celda haya llegado a su capacidad final, y el revestimiento este instalado cubriendo el total de la superficie superior de la celda, entonces se aplicará la cubierta final y los controles de erosión. El propósito principal de este revestimiento tipo FML es actuar como una tapa de caldero la cual no permitirá la intrusión de aire en la celda y la migración de LFG fuera de la celda.

4. Desarrollar e implantar un plan de monitoreo para evaluar el funcionamiento de las celdas bioreactores

Los resultados del modelo matemático LandGEM analizados en el capítulo anterior reflejan la posible generación de LFG por un periodo de tiempo determinado. Este modelo matemático genera resultados muy generales basados en una data empírica recolectada de diferentes SRS convencionales. La operación

de un SRS bioreactor debe incrementar la generación de LFG. Estableciendo un plan de monitoreo para evaluar el funcionamiento de las celdas bioreactores es la única manera de corroborar cuan efectivo o no esta siendo la operación de este sistema. EL plan de monitoreo también será muy importante para conocer el comportamiento de las celdas como por ejemplo la temperatura interna, flujo de humedad, composición de los lixiviados, generación de gas y asentamiento y perdida de volumen entre otros. De esta forma se pueden corregir o prevenir situaciones operacionales no deseadas o maximizar parámetros deseados.

La firma operadora Republic Services desarrollará e implementará a un costo aproximado de \$30,000 dólares por año, y por el resto de la vida útil del SRS-Ponce, un plan de monitoreo en las celdas bioreactores para obtener información específica y científica en algunos parámetros como: la temperatura interna de las celdas, el flujo de humedad en la columna de los desperdicios, la composición de los lixiviados, la tasa de generación de LFG, la composición y recuperación del LFG y el asentamiento o perdida de volumen entre otros.

Estrategias para comercializar el producto principal LNG

1. Desarrollar y finalizar un contrato de compraventa entre la firma desarrolladora y EcoEléctrica, Inc.

La firma EcoEléctrica, Inc. es una planta co-generadora de electricidad que adueña y opera el único terminal de gas natural líquido (LNG) en Puerto Rico. Este terminal está preparado con uno de los tanques más grandes del mundo para almacenar LNG. Actualmente EcoEléctrica importa el LNG desde la isla de Trinidad y Tobago el cual es transportado en unos gigantes transatlánticos preparados especialmente para la transportación de este tipo de material.

Convenientemente EcoEléctrica se encuentra en el Municipio de Peñuelas a unas 6.9 millas lineales o 13.6 millas transitables al suroeste del SRS-Ponce. Esta distancia relativamente corta entre el comprador y el vendedor facilita la posibilidad de negociación para finalizar un contrato de compraventa del producto LNG el cual beneficiaría a ambas partes.

A un costo de \$50,000 dólares asociados a consultoría legal, y dentro de un periodo no mayor a tres meses, la firma desarrolladora contratada y EcoEléctrica desarrollarán y finalizarán un contrato de compraventa de LNG. En este contrato se establecerán los pormenores de la negociación como: transportación, disponibilidad, controles de calidad, precios y términos de pago entre otros. Siendo el LNG el producto o la materia prima principal de EcoEléctrica para su producción de energía, el desarrollador debe garantizar gran parte de la producción a EcoEléctrica. La transportación del LNG va a ser el factor determinante de competitividad para que ambas firmas se beneficien con esta negociación. La firma desarrolladora estará en una posición sólida para vender su nuevo producto energético mientras EcoEléctrica aumentará sus ganancias por los ahorros en la transportación.

Matriz de estrategias para el SRS-Ponce

OBJETIVO	ESTRATEGIA	ENTIDAD RESPONSIBLE	COSTO APROXIMADO	PERIODO REQUERIDO PARA IMPLANTACION	RESULTADO ESPERADO
Implantar el uso de la tecnología que transforma el LFG	Preparar una noticia de intención y una invitación a subasta	Republic Services, Inc.	\$35,000	3 meses	Las firmas desarrolladoras presentarán su interés y revelarán la tecnología que utilizarían para el desarrollo del proyecto y los detalles para una posible negociación con la firma operadora Republic Services.
Implantar el uso de la tecnología que transforma el LFG	Contratar la firma desarrolladora que construirá y operará la planta de conversión	Republic Services, Inc.	\$3,000	3 meses	El Operador seleccionará un ganador de la subasta, y contratará al desarrollador designado que presente la mejor opción de negociación
Implantar el uso de la tecnología que transforma el LFG	Construir, operar y mantener la planta transformadora de LFG	Firma desarrolladora contratada	\$5,300,000	6 meses a 1 año	El desarrollador comenzará el proyecto de desarrollo y construcción de la planta transformadora de LFG. Con esta inversión se espera impactar positivamente la economía local de forma directa promoviendo empleos y de forma indirecta con los bienes y servicios que demandará esta operación en todas sus fases
Diseñar, construir y operar las celdas RCRA Sub-D como bioreactor	Someter a las agencias pertinentes una solicitud que permita al SRS-Ponce ser operado como un sistema bioreactor en sus celdas RCRA Sub-D	Republic Services, Inc.	\$150,000	6 meses	Las agencias reguladoras aprobarán una modificación al permiso de operación existente

OBJETIVO	ESTRATEGIA	ENTIDAD RESPONSIBLE	COSTO APROXIMADO	PERIODO REQUERIDO PARA IMPLANTACION	RESULTADO ESPERADO
Diseñar, construir y operar las celdas RCRA Sub-D como bioreactor	Construir las nuevas celdas como bioreactor	Republic Services, Inc.	\$1,000,000 por celda	cada 2 años aproximadamente	Hacer un número mayor de celdas de menor tamaño, de esta forma se controla y se prolonga con mayor efectividad la generación, la calidad, la consistencia y muy importante la duración a largo plazo de la generación total de gas para ese sistema. Instalar un sistema de recirculación de líquidos. Instalar toda la instrumentación necesaria para apoyar el plan de monitoreo
Diseñar, construir y operar las celdas RCRA Sub-D como bioreactor	Operar las celdas existentes RCRA Sub-D y las nuevas celdas por desarrollar como bioreactor	Republic Services, Inc.	\$200,000 por año	Aproximadamente 21 años. Resto de la vida útil del SRS-Ponce	Maximizar la eficiencia, disponibilidad, producción y tratamiento del LFG que se pretende comercializar.
Diseñar, construir y operar las celdas RCRA Sub-D como bioreactor	Desarrollar e implementar un plan de monitoreo para evaluar el funcionamiento de las celdas bioreactores	Republic Services, Inc.	\$30,000 por año	Aproximadamente 21 años. Resto de la vida útil del SRS-Ponce	Comparar el rendimiento de las celdas bioreactores. Corregir o prevenir situaciones operacionales no deseadas. Maximizar parámetros deseados
Comercializar el producto principal LNG	Desarrollar y finalizar un contrato de compraventa entre la firma desarrolladora y EcoElectrica, Inc.	Firma desarrolladora contratada y EcoElectrica, Inc.	\$50,000	3 meses	Acordar mediante contrato los términos y condiciones para la compraventa del producto LNG. La firma desarrolladora estará en una posición sólida para vender su nuevo producto energético mientras EcoElectrica aumentará sus ganancias por los ahorros en la transportación

LITERATURA CITADA

Akinbami, J. F. (2001). Biogas energy use in Nigeria: current status, future prospects and policy implications. *Renewable Sustainable Energy Review*, 5:97-112.

Al-Dabbas, M. A. (1998). Reduction of methane emissions and utilization of municipal waste for energy in Amman. *Renewable Energy*, 14:427-434.

Autoridad de Desperdicios Sólidos de Puerto Rico. (2003). *Final Report Waste Characterization Study*. San Juan.

Autoridad de Desperdicios Sólidos de Puerto Rico. (2004). *Plan estratégico para el manejo de los residuos sólidos en Puerto Rico*. San Juan, Puerto Rico.

Autoridad para el Manejo de los Desperdicios Sólidos de Puerto Rico. (1991). *Plan Regional de Facilidades*. San Juan, Puerto Rico.

Benson, C., Barlaz, M., Lane, D., & Rawe, J. (2002). Refuse decomposition in the presence of leachate recirculation. *Journal of Environmental Engineering*, 128:228-236.

Berrueta, J., & Castrillón, L. (1992). Anaerobic treatment of leachates in uasb reactors. *Biotechnology*, 54:33-37.

Bilitewski, B. H. (1994). *Waste Management*. Berlin: Springer.

Bodensteiner, J. (2007). Converting waste streams to energy and other valuable commodities. *BioCycle*, 48(7):62-64.

Bogner, J., Meadows, M., & Repa, E. (1998). A New Perspective of Measuring and Modeling of Landfill Methane Emissions; *Waste Age*, 29:118-130.

- Campbell, S. (1996). *Green Cities, Growing Cities, Just Cities? Urban Planning and the Contradictions of Sustainable Development. Readings in planning theory.* Malden, MA: Scott Campbell & Susan Fainstein. Blackwell Publishing.
- Center for Liquefied Natural Gas. (2009). *How LNG is used today.* Recuperado de <http://www.lngfacts.org/LNG-Today/default.asp>
- Cheng, S., Lin, B., Hsu, B., & Shu, M. (2009). Fault-tree analysis for liquefied natural gas terminal emergency shutdown system. *Expert Systems with Applications*, 36(9):11918-11924.
- Cook, W.J., Brown, W. R., Siwajek, L., Neyman, M., Reppert, T., & Smackey, B. M. (2005). *Production of Liquid Methane Truck Fuel from Landfill Gas.* Brookhaven National Laboratory. Upton, New York, USA.
- Davis, S., Diegel, S., & Boundy, R. (2008). *Transportation Energy Data Book.* Ed. 28, Oakridge National Laboratory, ORNL-6984.
- Demirbas, A. (2006). Biogas Production from the Organic Fraction of Municipal Solid Waste. *Energy Sources*, 28(12):1127-1134.
- Departamento de Desarrollo Económico y Comercio de Puerto Rico. (2008). *Ley de Incentivos Económicos para el Desarrollo de Puerto Rico del 28 de mayo de 2008.* 2008LPR73
- Erses, A.S., & Onay, T. T. (2003). In situ heavy metal attenuation in landfills under methanogenic conditions. *Journal of Hazardous Materials*, 99(2):159-175.
- Estado Libre Asociado de Puerto Rico. (1952). *Constitución del Estado Libre Asociado de Puerto Rico del 25 de Julio de 1952.* 01AP LPRA.
- Esty, D. C., & Winston, A. S. (2006). *Green to Gold: How smart companies use environmental strategy to innovate, create value, and build competitive advantage.* New Haven, USA: Yale University Press.
- Ferrey, S. (2007). *Converting Brownfield Environmental Negatives into Energy Positives.* Boston: Boston College Environmental Affairs Law Review.

- Fischer, P. A. (2001). Natural gas: igniting new markets. Part 8: monetizing stranded gas. *World Oil*, 222(11):72-80.
- Goldstein, J. (2004). Making a Reality of Biogas Potential. *BioCycle* , 45(12):45-46.
- Gongaware, D. F., Barclay, M. A., Barclay, J. A., & Skrzykowski, M. P. (2004). Conversion of a waste gas to liquid natural gas. *AIP Conference Proceedings*, 710(1):83-90.
- González, F., & Rodríguez, P. (2003). *Puerto Rico Environmental Law Handbook*. Rockville, Maryland, USA: Government Institutes.
- Gordon, D., Burdelski, J., & Cannon, J. (2003). *Greening Garbage Trucks: New Technologies for Cleaner Air*. New York: INFORM, Inc.
- Hansen, T. (2006) Landfill Gas Provides Solution to Rising Natural Gas Prices. *Power Engineering*, 110(1):50.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. Technical Summary in *Climate Change* (2001). *The Scientific Basis*. Joos, F., Ramirez-Rojas, A., Stone J. M. R., & Zillman, J. Cambridge University: Cambridge, U.K.
- Junta de Calidad Ambiental y Departamento de Salud de Puerto Rico. (1971). *Plan Comprensivo para el Manejo de los Desperdicios Sólidos en Puerto Rico*. San Juan, Puerto Rico: Junta de Calidad Ambiental.
- Junta de Calidad Ambiental. (2004). *Ley sobre Política Pública Ambiental del 22 de septiembre de 2004*. 2004LPR416. 12 LPRA.
- Kunert, S., & Larsen, O. B. (2007). *Small is beautiful – Mini LNG Concept*. Norway: Hamworthy Gas Systems AS.
- Lovins, A. B., & Lovins, L. H. (2005). A New Age of Resource Productivity. *Environmentalism & the technologies of tomorrow: shaping the next industrial revolution*. Washington, DC: Robert Olson & David Rekeski. Island Press.

- National Renewable Energy Laboratory. (2005). *Franklin County Sanitary Landfill – Landfill Gas (LFG) to Liquefied Natural Gas (LNG) – Project*. Recuperado de <http://www.afdc.energy.gov/afdc/pdfs/landfillreportfinal.pdf>.
- Nazario, I. (2003). *Manual de Desarrollo y Operación de un Sistema de Relleno Sanitario en Puerto Rico*. San Juan: Autoridad de Desperdicios Sólidos.
- Papageorgiou, A., Barton, J. R., & Karagiannidis, A. (2009). Assessment of the greenhouse effect impact of technologies used for energy recovery from municipal waste: A case for England. *Journal of Environmental Management*, 90(10):2999-3012.
- Reno, J. O. (2008). *Out of Place: Possibility and Pollution at a Transnational Landfill*. Disertación doctoral no publicada. University of Michigan, Michigan, USA.
- Rodriguez-Iglesias, J., Vazquez, I., Marañón, E., Castrillon, L., & Sastre, H. (2005). Extraction Wells and Biogas Recovery Modeling in Sanitary Landfills. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 55(2):173-80.
- Rohena, S. (2006). *El Manejo de los Desperdicios Sólidos Peligrosos y No Peligrosos*. San Juan, Puerto Rico: No publicado.
- Rynk, R. (2000). What is a bioreactor landfill? How does it differ from normal landfills?. *BioCycle*, 41(12):23-24.
- Shah, N. M., Hoadley, A. F., & Rangaiah, G. P. (2009). Inherent Safety Analysis of a Propane Precooled Gas-Phase Liquefied Natural Gas Process. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(10):4917-4927.
- Tchobanoglous, G. T. (1977). *Solid Wastes: Engineering Principles and Management Issues*. McGraw-Hill.
- Tchobanoglous, G., & Kreith, F. (2002). *Handbook of Solid Waste Management*. New York: McGraw Hill.
- Tolaymat, T. M., Green, R. B., Hater, G. R., Barlaz, M. A., Black, P., Bronson, D., & Powell, J. (2010). Evaluation of Landfill Gas Decay Constant for Municipal Solid Waste Landfills Operated as Bioreactors. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 60(1):91-97.

- Townsend, T., Wise, W., & Jain, P. (2005). One-Dimensional Gas Flow Model for Horizontal Gas Collection Systems at Municipal Solid Waste Landfills. *Journal of Environmental Engineering*, 131(12):1716-1723.
- U. S. Congress. (1969). *National Environmental Policy Act*. Public Law 91-190. 42 USCA§§4321-4370d
- U. S. Department of Energy. (2005). *Energy Policy Act*. Public Law 109-58 from August, 8, 2005. H. R. 6.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2003). *Municipal Solid Waste Generation, Recycling, and Disposal in the United States: Facts and Figures for 2003*. Recuperado de <http://www.epa.gov/msw/pubs/msw03rpt.pdf>.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2006). Air Quality Criteria for Ozone and Related Photochemical Oxidants. Recuperado de <http://cfpub.epa.gov/ncea>.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2007). *Central America Landfill Gas Model*. Recuperado de <http://www.epa.gov/lmop/international>.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2008). *Municipal Solid Waste Generation, Recycling, and Disposal in the United States: Facts and Figures for 2006*. EPA-530-R08010. Washington, DC.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2009). *Bioreactors*. Recuperado de <http://www.epa.gov/osw/nonhaz/municipal/landfill/bioreactors.htm>.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2009). *Municipal Solid Waste Generation, Recycling, and Disposal in the United States Detailed Tables and Figures for 2008*. U.S. Environmental Protection Agency Office of Resource Conservation and Recovery. Recuperado de <http://www.epa.gov/epawaste/nonhaz/municipal/pubs/msw2008data.pdf>.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2010). *Landfill Methane Outreach Program*. Recuperado de <http://www.epa.gov/lmop>.

- Vandor, D. (1999). *Liquefied Natural Gas (LNG): An alternative fuel from landfill gas (LFG) and waste water digester gas*. Brookhaven National Laboratory. Upton, NY.
- Wanichpongpan, W., & Gheewala, S. H. (2007). Life Cycle Assessment as a Decision Support Tool for Landfill Gas to Energy Projects. *Journal of Cleaner Production*. Bangkok: The Joint Graduate School of Energy and Environment, 15(18):1819-1826.
- Weinhold, B. (2008). Ozone Nation. *Environmental Health Perspectives*, 116(7):302-305.
- Yu, L., Batlle, F., Carrera, J., & Lloret, A. (2009). Gas flow to a vertical gas extraction well in deformable MSW landfills. *Journal of Hazardous Materials*, 168(2):1404-1416.
- Zietsman, J., M. Bari, A. Rand, B. Gokhale, D. Lord & S. Kumar (2008). Feasibility of Landfill Gas as a Liquefied natural Gas Fuel for Refuse Trucks. *Journal of the Air & Waste Management Association* , 58(5):613-619.

TABLAS

Tabla 1

Distribución regional de instalaciones que procesan desperdicios sólidos no peligrosos en Estados Unidos. Los sistemas de relleno sanitario son el método más común para la disposición de los DS y los que procesan la mayor parte del volumen total. Fuente: Municipal Solid Waste Generation, Recycling, and Disposal in the United States Detailed Tables and Figures for 2008, Environmental Protection Agency

Region	Numero Instalaciones Recuperacion de Material (MRF)	Numero Instalaciones Desperdicios-Energia (WTE)	Numero Instalaciones Sistemas Relleno Sanitarios (SRS)
Noreste	145	40	134
Sur	152	23	726
Medioeste	136	16	416
Oeste	112	8	536
TOTAL	545	87	1812

Tabla 2

Volumen anual estimado de generación de LFG y potencial producción de combustible LNG

Año	Total LFG prom. (scfm)	LNG prom. (galones/día)	Año	Total LFG prom. (scfm)	LNG prom. (galones/día)	Año	Total LFG prom. (scfm)	LNG prom. (galones/día)
1965	0	0	2012	2.583E+03	20886.79	2059	1.872E+03	15137.47
1966	3.200E+01	258.76	2013	2.738E+03	22140.16	2060	1.798E+03	14539.08
1967	6.276E+01	507.49	2014	2.879E+03	23280.32	2061	1.728E+03	13973.05
1968	9.226E+01	746.04	2015	3.007E+03	24315.36	2062	1.660E+03	13423.18
1969	1.207E+02	976.01	2016	3.129E+03	25301.89	2063	1.595E+03	12897.57
1970	1.479E+02	1195.96	2017	3.247E+03	26256.06	2064	1.532E+03	12388.14
1971	1.741E+02	1407.82	2018	3.360E+03	27169.81	2065	1.472E+03	11902.96
1972	1.993E+02	1611.59	2019	3.461E+03	27986.52	2066	1.414E+03	11433.96
1973	2.235E+02	1807.28	2020	3.552E+03	28722.37	2067	1.359E+03	10989.22
1974	2.467E+02	1994.88	2021	3.640E+03	29433.96	2068	1.306E+03	10560.65
1975	2.690E+02	2175.20	2022	3.724E+03	30113.21	2069	1.255E+03	10148.25
1976	2.905E+02	2349.06	2023	3.805E+03	30768.19	2070	1.205E+03	9743.94
1977	3.111E+02	2515.63	2024	3.876E+03	31342.32	2071	1.158E+03	9363.88
1978	3.309E+02	2675.74	2025	3.937E+03	31835.58	2072	1.113E+03	9000.00
1979	3.499E+02	2829.38	2026	3.996E+03	32312.67	2073	1.069E+03	8644.20
1980	3.682E+02	2977.36	2027	4.053E+03	32773.58	2074	1.027E+03	8304.58
1981	3.858E+02	3119.68	2028	4.108E+03	33218.33	2075	9.869E+02	7980.32
1982	4.025E+02	3254.72	2029	4.160E+03	33638.81	2076	9.482E+02	7667.39
1983	4.190E+02	3388.14	2030	4.211E+03	34051.21	2077	9.110E+02	7366.58
1984	4.344E+02	3512.67	2031	4.259E+03	34439.35	2078	8.753E+02	7077.90
1985	4.496E+02	3635.58	2032	4.306E+03	34819.41	2079	8.409E+02	6799.73
1986	4.637E+02	3749.60	2033	4.350E+03	35175.20	2080	8.080E+02	6533.69
1987	4.778E+02	3863.61	2034	4.393E+03	35522.91	2081	7.763E+02	6277.36
1988	4.908E+02	3968.73	2035	4.434E+03	35854.45	2082	7.459E+02	6031.54
1989	5.038E+02	4073.85	2036	4.474E+03	36177.90	2083	7.166E+02	5794.61
1990	5.158E+02	4170.89	2037	4.512E+03	36485.18	2084	6.885E+02	5567.39
1991	5.273E+02	4263.88	2038	4.335E+03	35053.91	2085	6.615E+02	5349.06
1992	5.389E+02	4357.68	2039	4.165E+03	33679.25	2086	6.356E+02	5139.62
1993	5.496E+02	4444.20	2040	4.002E+03	32361.19	2087	6.107E+02	4938.27
1994	5.603E+02	4530.73	2041	3.845E+03	31091.64	2088	5.867E+02	4744.20
1995	5.701E+02	4609.97	2042	3.694E+03	29870.62	2089	5.637E+02	4558.22
1996	5.800E+02	4690.03	2043	3.549E+03	28698.11	2090	5.416E+02	4379.51
1997	5.890E+02	4762.80	2044	3.410E+03	27574.12	2091	5.204E+02	4208.09
1998	5.982E+02	4837.20	2045	3.276E+03	26490.57	2092	5.000E+02	4043.13
1999	6.065E+02	4904.31	2046	3.148E+03	25455.53	2093	4.804E+02	3884.64
2000	6.149E+02	4972.24	2047	3.025E+03	24460.92	2094	4.615E+02	3731.81
2001	6.226E+02	5034.50	2048	2.906E+03	23498.65	2095	4.434E+02	3585.44
2002	7.718E+02	6240.97	2049	2.792E+03	22576.82	2096	4.260E+02	3444.74
2003	9.279E+02	7503.23	2050	2.683E+03	21695.42	2097	4.093E+02	3309.70
2004	1.087E+03	8789.76	2051	2.577E+03	20838.27	2098	3.933E+02	3180.32
2005	1.322E+03	10690.03	2052	2.476E+03	20021.56	2099	3.779E+02	3055.80
2006	1.474E+03	11919.14	2053	2.379E+03	19237.20	2100	3.630E+02	2935.31
2007	1.684E+03	13617.25	2054	2.286E+03	18485.18	2101	3.488E+02	2820.49
2008	1.885E+03	15242.59	2055	2.196E+03	17757.41	2102	3.351E+02	2709.70
2009	2.077E+03	16795.15	2056	2.110E+03	17061.99	2103	3.220E+02	2603.77
2010	2.252E+03	18210.24	2057	2.027E+03	16390.84	2104	3.094E+02	2501.89
2011	2.421E+03	19576.82	2058	1.948E+03	15752.02	2105	2.972E+02	2403.23

Tabla 3

Análisis financiero para calcular el periodo de repago sobre la inversión de capital

Elementos	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Inversion Inicial Equipo	\$ 2,500,000.00	\$ (6,582,000.00)	\$ (4,900,173.11)	\$ (3,028,492.12)	\$ (984,105.12)	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Ingresos	\$ 0	\$ 3,163,826.89	\$ 3,353,681.00	\$ 3,526,386.99	\$ 3,683,169.74	\$ 3,832,603.30	\$ 3,977,137.40	\$ 4,115,547.17
Costos Comunes Operación y Mantenimiento								
Preparacion de la Facilidad	\$ 500,000.00	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Instalación de Equipo	\$ 1,000,000.00	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Ingeniería	\$ 250,000.00	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Conexión Infraestructura	\$ 250,000.00	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Labor	\$ 120,000.00	\$ 120,000.00	\$ 120,000.00	\$ 120,000.00	\$ 120,000.00	\$ 120,000.00	\$ 120,000.00	\$ 120,000.00
Start-up	\$ 50,000.00	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Entrenamiento	\$ 50,000.00	\$ 50,000.00	\$ 50,000.00	\$ 50,000.00	\$ 50,000.00	\$ 50,000.00	\$ 50,000.00	\$ 50,000.00
Utilidades	\$ 150,000.00	\$ 350,000.00	\$ 350,000.00	\$ 350,000.00	\$ 350,000.00	\$ 350,000.00	\$ 350,000.00	\$ 350,000.00
Mantenimiento	\$ 250,000.00	\$ 350,000.00	\$ 350,000.00	\$ 350,000.00	\$ 350,000.00	\$ 350,000.00	\$ 350,000.00	\$ 350,000.00
Total	\$ 2,620,000.00	\$ 870,000.00	\$ 870,000.00	\$ 870,000.00	\$ 870,000.00	\$ 870,000.00	\$ 870,000.00	\$ 870,000.00
Costos de Cumplimiento								
Plan de Respuesta a Emergencias	\$ 50,000.00	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Entrenamiento Salud y Seguridad	\$ 12,000.00	\$ 12,000.00	\$ 12,000.00	\$ 12,000.00	\$ 12,000.00	\$ 12,000.00	\$ 12,000.00	\$ 12,000.00
Muestreo y Pruebas de Laboratorios	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00
Equipo de Seguridad	\$ 20,000.00	\$ 20,000.00	\$ 20,000.00	\$ 20,000.00	\$ 20,000.00	\$ 20,000.00	\$ 20,000.00	\$ 20,000.00
Preparacion de Permisos	\$ 50,000.00	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Cuotas de Permisos	\$ 80,000.00	\$ 80,000.00	\$ 80,000.00	\$ 80,000.00	\$ 80,000.00	\$ 80,000.00	\$ 80,000.00	\$ 80,000.00
Total	\$ 312,000.00	\$ 212,000.00	\$ 212,000.00	\$ 212,000.00	\$ 212,000.00	\$ 212,000.00	\$ 212,000.00	\$ 212,000.00
Costos No Visibles								
Cuotas Legales	\$ 250,000.00	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Sistemas de Informacion	\$ 100,000.00	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Seguros	\$ 500,000.00	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00
Total	\$ 850,000.00	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00
Ingreso Operacional	\$ (6,282,000.00)	\$ (4,600,173.11)	\$ (2,728,492.12)	\$ (684,105.12)	\$ 1,517,064.62	\$ 2,650,603.30	\$ 2,795,137.40	\$ 2,933,547.17
Depreciacion de Equipo	\$ 300,000.00	\$ 300,000.00	\$ 300,000.00	\$ 300,000.00	\$ 300,000.00	\$ 300,000.00	\$ 300,000.00	\$ 300,000.00
Ingreso Tributable	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 1,217,064.62	\$ 2,350,603.30	\$ 2,495,137.40	\$ 2,633,547.17
Contribuciones	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 304,266.16	\$ 587,650.83	\$ 623,784.35	\$ 658,386.79
Ingreso Neto Despues Contribuciones	\$ (6,582,000.00)	\$ (4,900,173.11)	\$ (3,028,492.12)	\$ (984,105.12)	\$ 912,798.47	\$ 1,762,952.48	\$ 1,871,353.05	\$ 1,975,160.38
Flujo de Cash Anual	\$ (6,582,000.00)	\$ (4,900,173.11)	\$ (3,028,492.12)	\$ (984,105.12)	\$ 912,798.47	\$ 1,762,952.48	\$ 1,871,353.05	\$ 1,975,160.38

Tabla 4

Volumen diario y anual de ventas estimadas

Año	LNG prom. (galones/día)	TOTAL (dólar/día)	TOTAL (dólar/año)	Año	LNG prom. (galones/día)	TOTAL (dólar/día)	TOTAL (dólar/año)	Año	LNG prom. (galones/día)	TOTAL (dólar/día)	TOTAL (dólar/año)
1965	0	0	0	2012	20886.79	\$ 8,668	\$ 3,163,827	2059	15137.47	\$ 6,282	\$ 2,292,948
1966	258.76	\$ 107	\$ 39,196	2013	22140.16	\$ 9,188	\$ 3,353,681	2060	14539.08	\$ 6,034	\$ 2,202,308
1967	507.49	\$ 211	\$ 76,873	2014	23280.32	\$ 9,661	\$ 3,526,387	2061	13973.05	\$ 5,799	\$ 2,116,567
1968	746.04	\$ 310	\$ 113,006	2015	24315.36	\$ 10,091	\$ 3,683,170	2062	13423.18	\$ 5,571	\$ 2,033,276
1969	976.01	\$ 405	\$ 147,841	2016	25301.89	\$ 10,500	\$ 3,832,603	2063	12897.57	\$ 5,352	\$ 1,953,660
1970	1195.96	\$ 496	\$ 181,158	2017	26256.06	\$ 10,896	\$ 3,977,137	2064	12388.14	\$ 5,141	\$ 1,876,494
1971	1407.82	\$ 584	\$ 213,249	2018	27169.81	\$ 11,275	\$ 4,115,547	2065	11902.96	\$ 4,940	\$ 1,803,002
1972	1611.59	\$ 669	\$ 244,116	2019	27986.52	\$ 11,614	\$ 4,239,259	2066	11433.96	\$ 4,745	\$ 1,731,959
1973	1807.28	\$ 750	\$ 273,757	2020	28722.37	\$ 11,920	\$ 4,350,721	2067	10989.22	\$ 4,561	\$ 1,664,592
1974	1994.88	\$ 828	\$ 302,174	2021	29433.96	\$ 12,215	\$ 4,458,509	2068	10560.65	\$ 4,383	\$ 1,599,674
1975	2175.20	\$ 903	\$ 329,489	2022	30113.21	\$ 12,497	\$ 4,561,398	2069	10148.25	\$ 4,212	\$ 1,537,206
1976	2349.06	\$ 975	\$ 355,823	2023	30768.19	\$ 12,769	\$ 4,660,612	2070	9743.94	\$ 4,044	\$ 1,475,963
1977	2515.63	\$ 1,044	\$ 381,056	2024	31342.32	\$ 13,007	\$ 4,747,578	2071	9363.88	\$ 3,886	\$ 1,418,394
1978	2675.74	\$ 1,110	\$ 405,308	2025	31835.58	\$ 13,212	\$ 4,822,294	2072	9000.00	\$ 3,735	\$ 1,363,275
1979	2829.38	\$ 1,174	\$ 428,580	2026	32312.67	\$ 13,410	\$ 4,894,561	2073	8644.20	\$ 3,587	\$ 1,309,381
1980	2977.36	\$ 1,236	\$ 450,995	2027	32773.58	\$ 13,601	\$ 4,964,379	2074	8304.58	\$ 3,446	\$ 1,257,937
1981	3119.68	\$ 1,295	\$ 472,553	2028	33218.33	\$ 13,786	\$ 5,031,746	2075	7980.32	\$ 3,312	\$ 1,208,819
1982	3254.72	\$ 1,351	\$ 493,008	2029	33638.81	\$ 13,960	\$ 5,095,439	2076	7667.39	\$ 3,182	\$ 1,161,417
1983	3388.14	\$ 1,406	\$ 513,219	2030	34051.21	\$ 14,131	\$ 5,157,907	2077	7366.58	\$ 3,057	\$ 1,115,852
1984	3512.67	\$ 1,458	\$ 532,081	2031	34439.35	\$ 14,292	\$ 5,216,701	2078	7077.90	\$ 2,937	\$ 1,072,125
1985	3635.58	\$ 1,509	\$ 550,699	2032	34819.41	\$ 14,450	\$ 5,274,270	2079	6799.73	\$ 2,822	\$ 1,029,989
1986	3749.60	\$ 1,556	\$ 567,970	2033	35175.20	\$ 14,598	\$ 5,328,164	2080	6533.69	\$ 2,711	\$ 989,691
1987	3863.61	\$ 1,603	\$ 585,241	2034	35522.91	\$ 14,742	\$ 5,380,833	2081	6277.36	\$ 2,605	\$ 950,863
1988	3968.73	\$ 1,647	\$ 601,164	2035	35854.45	\$ 14,880	\$ 5,431,052	2082	6031.54	\$ 2,503	\$ 913,627
1989	4073.85	\$ 1,691	\$ 617,087	2036	36177.90	\$ 15,014	\$ 5,480,047	2083	5794.61	\$ 2,405	\$ 877,738
1990	4170.89	\$ 1,731	\$ 631,785	2037	36485.18	\$ 15,141	\$ 5,526,592	2084	5567.39	\$ 2,310	\$ 843,320
1991	4263.88	\$ 1,770	\$ 645,871	2038	35053.91	\$ 14,547	\$ 5,309,791	2085	5349.06	\$ 2,220	\$ 810,248
1992	4357.68	\$ 1,808	\$ 660,080	2039	33679.25	\$ 13,977	\$ 5,101,564	2086	5139.62	\$ 2,133	\$ 778,524
1993	4444.20	\$ 1,844	\$ 673,186	2040	32361.19	\$ 13,430	\$ 4,901,911	2087	4938.27	\$ 2,049	\$ 748,025
1994	4530.73	\$ 1,880	\$ 686,292	2041	31091.64	\$ 12,903	\$ 4,709,607	2088	4744.20	\$ 1,969	\$ 718,628
1995	4609.97	\$ 1,913	\$ 698,296	2042	29870.62	\$ 12,396	\$ 4,524,652	2089	4558.22	\$ 1,892	\$ 690,457
1996	4690.03	\$ 1,946	\$ 710,422	2043	28698.11	\$ 11,910	\$ 4,347,047	2090	4379.51	\$ 1,817	\$ 663,387
1997	4762.80	\$ 1,977	\$ 721,446	2044	27574.12	\$ 11,443	\$ 4,176,790	2091	4208.09	\$ 1,746	\$ 637,420
1998	4837.20	\$ 2,007	\$ 732,714	2045	26490.57	\$ 10,994	\$ 4,012,658	2092	4043.13	\$ 1,678	\$ 612,433
1999	4904.31	\$ 2,035	\$ 742,881	2046	25455.53	\$ 10,564	\$ 3,855,876	2093	3884.64	\$ 1,612	\$ 588,425
2000	4972.24	\$ 2,063	\$ 753,170	2047	24460.92	\$ 10,151	\$ 3,705,217	2094	3731.81	\$ 1,549	\$ 565,275
2001	5034.50	\$ 2,089	\$ 762,601	2048	23498.65	\$ 9,752	\$ 3,559,458	2095	3585.44	\$ 1,488	\$ 543,105
2002	6240.97	\$ 2,590	\$ 945,351	2049	22576.82	\$ 9,369	\$ 3,419,824	2096	3444.74	\$ 1,430	\$ 521,793
2003	7503.23	\$ 3,114	\$ 1,136,552	2050	21695.42	\$ 9,004	\$ 3,286,313	2097	3309.70	\$ 1,374	\$ 501,337
2004	8789.76	\$ 3,648	\$ 1,331,429	2051	20838.27	\$ 8,648	\$ 3,156,478	2098	3180.32	\$ 1,320	\$ 481,739
2005	10690.03	\$ 4,436	\$ 1,619,272	2052	20021.56	\$ 8,309	\$ 3,032,766	2099	3055.80	\$ 1,268	\$ 462,877
2006	11919.14	\$ 4,946	\$ 1,805,451	2053	19237.20	\$ 7,983	\$ 2,913,954	2100	2935.31	\$ 1,218	\$ 444,626
2007	13617.25	\$ 5,651	\$ 2,062,673	2054	18485.18	\$ 7,671	\$ 2,800,042	2101	2820.49	\$ 1,171	\$ 427,233
2008	15242.59	\$ 6,326	\$ 2,308,871	2055	17757.41	\$ 7,369	\$ 2,689,804	2102	2709.70	\$ 1,125	\$ 410,452
2009	16795.15	\$ 6,970	\$ 2,544,045	2056	17061.99	\$ 7,081	\$ 2,584,466	2103	2603.77	\$ 1,081	\$ 394,407
2010	18210.24	\$ 7,557	\$ 2,758,396	2057	16390.84	\$ 6,802	\$ 2,482,802	2104	2501.89	\$ 1,038	\$ 378,973
2011	19576.82	\$ 8,124	\$ 2,965,399	2058	15752.02	\$ 6,537	\$ 2,386,037	2105	2403.23	\$ 997	\$ 364,030

FIGURAS

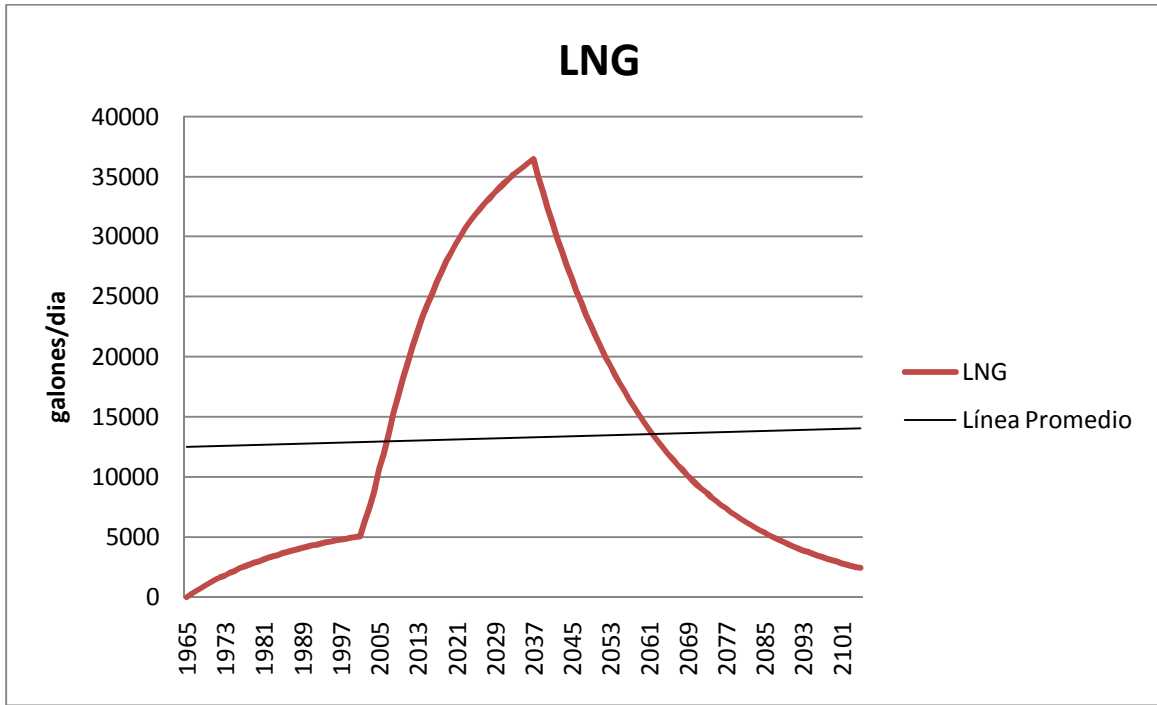


Figura 1. Pico de generación en la producción estimada de LNG en galones por día.



Figura 2. Foto aérea del Sistema de Relleno Sanitario Ponce.



Figura 3. Foto aérea que demuestra distancia lineal entre SRS Ponce y EcoEléctrica (6.8 millas).

APENDICES

Apéndice 1. Modelo LandGEM para el Sistema de Relleno Sanitario Ponce

Ponce landgem-v302 for Revised GCCS Design 2007

9/3/2009



Summary Report

Landfill Name or Identifier: Ponce Landfill

Date: Thursday, September 03, 2009

Description/Comments:

Tonnages used were taken from SCS's 2007 Tier II report from 1965 until 2006. Tonnages from 2007 until 2036 were provided by Golder.

About LandGEM:

First-Order Decomposition Rate Equation:
$$Q_{CH_4,t} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 kL_i \left(\frac{M_i}{10} \right) e^{-k_i t_i}$$

Where,

$Q_{CH_4,t}$ = annual methane generation in the year of the calculation ($m^3/year$)

t = 1-year time increment

n = (year of the calculation) - (initial year of waste acceptance)

j = 0.1-year time increment

k = methane generation rate ($year^{-1}$)

L_i = potential methane generation capacity (m^3/Mg)

M_i = mass of waste accepted in the i^{th} year (Mg)

t_i = age of the j^{th} section of waste mass M_i accepted in the i^{th} year (decimal years, e.g., 3.2 years)

LandGEM is based on a first-order decomposition rate equation for quantifying emissions from the decomposition of landfilled waste in municipal solid waste (MSW) landfills. The software provides a relatively simple approach to estimating landfill gas emissions. Model defaults are based on empirical data from U.S. landfills. Field test data can also be used in place of model defaults when available. Further guidance on EPA test methods, Clean Air Act (CAA) regulations, and other guidance regarding landfill gas emissions and control technology requirements can be found at <http://www.epa.gov/ttnatw01/landfill/landflpg.html>.

LandGEM is considered a screening tool — the better the input data, the better the estimates. Often, there are limitations with the available data regarding waste quantity and composition, variation in design and operating practices over time, and changes occurring over time that impact the emissions potential. Changes to landfill operation, such as operating under wet conditions through leachate recirculation or other liquid additions, will result in generating more gas at a faster rate. Defaults for estimating emissions for this type of operation are being developed to include in LandGEM along with defaults for conventional landfills (no leachate or liquid additions) for developing emission inventories and determining CAA applicability. Refer to the Web site identified above for future updates.

REPORT - 1

Input Review

LANDFILL CHARACTERISTICS

Landfill Open Year **1965**
 Landfill Closure Year (with 80-year limit) **2036**
 Actual Closure Year (without limit) **2036**
 Have Model Calculate Closure Year? **No**
 Waste Design Capacity **short tons**

MODEL PARAMETERS

Methane Generation Rate, k **0.040** *year⁻¹*
 Potential Methane Generation Capacity, L_0 **100** *m³/Mg*
 NMOC Concentration **336** *ppmv as hexane*
 Methane Content **50** *% by volume*

GASES / POLLUTANTS SELECTED

Gas / Pollutant #1: **Total landfill gas**
 Gas / Pollutant #2: **Methane**
 Gas / Pollutant #3: **Carbon dioxide**
 Gas / Pollutant #4: **NMOC**

WASTE ACCEPTANCE RATES

Year	Waste Accepted		Waste-in-Place	
	(Mg/year)	(short tons/year)	(Mg)	(short tons)
1965	60,607	66,668	0	0
1966	60,647	66,712	60,607	66,668
1967	60,527	66,580	121,255	133,380
1968	60,627	66,690	181,782	199,960
1969	60,627	66,690	242,409	266,650
1970	60,627	66,690	303,036	333,340
1971	60,627	66,690	363,664	400,030
1972	60,527	66,580	424,291	466,720
1973	60,627	66,690	484,818	533,300
1974	60,627	66,690	545,445	599,990
1975	60,627	66,690	606,073	666,680
1976	60,627	66,690	666,700	733,370
1977	60,527	66,580	727,327	800,060
1978	60,627	66,690	787,855	866,640
1979	60,627	66,690	848,482	933,330
1980	60,627	66,690	909,109	1,000,020
1981	60,426	66,469	969,736	1,066,710
1982	61,128	67,241	1,030,163	1,133,179
1983	60,126	66,139	1,091,291	1,200,420
1984	61,128	67,241	1,151,417	1,266,559
1985	60,126	66,139	1,212,545	1,333,800
1986	61,128	67,241	1,272,672	1,399,939
1987	60,126	66,139	1,333,800	1,467,180
1988	61,128	67,241	1,393,926	1,533,319
1989	60,126	66,139	1,455,055	1,600,560
1990	60,126	66,139	1,515,181	1,666,699
1991	61,128	67,241	1,575,307	1,732,838
1992	60,126	66,139	1,636,435	1,800,079
1993	61,128	67,241	1,696,562	1,866,218
1994	60,126	66,139	1,757,690	1,933,459
1995	61,128	67,241	1,817,816	1,999,598
1996	60,126	66,139	1,878,945	2,066,839
1997	61,128	67,241	1,939,071	2,132,978
1998	60,126	66,139	2,000,199	2,200,219
1999	61,128	67,241	2,060,325	2,266,358
2000	60,126	66,139	2,121,454	2,333,599
2001	328,922	361,814	2,181,580	2,399,738
2002	352,874	388,161	2,510,502	2,761,552
2003	371,265	408,392	2,863,375	3,149,713
2004	525,515	578,066	3,234,641	3,558,105

WASTE ACCEPTANCE RATES (Continued)

Year	Waste Accepted		Waste-In-Place	
	(Mg/year)	(short tons/year)	(Mg)	(short tons)
2005	385,015	423,517	3,760,155	4,136,171
2006	508,101	558,911	4,145,171	4,559,688
2007	505,200	555,720	4,653,272	5,118,599
2008	503,250	553,575	5,158,472	5,674,319
2009	486,480	535,128	5,661,722	6,227,894
2010	486,480	535,128	6,148,202	6,763,022
2011	486,480	535,128	6,634,682	7,298,150
2012	486,480	535,128	7,121,162	7,833,278
2013	470,760	517,836	7,607,642	8,368,406
2014	455,040	500,544	8,078,402	8,886,242
2015	455,040	500,544	8,533,442	9,386,786
2016	455,040	500,544	8,988,482	9,887,330
2017	455,040	500,544	9,443,522	10,387,874
2018	442,320	486,552	9,898,562	10,888,418
2019	429,600	472,560	10,340,882	11,374,970
2020	429,600	472,560	10,770,482	11,847,530
2021	429,600	472,560	11,200,082	12,320,090
2022	429,600	472,560	11,629,682	12,792,650
2023	417,000	458,700	12,059,282	13,265,210
2024	404,400	444,840	12,476,282	13,723,910
2025	404,400	444,840	12,880,682	14,168,750
2026	404,400	444,840	13,285,082	14,613,590
2027	404,400	444,840	13,689,482	15,058,430
2028	404,400	444,840	14,093,882	15,503,270
2029	404,400	444,840	14,498,282	15,948,110
2030	404,400	444,840	14,902,682	16,392,950
2031	404,400	444,840	15,307,082	16,837,790
2032	404,400	444,840	15,711,482	17,282,630
2033	404,400	444,840	16,115,882	17,727,470
2034	404,400	444,840	16,520,282	18,172,310
2035	404,400	444,840	16,924,682	18,617,150
2036	404,400	444,840	17,329,082	19,061,990
2037	0	0	17,733,482	19,506,830
2038	0	0	17,733,482	19,506,830
2039	0	0	17,733,482	19,506,830
2040	0	0	17,733,482	19,506,830
2041	0	0	17,733,482	19,506,830
2042	0	0	17,733,482	19,506,830
2043	0	0	17,733,482	19,506,830
2044	0	0	17,733,482	19,506,830

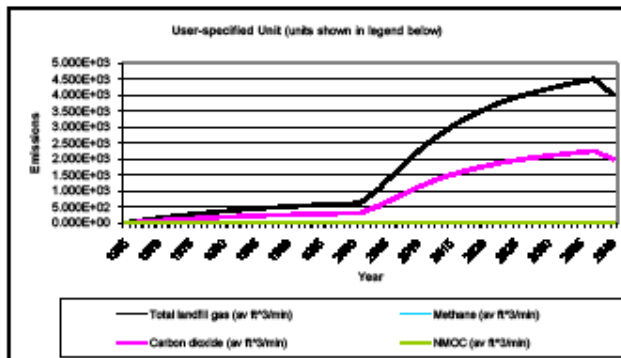
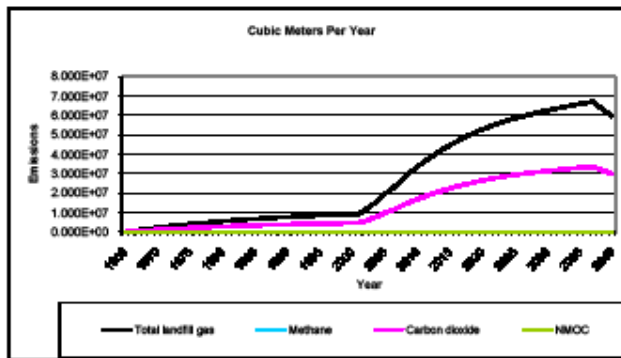
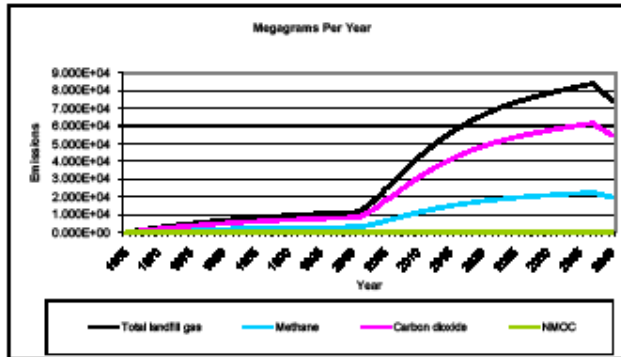
Pollutant Parameters

		Gas / Pollutant Default Parameters:		User-specified Pollutant Parameters:	
		Concentration (ppmv)	Molecular Weight	Concentration (ppmv)	Molecular Weight
Gases	Total landfill gas		0.00		
	Methane		16.04		
	Carbon dioxide		44.01		
	NMOC	4,000	86.18		
Pollutants	1,1,1-Trichloroethane (methyl chloroform) - HAP	0.48	133.41		
	1,1,2,2-Tetrachloroethane - HAP/VOC	1.1	167.85		
	1,1-Dichloroethane (ethylene dichloride) - HAP/VOC	2.4	98.97		
	1,1-Dichloroethene (vinylidene chloride) - HAP/VOC	0.20	96.94		
	1,2-Dichloroethane (ethylene dichloride) - HAP/VOC	0.41	98.96		
	1,2-Dichloropropane (propylene dichloride) - HAP/VOC	0.18	112.99		
	2-Propanol (Isopropyl alcohol) - VOC	50	60.11		
	Acetone	7.0	58.08		
	Acrylonitrile - HAP/VOC	6.3	53.06		
	Benzene - No or Unknown Co-disposal - HAP/VOC	1.9	78.11		
	Benzene - Co-disposal - HAP/VOC	11	78.11		
	Bromodichloromethane - VOC	3.1	163.83		
	Butane - VOC	5.0	58.12		
	Carbon disulfide - HAP/VOC	0.58	76.13		
	Carbon monoxide	140	28.01		
	Carbon tetrachloride - HAP/VOC	4.0E-03	153.84		
	Carbonyl sulfide - HAP/VOC	0.49	60.07		
	Chlorobenzene - HAP/VOC	0.25	112.56		
	Chlorodifluoromethane	1.3	86.47		
	Chloroethane (ethyl chloride) - HAP/VOC	1.3	64.52		
	Chloroform - HAP/VOC	0.03	119.39		
	Chloromethane - VOC	1.2	50.49		
	Dichlorobenzene - (HAP for para isomer/VOC)	0.21	147		
	Dichlorodifluoromethane	16	120.91		
	Dichlorodifluoromethane - VOC	2.6	102.92		
	Dichloromethane (methylene chloride) - HAP	14	84.94		
	Dimethyl sulfide (methyl sulfide) - VOC	7.8	62.13		
	Ethane	890	30.07		
	Ethanol - VOC	27	46.08		

Pollutant Parameters (Continued)

Gas / Pollutant Default Parameters:				User-specified Pollutant Parameters:	
	Compound	Concentration (ppmv)	Molecular Weight	Concentration (ppmv)	Molecular Weight
Pollutants	Ethyl mercaptan (ethanethiol) - VOC	2.3	62.13		
	Ethylbenzene - HAP/VOC	4.6	106.16		
	Ethylene dibromide - HAP/VOC	1.0E-03	187.88		
	Fluorotrichloromethane - VOC	0.76	137.38		
	Hexane - HAP/VOC	6.6	86.18		
	Hydrogen sulfide	36	34.08		
	Mercury (total) - HAP	2.9E-04	200.61		
	Methyl ethyl ketone - HAP/VOC	7.1	72.11		
	Methyl isobutyl ketone - HAP/VOC	1.9	100.16		
	Methyl mercaptan - VOC	2.5	48.11		
	Pentane - VOC	3.3	72.15		
	Perchloroethylene (tetrachloroethylene) - HAP	3.7	165.83		
	Propane - VOC	11	44.09		
	t-1,2-Dichloroethene - VOC	2.8	96.94		
	Toluene - No or Unknown Co-disposal - HAP/VOC	39	92.13		
	Toluene - Co-disposal - HAP/VOC	170	92.13		
	Trichloroethylene (trichloroethene) - HAP/VOC	2.8	131.40		
	Vinyl chloride - HAP/VOC	7.3	62.50		
	Xylenes - HAP/VOC	12	106.16		

Graphs



Results

Year	Total landfill gas			Methane		
	(Mg/year)	(m ³ /year)	(av ft ³ /min)	(Mg/year)	(m ³ /year)	(av ft ³ /min)
1965	0	0	0	0	0	0
1966	5.947E+02	4.762E+05	3.200E+01	1.589E+02	2.381E+05	1.600E+01
1967	1.167E+03	9.341E+05	6.276E+01	3.116E+02	4.671E+05	3.138E+01
1968	1.715E+03	1.373E+06	9.226E+01	4.580E+02	6.866E+05	4.613E+01
1969	2.242E+03	1.796E+06	1.207E+02	5.990E+02	8.978E+05	6.033E+01
1970	2.749E+03	2.202E+06	1.479E+02	7.344E+02	1.101E+06	7.396E+01
1971	3.237E+03	2.592E+06	1.741E+02	8.645E+02	1.296E+06	8.707E+01
1972	3.705E+03	2.966E+06	1.993E+02	9.895E+02	1.483E+06	9.966E+01
1973	4.153E+03	3.326E+06	2.235E+02	1.109E+03	1.663E+06	1.117E+02
1974	4.585E+03	3.672E+06	2.467E+02	1.225E+03	1.836E+06	1.234E+02
1975	5.001E+03	4.004E+06	2.690E+02	1.336E+03	2.002E+06	1.345E+02
1976	5.399E+03	4.324E+06	2.905E+02	1.442E+03	2.162E+06	1.453E+02
1977	5.783E+03	4.630E+06	3.111E+02	1.545E+03	2.315E+06	1.556E+02
1978	6.150E+03	4.925E+06	3.309E+02	1.643E+03	2.462E+06	1.654E+02
1979	6.504E+03	5.208E+06	3.499E+02	1.737E+03	2.604E+06	1.750E+02
1980	6.844E+03	5.480E+06	3.682E+02	1.828E+03	2.740E+06	1.841E+02
1981	7.170E+03	5.742E+06	3.858E+02	1.915E+03	2.871E+06	1.929E+02
1982	7.482E+03	5.991E+06	4.025E+02	1.999E+03	2.996E+06	2.013E+02
1983	7.788E+03	6.237E+06	4.190E+02	2.080E+03	3.118E+06	2.095E+02
1984	8.073E+03	6.465E+06	4.344E+02	2.156E+03	3.232E+06	2.172E+02
1985	8.356E+03	6.691E+06	4.496E+02	2.232E+03	3.346E+06	2.248E+02
1986	8.619E+03	6.901E+06	4.637E+02	2.302E+03	3.451E+06	2.319E+02
1987	8.881E+03	7.111E+06	4.778E+02	2.372E+03	3.556E+06	2.389E+02
1988	9.122E+03	7.305E+06	4.908E+02	2.437E+03	3.652E+06	2.454E+02
1989	9.365E+03	7.499E+06	5.038E+02	2.501E+03	3.749E+06	2.519E+02
1990	9.587E+03	7.677E+06	5.158E+02	2.561E+03	3.839E+06	2.579E+02
1991	9.802E+03	7.849E+06	5.273E+02	2.618E+03	3.924E+06	2.637E+02
1992	1.002E+04	8.021E+06	5.389E+02	2.676E+03	4.011E+06	2.695E+02
1993	1.021E+04	8.179E+06	5.496E+02	2.728E+03	4.090E+06	2.748E+02
1994	1.041E+04	8.339E+06	5.603E+02	2.782E+03	4.169E+06	2.801E+02
1995	1.060E+04	8.484E+06	5.701E+02	2.830E+03	4.242E+06	2.850E+02
1996	1.078E+04	8.632E+06	5.800E+02	2.879E+03	4.316E+06	2.900E+02
1997	1.095E+04	8.766E+06	5.890E+02	2.924E+03	4.383E+06	2.945E+02
1998	1.112E+04	8.903E+06	5.982E+02	2.970E+03	4.451E+06	2.991E+02
1999	1.127E+04	9.026E+06	6.065E+02	3.011E+03	4.513E+06	3.032E+02
2000	1.143E+04	9.152E+06	6.149E+02	3.053E+03	4.576E+06	3.075E+02
2001	1.157E+04	9.266E+06	6.226E+02	3.091E+03	4.633E+06	3.113E+02
2002	1.435E+04	1.149E+07	7.718E+02	3.832E+03	5.744E+06	3.859E+02
2003	1.725E+04	1.361E+07	9.279E+02	4.607E+03	6.905E+06	4.639E+02
2004	2.021E+04	1.619E+07	1.087E+03	5.399E+03	8.093E+06	5.437E+02
2005	2.458E+04	1.968E+07	1.322E+03	6.565E+03	9.840E+06	6.612E+02
2006	2.739E+04	2.193E+07	1.474E+03	7.317E+03	1.097E+07	7.369E+02
2007	3.130E+04	2.507E+07	1.684E+03	8.362E+03	1.253E+07	8.421E+02
2008	3.503E+04	2.805E+07	1.885E+03	9.358E+03	1.403E+07	9.425E+02
2009	3.860E+04	3.091E+07	2.077E+03	1.031E+04	1.545E+07	1.038E+03
2010	4.186E+04	3.352E+07	2.252E+03	1.118E+04	1.676E+07	1.126E+03
2011	4.499E+04	3.603E+07	2.421E+03	1.202E+04	1.801E+07	1.210E+03
2012	4.800E+04	3.844E+07	2.583E+03	1.282E+04	1.922E+07	1.291E+03
2013	5.089E+04	4.075E+07	2.738E+03	1.359E+04	2.038E+07	1.369E+03
2014	5.352E+04	4.265E+07	2.879E+03	1.429E+04	2.143E+07	1.440E+03

Results (Continued)

Year	Total landfill gas			Methane		
	(Mg/year)	(m ³ /year)	(av ft ³ /min)	(Mg/year)	(m ³ /year)	(av ft ³ /min)
2015	5.588E+04	4.475E+07	3.007E+03	1.493E+04	2.237E+07	1.503E+03
2016	5.816E+04	4.657E+07	3.129E+03	1.553E+04	2.328E+07	1.565E+03
2017	6.034E+04	4.832E+07	3.247E+03	1.612E+04	2.416E+07	1.623E+03
2018	6.244E+04	5.000E+07	3.360E+03	1.668E+04	2.500E+07	1.680E+03
2019	6.433E+04	5.152E+07	3.461E+03	1.718E+04	2.576E+07	1.731E+03
2020	6.603E+04	5.287E+07	3.552E+03	1.764E+04	2.644E+07	1.776E+03
2021	6.765E+04	5.417E+07	3.640E+03	1.807E+04	2.709E+07	1.820E+03
2022	6.922E+04	5.543E+07	3.724E+03	1.849E+04	2.771E+07	1.862E+03
2023	7.072E+04	5.663E+07	3.805E+03	1.889E+04	2.831E+07	1.902E+03
2024	7.204E+04	5.768E+07	3.876E+03	1.924E+04	2.884E+07	1.936E+03
2025	7.318E+04	5.860E+07	3.937E+03	1.955E+04	2.930E+07	1.969E+03
2026	7.428E+04	5.948E+07	3.996E+03	1.984E+04	2.974E+07	1.998E+03
2027	7.534E+04	6.033E+07	4.053E+03	2.012E+04	3.016E+07	2.027E+03
2028	7.635E+04	6.114E+07	4.108E+03	2.039E+04	3.057E+07	2.054E+03
2029	7.733E+04	6.192E+07	4.160E+03	2.065E+04	3.096E+07	2.080E+03
2030	7.826E+04	6.267E+07	4.211E+03	2.090E+04	3.133E+07	2.105E+03
2031	7.916E+04	6.339E+07	4.259E+03	2.114E+04	3.169E+07	2.130E+03
2032	8.003E+04	6.408E+07	4.306E+03	2.138E+04	3.204E+07	2.153E+03
2033	8.086E+04	6.475E+07	4.350E+03	2.160E+04	3.237E+07	2.175E+03
2034	8.165E+04	6.538E+07	4.393E+03	2.181E+04	3.269E+07	2.197E+03
2035	8.242E+04	6.600E+07	4.434E+03	2.202E+04	3.300E+07	2.217E+03
2036	8.316E+04	6.659E+07	4.474E+03	2.221E+04	3.329E+07	2.237E+03
2037	8.387E+04	6.716E+07	4.512E+03	2.240E+04	3.358E+07	2.256E+03
2038	8.058E+04	6.452E+07	4.335E+03	2.152E+04	3.226E+07	2.168E+03
2039	7.742E+04	6.199E+07	4.165E+03	2.068E+04	3.100E+07	2.083E+03
2040	7.438E+04	5.956E+07	4.002E+03	1.987E+04	2.978E+07	2.001E+03
2041	7.147E+04	5.723E+07	3.845E+03	1.909E+04	2.861E+07	1.923E+03
2042	6.866E+04	5.498E+07	3.694E+03	1.834E+04	2.749E+07	1.847E+03
2043	6.597E+04	5.283E+07	3.549E+03	1.762E+04	2.641E+07	1.775E+03
2044	6.338E+04	5.075E+07	3.410E+03	1.693E+04	2.538E+07	1.705E+03
2045	6.090E+04	4.876E+07	3.276E+03	1.627E+04	2.438E+07	1.638E+03
2046	5.851E+04	4.685E+07	3.148E+03	1.563E+04	2.343E+07	1.574E+03
2047	5.622E+04	4.502E+07	3.025E+03	1.502E+04	2.251E+07	1.512E+03
2048	5.401E+04	4.325E+07	2.906E+03	1.443E+04	2.163E+07	1.453E+03
2049	5.189E+04	4.155E+07	2.792E+03	1.386E+04	2.078E+07	1.396E+03
2050	4.986E+04	3.993E+07	2.683E+03	1.332E+04	1.996E+07	1.341E+03
2051	4.790E+04	3.836E+07	2.577E+03	1.280E+04	1.918E+07	1.289E+03
2052	4.603E+04	3.686E+07	2.476E+03	1.229E+04	1.843E+07	1.238E+03
2053	4.422E+04	3.541E+07	2.379E+03	1.181E+04	1.771E+07	1.190E+03
2054	4.249E+04	3.402E+07	2.286E+03	1.135E+04	1.701E+07	1.143E+03
2055	4.082E+04	3.269E+07	2.196E+03	1.090E+04	1.634E+07	1.096E+03
2056	3.922E+04	3.141E+07	2.110E+03	1.048E+04	1.570E+07	1.055E+03
2057	3.768E+04	3.017E+07	2.027E+03	1.007E+04	1.509E+07	1.014E+03
2058	3.621E+04	2.899E+07	1.948E+03	9.671E+03	1.450E+07	9.740E+02
2059	3.479E+04	2.785E+07	1.872E+03	9.292E+03	1.393E+07	9.358E+02
2060	3.342E+04	2.676E+07	1.798E+03	8.927E+03	1.338E+07	8.991E+02
2061	3.211E+04	2.571E+07	1.728E+03	8.577E+03	1.286E+07	8.638E+02
2062	3.085E+04	2.471E+07	1.660E+03	8.241E+03	1.235E+07	8.300E+02
2063	2.964E+04	2.374E+07	1.595E+03	7.918E+03	1.187E+07	7.974E+02
2064	2.848E+04	2.281E+07	1.532E+03	7.607E+03	1.140E+07	7.662E+02
2065	2.736E+04	2.191E+07	1.472E+03	7.309E+03	1.096E+07	7.361E+02

Results (Continued)

Year	Total landfill gas			Methane		
	(Mg/year)	(m ³ /year)	(av ft ³ /min)	(Mg/year)	(m ³ /year)	(av ft ³ /min)
2066	2.629E+04	2.105E+07	1.414E+03	7.022E+03	1.053E+07	7.072E+02
2067	2.526E+04	2.023E+07	1.359E+03	6.747E+03	1.011E+07	6.795E+02
2068	2.427E+04	1.943E+07	1.306E+03	6.483E+03	9.717E+06	6.529E+02
2069	2.332E+04	1.867E+07	1.255E+03	6.228E+03	9.336E+06	6.273E+02
2070	2.240E+04	1.794E+07	1.205E+03	5.984E+03	8.970E+06	6.027E+02
2071	2.152E+04	1.724E+07	1.158E+03	5.750E+03	8.618E+06	5.790E+02
2072	2.068E+04	1.656E+07	1.113E+03	5.524E+03	8.280E+06	5.563E+02
2073	1.987E+04	1.591E+07	1.069E+03	5.307E+03	7.955E+06	5.345E+02
2074	1.909E+04	1.529E+07	1.027E+03	5.099E+03	7.644E+06	5.136E+02
2075	1.834E+04	1.469E+07	9.869E+02	4.899E+03	7.344E+06	4.934E+02
2076	1.762E+04	1.411E+07	9.482E+02	4.707E+03	7.056E+06	4.741E+02
2077	1.693E+04	1.356E+07	9.110E+02	4.523E+03	6.779E+06	4.556E+02
2078	1.627E+04	1.303E+07	8.753E+02	4.345E+03	6.513E+06	4.376E+02
2079	1.563E+04	1.252E+07	8.409E+02	4.175E+03	6.258E+06	4.205E+02
2080	1.502E+04	1.203E+07	8.080E+02	4.011E+03	6.013E+06	4.040E+02
2081	1.443E+04	1.155E+07	7.763E+02	3.854E+03	5.777E+06	3.881E+02
2082	1.386E+04	1.110E+07	7.459E+02	3.703E+03	5.550E+06	3.729E+02
2083	1.332E+04	1.067E+07	7.166E+02	3.558E+03	5.333E+06	3.583E+02
2084	1.280E+04	1.025E+07	6.885E+02	3.418E+03	5.124E+06	3.443E+02
2085	1.230E+04	9.845E+06	6.615E+02	3.284E+03	4.923E+06	3.308E+02
2086	1.181E+04	9.459E+06	6.356E+02	3.155E+03	4.730E+06	3.178E+02
2087	1.135E+04	9.088E+06	6.107E+02	3.032E+03	4.544E+06	3.053E+02
2088	1.090E+04	8.732E+06	5.867E+02	2.913E+03	4.366E+06	2.934E+02
2089	1.048E+04	8.390E+06	5.637E+02	2.799E+03	4.195E+06	2.819E+02
2090	1.007E+04	8.061E+06	5.416E+02	2.689E+03	4.030E+06	2.708E+02
2091	9.672E+03	7.745E+06	5.204E+02	2.583E+03	3.872E+06	2.602E+02
2092	9.293E+03	7.441E+06	5.000E+02	2.482E+03	3.721E+06	2.500E+02
2093	8.928E+03	7.149E+06	4.804E+02	2.385E+03	3.575E+06	2.402E+02
2094	8.578E+03	6.869E+06	4.615E+02	2.291E+03	3.434E+06	2.308E+02
2095	8.242E+03	6.600E+06	4.434E+02	2.201E+03	3.300E+06	2.217E+02
2096	7.919E+03	6.341E+06	4.260E+02	2.115E+03	3.170E+06	2.130E+02
2097	7.608E+03	6.092E+06	4.093E+02	2.032E+03	3.046E+06	2.047E+02
2098	7.310E+03	5.853E+06	3.933E+02	1.953E+03	2.927E+06	1.966E+02
2099	7.023E+03	5.624E+06	3.779E+02	1.876E+03	2.812E+06	1.889E+02
2100	6.748E+03	5.403E+06	3.630E+02	1.802E+03	2.702E+06	1.815E+02
2101	6.483E+03	5.191E+06	3.488E+02	1.732E+03	2.596E+06	1.744E+02
2102	6.229E+03	4.988E+06	3.351E+02	1.664E+03	2.494E+06	1.676E+02
2103	5.985E+03	4.792E+06	3.220E+02	1.599E+03	2.396E+06	1.610E+02
2104	5.750E+03	4.604E+06	3.094E+02	1.536E+03	2.302E+06	1.547E+02
2105	5.525E+03	4.424E+06	2.972E+02	1.476E+03	2.212E+06	1.486E+02

Results (Continued)

Year	Carbon dioxide			NMOC		
	(Mg/year)	(m ³ /year)	(av ft ³ /min)	(Mg/year)	(m ³ /year)	(av ft ³ /min)
1965	0	0	0	0	0	0
1966	4.359E+02	2.381E+05	1.600E+01	5.727E-01	1.598E+02	1.074E-02
1967	8.550E+02	4.671E+05	3.138E+01	1.123E+00	3.134E+02	2.106E-02
1968	1.257E+03	6.866E+05	4.613E+01	1.651E+00	4.607E+02	3.095E-02
1969	1.643E+03	8.978E+05	6.033E+01	2.159E+00	6.024E+02	4.048E-02
1970	2.015E+03	1.101E+06	7.396E+01	2.648E+00	7.387E+02	4.963E-02
1971	2.372E+03	1.296E+06	8.707E+01	3.117E+00	8.695E+02	5.842E-02
1972	2.715E+03	1.483E+06	9.966E+01	3.567E+00	9.953E+02	6.687E-02
1973	3.044E+03	1.663E+06	1.117E+02	4.000E+00	1.116E+03	7.497E-02
1974	3.361E+03	1.836E+06	1.234E+02	4.416E+00	1.232E+03	8.277E-02
1975	3.665E+03	2.002E+06	1.345E+02	4.815E+00	1.343E+03	9.026E-02
1976	3.957E+03	2.162E+06	1.453E+02	5.200E+00	1.451E+03	9.746E-02
1977	4.238E+03	2.315E+06	1.556E+02	5.569E+00	1.554E+03	1.044E-01
1978	4.507E+03	2.462E+06	1.654E+02	5.922E+00	1.652E+03	1.110E-01
1979	4.766E+03	2.604E+06	1.750E+02	6.263E+00	1.747E+03	1.174E-01
1980	5.016E+03	2.740E+06	1.841E+02	6.590E+00	1.839E+03	1.235E-01
1981	5.255E+03	2.871E+06	1.929E+02	6.905E+00	1.926E+03	1.294E-01
1982	5.483E+03	2.996E+06	2.013E+02	7.205E+00	2.010E+03	1.351E-01
1983	5.708E+03	3.118E+06	2.095E+02	7.500E+00	2.092E+03	1.406E-01
1984	5.917E+03	3.232E+06	2.172E+02	7.774E+00	2.169E+03	1.457E-01
1985	6.124E+03	3.346E+06	2.248E+02	8.047E+00	2.245E+03	1.508E-01
1986	6.317E+03	3.451E+06	2.319E+02	8.300E+00	2.315E+03	1.556E-01
1987	6.509E+03	3.556E+06	2.389E+02	8.552E+00	2.386E+03	1.603E-01
1988	6.686E+03	3.652E+06	2.454E+02	8.785E+00	2.451E+03	1.647E-01
1989	6.863E+03	3.749E+06	2.519E+02	9.018E+00	2.516E+03	1.690E-01
1990	7.027E+03	3.839E+06	2.579E+02	9.232E+00	2.576E+03	1.731E-01
1991	7.183E+03	3.924E+06	2.637E+02	9.439E+00	2.633E+03	1.769E-01
1992	7.341E+03	4.011E+06	2.695E+02	9.646E+00	2.691E+03	1.808E-01
1993	7.486E+03	4.090E+06	2.748E+02	9.836E+00	2.744E+03	1.844E-01
1994	7.632E+03	4.169E+06	2.801E+02	1.003E+01	2.798E+03	1.880E-01
1995	7.765E+03	4.242E+06	2.850E+02	1.020E+01	2.846E+03	1.913E-01
1996	7.900E+03	4.316E+06	2.900E+02	1.038E+01	2.896E+03	1.946E-01
1997	8.023E+03	4.383E+06	2.945E+02	1.054E+01	2.941E+03	1.976E-01
1998	8.148E+03	4.451E+06	2.991E+02	1.071E+01	2.987E+03	2.007E-01
1999	8.261E+03	4.513E+06	3.032E+02	1.085E+01	3.028E+03	2.035E-01
2000	8.377E+03	4.576E+06	3.075E+02	1.101E+01	3.071E+03	2.063E-01
2001	8.481E+03	4.633E+06	3.113E+02	1.114E+01	3.109E+03	2.089E-01
2002	1.051E+04	5.744E+06	3.859E+02	1.381E+01	3.854E+03	2.589E-01
2003	1.264E+04	6.905E+06	4.639E+02	1.661E+01	4.633E+03	3.113E-01
2004	1.481E+04	8.093E+06	5.437E+02	1.946E+01	5.430E+03	3.649E-01
2005	1.801E+04	9.840E+06	6.612E+02	2.367E+01	6.603E+03	4.436E-01
2006	2.008E+04	1.097E+07	7.369E+02	2.638E+01	7.359E+03	4.944E-01
2007	2.294E+04	1.253E+07	8.421E+02	3.014E+01	8.410E+03	5.651E-01
2008	2.568E+04	1.403E+07	9.425E+02	3.374E+01	9.412E+03	6.324E-01
2009	2.829E+04	1.545E+07	1.038E+03	3.717E+01	1.037E+04	6.967E-01
2010	3.068E+04	1.676E+07	1.126E+03	4.031E+01	1.125E+04	7.556E-01
2011	3.297E+04	1.801E+07	1.210E+03	4.333E+01	1.209E+04	8.121E-01
2012	3.518E+04	1.922E+07	1.291E+03	4.622E+01	1.290E+04	8.665E-01
2013	3.730E+04	2.038E+07	1.369E+03	4.901E+01	1.367E+04	9.187E-01
2014	3.922E+04	2.143E+07	1.440E+03	5.154E+01	1.438E+04	9.660E-01

Results (Continued)

Year	Carbon dioxide			NMOC		
	(Mg/year)	(m ³ /year)	(av ft ³ /min)	(Mg/year)	(m ³ /year)	(av ft ³ /min)
2015	4.096E+04	2.237E+07	1.503E+03	5.381E+01	1.501E+04	1.009E+00
2016	4.262E+04	2.328E+07	1.565E+03	5.600E+01	1.562E+04	1.050E+00
2017	4.422E+04	2.416E+07	1.623E+03	5.811E+01	1.621E+04	1.089E+00
2018	4.576E+04	2.500E+07	1.680E+03	6.013E+01	1.678E+04	1.127E+00
2019	4.715E+04	2.576E+07	1.731E+03	6.195E+01	1.728E+04	1.161E+00
2020	4.839E+04	2.644E+07	1.776E+03	6.358E+01	1.774E+04	1.192E+00
2021	4.958E+04	2.709E+07	1.820E+03	6.515E+01	1.818E+04	1.221E+00
2022	5.073E+04	2.771E+07	1.862E+03	6.665E+01	1.860E+04	1.249E+00
2023	5.183E+04	2.831E+07	1.902E+03	6.810E+01	1.900E+04	1.277E+00
2024	5.280E+04	2.884E+07	1.938E+03	6.937E+01	1.935E+04	1.300E+00
2025	5.363E+04	2.930E+07	1.969E+03	7.047E+01	1.966E+04	1.321E+00
2026	5.444E+04	2.974E+07	1.998E+03	7.153E+01	1.996E+04	1.341E+00
2027	5.521E+04	3.016E+07	2.027E+03	7.255E+01	2.024E+04	1.360E+00
2028	5.596E+04	3.057E+07	2.054E+03	7.352E+01	2.051E+04	1.378E+00
2029	5.667E+04	3.096E+07	2.080E+03	7.446E+01	2.077E+04	1.396E+00
2030	5.736E+04	3.133E+07	2.105E+03	7.536E+01	2.103E+04	1.413E+00
2031	5.802E+04	3.169E+07	2.130E+03	7.623E+01	2.127E+04	1.429E+00
2032	5.865E+04	3.204E+07	2.153E+03	7.706E+01	2.150E+04	1.445E+00
2033	5.926E+04	3.237E+07	2.175E+03	7.786E+01	2.172E+04	1.460E+00
2034	5.984E+04	3.269E+07	2.197E+03	7.863E+01	2.194E+04	1.474E+00
2035	6.041E+04	3.300E+07	2.217E+03	7.937E+01	2.214E+04	1.488E+00
2036	6.095E+04	3.329E+07	2.237E+03	8.008E+01	2.234E+04	1.501E+00
2037	6.146E+04	3.358E+07	2.256E+03	8.076E+01	2.253E+04	1.514E+00
2038	5.905E+04	3.226E+07	2.168E+03	7.759E+01	2.165E+04	1.454E+00
2039	5.674E+04	3.100E+07	2.083E+03	7.455E+01	2.080E+04	1.397E+00
2040	5.451E+04	2.978E+07	2.001E+03	7.163E+01	1.998E+04	1.343E+00
2041	5.238E+04	2.861E+07	1.923E+03	6.882E+01	1.920E+04	1.290E+00
2042	5.032E+04	2.749E+07	1.847E+03	6.612E+01	1.845E+04	1.239E+00
2043	4.835E+04	2.641E+07	1.775E+03	6.353E+01	1.772E+04	1.191E+00
2044	4.645E+04	2.538E+07	1.705E+03	6.104E+01	1.703E+04	1.144E+00
2045	4.463E+04	2.438E+07	1.638E+03	5.864E+01	1.636E+04	1.099E+00
2046	4.288E+04	2.343E+07	1.574E+03	5.634E+01	1.572E+04	1.056E+00
2047	4.120E+04	2.251E+07	1.512E+03	5.414E+01	1.510E+04	1.015E+00
2048	3.958E+04	2.163E+07	1.453E+03	5.201E+01	1.451E+04	9.750E-01
2049	3.803E+04	2.078E+07	1.396E+03	4.997E+01	1.394E+04	9.367E-01
2050	3.654E+04	1.996E+07	1.341E+03	4.801E+01	1.339E+04	9.000E-01
2051	3.511E+04	1.918E+07	1.289E+03	4.613E+01	1.287E+04	8.647E-01
2052	3.373E+04	1.843E+07	1.239E+03	4.432E+01	1.237E+04	8.308E-01
2053	3.241E+04	1.771E+07	1.190E+03	4.258E+01	1.188E+04	7.982E-01
2054	3.114E+04	1.701E+07	1.143E+03	4.091E+01	1.141E+04	7.669E-01
2055	2.992E+04	1.634E+07	1.098E+03	3.931E+01	1.097E+04	7.369E-01
2056	2.874E+04	1.570E+07	1.055E+03	3.777E+01	1.054E+04	7.080E-01
2057	2.762E+04	1.509E+07	1.014E+03	3.629E+01	1.012E+04	6.802E-01
2058	2.653E+04	1.450E+07	9.740E+02	3.487E+01	9.727E+03	6.535E-01
2059	2.549E+04	1.393E+07	9.358E+02	3.350E+01	9.345E+03	6.279E-01
2060	2.449E+04	1.338E+07	8.991E+02	3.218E+01	8.979E+03	6.033E-01
2061	2.353E+04	1.286E+07	8.638E+02	3.092E+01	8.627E+03	5.796E-01
2062	2.261E+04	1.235E+07	8.300E+02	2.971E+01	8.289E+03	5.569E-01
2063	2.172E+04	1.187E+07	7.974E+02	2.855E+01	7.964E+03	5.351E-01
2064	2.087E+04	1.140E+07	7.662E+02	2.743E+01	7.651E+03	5.141E-01
2065	2.005E+04	1.096E+07	7.361E+02	2.635E+01	7.351E+03	4.939E-01

Results (Continued)

Year	Carbon dioxide			NMOC		
	(Mg/year)	(m ³ /year)	(av ft ³ /min)	(Mg/year)	(m ³ /year)	(av ft ³ /min)
2066	1.927E+04	1.053E+07	7.072E+02	2.532E+01	7.063E+03	4.746E-01
2067	1.851E+04	1.011E+07	6.795E+02	2.432E+01	6.786E+03	4.560E-01
2068	1.779E+04	9.717E+06	6.529E+02	2.337E+01	6.520E+03	4.381E-01
2069	1.709E+04	9.336E+06	6.273E+02	2.245E+01	6.264E+03	4.209E-01
2070	1.642E+04	8.970E+06	6.027E+02	2.157E+01	6.019E+03	4.044E-01
2071	1.578E+04	8.618E+06	5.790E+02	2.073E+01	5.783E+03	3.885E-01
2072	1.516E+04	8.280E+06	5.563E+02	1.992E+01	5.556E+03	3.733E-01
2073	1.456E+04	7.955E+06	5.345E+02	1.913E+01	5.338E+03	3.587E-01
2074	1.399E+04	7.644E+06	5.136E+02	1.838E+01	5.129E+03	3.446E-01
2075	1.344E+04	7.344E+06	4.934E+02	1.766E+01	4.928E+03	3.311E-01
2076	1.292E+04	7.056E+06	4.741E+02	1.697E+01	4.734E+03	3.181E-01
2077	1.241E+04	6.779E+06	4.555E+02	1.631E+01	4.549E+03	3.056E-01
2078	1.192E+04	6.513E+06	4.376E+02	1.567E+01	4.370E+03	2.937E-01
2079	1.146E+04	6.258E+06	4.205E+02	1.505E+01	4.199E+03	2.821E-01
2080	1.101E+04	6.013E+06	4.040E+02	1.446E+01	4.034E+03	2.711E-01
2081	1.057E+04	5.777E+06	3.881E+02	1.389E+01	3.876E+03	2.604E-01
2082	1.016E+04	5.550E+06	3.729E+02	1.335E+01	3.724E+03	2.502E-01
2083	9.762E+03	5.333E+06	3.583E+02	1.283E+01	3.578E+03	2.404E-01
2084	9.379E+03	5.124E+06	3.443E+02	1.232E+01	3.438E+03	2.310E-01
2085	9.011E+03	4.923E+06	3.308E+02	1.184E+01	3.303E+03	2.219E-01
2086	8.658E+03	4.730E+06	3.178E+02	1.138E+01	3.174E+03	2.132E-01
2087	8.318E+03	4.544E+06	3.053E+02	1.093E+01	3.049E+03	2.049E-01
2088	7.992E+03	4.366E+06	2.934E+02	1.050E+01	2.930E+03	1.968E-01
2089	7.679E+03	4.195E+06	2.819E+02	1.009E+01	2.815E+03	1.891E-01
2090	7.378E+03	4.030E+06	2.708E+02	9.694E+00	2.704E+03	1.817E-01
2091	7.088E+03	3.872E+06	2.602E+02	9.314E+00	2.598E+03	1.746E-01
2092	6.810E+03	3.721E+06	2.500E+02	8.948E+00	2.496E+03	1.677E-01
2093	6.543E+03	3.575E+06	2.402E+02	8.598E+00	2.399E+03	1.612E-01
2094	6.287E+03	3.434E+06	2.308E+02	8.260E+00	2.305E+03	1.548E-01
2095	6.040E+03	3.300E+06	2.217E+02	7.937E+00	2.214E+03	1.488E-01
2096	5.803E+03	3.170E+06	2.130E+02	7.625E+00	2.127E+03	1.429E-01
2097	5.576E+03	3.046E+06	2.047E+02	7.326E+00	2.044E+03	1.373E-01
2098	5.357E+03	2.927E+06	1.966E+02	7.039E+00	1.964E+03	1.319E-01
2099	5.147E+03	2.812E+06	1.889E+02	6.763E+00	1.887E+03	1.268E-01
2100	4.945E+03	2.702E+06	1.815E+02	6.498E+00	1.813E+03	1.218E-01
2101	4.751E+03	2.596E+06	1.744E+02	6.243E+00	1.742E+03	1.170E-01
2102	4.565E+03	2.494E+06	1.676E+02	5.998E+00	1.673E+03	1.124E-01
2103	4.386E+03	2.396E+06	1.610E+02	5.763E+00	1.608E+03	1.080E-01
2104	4.214E+03	2.302E+06	1.547E+02	5.537E+00	1.545E+03	1.038E-01
2105	4.049E+03	2.212E+06	1.486E+02	5.320E+00	1.484E+03	9.972E-02

