

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

**PLAN PARA LA UTILIZACIÓN DEL GAS GENERADO EN EL RELLENO  
SANITARIO DE CAROLINA**

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

Por  
Quintín De Jesús Rivas

12 de diciembre de 2011

**PLAN PARA LA UTILIZACIÓN DEL GAS GENERADO EN EL RELLENO  
SANITARIO DE CAROLINA**

POR

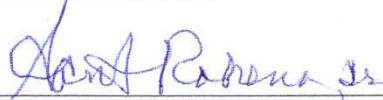
QUINTÍN DE JESÚS RIVAS

PROYECTO DE PLANIFICACIÓN SOMETIDO COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA EL GRADO DE

MAESTRÍA EN PLANIFICACIÓN  
EN  
PLANIFICACIÓN AMBIENTAL

UNIVERSIDAD METROPOLITANA  
SAN JUAN, PUERTO RICO  
2011

APROBADA POR:



SANTOS ROHENA, Ph.D  
DIRECTOR DEL PROYECTO DE PLANIFICACIÓN



SONIA N. FELICIANO HEREDIA, MSEM  
MIEMBRO DEL COMITÉ



ZOE ATANCES GONZÁLEZ, MBA  
MIEMBRO DEL COMITÉ



CARLOS M. PADIN BIBILONI, Ph.D  
DECANO ESCUELA ASUNTOS AMBIENTALES

12/Dic/11  
DÍA/MES/AÑO

## **DEDICATORIA**

*Primeramente a Dios porque gracias a él he llegado donde estoy. En segundo lugar a toda mi familia pero en especial mis perros que día a día esperan por mí para estar conmigo y algunos de ellos hasta me acompañaron en mis desveladas en preparación de este proyecto.*

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a Dios porque a pesar de las adversidades me ha permitido llegar hasta aquí con salud para poder seguir luchando y logrando mis metas trazadas y las nuevas que llegan. En segundo lugar a mis padres que dieron la vida y me enseñaron a ser un luchador. A mi hermana María I. De Jesús y mis hijas adoptivas Doris, Nicole y Natasha que siempre me hacen sentir que estoy vivo y que necesitan de mí. A Dr. Santos Rohena porque cuando me quede solo estuvo disponible para ayudarme y orientarme. A Zoe Atances mi amiga incondicional que me ha ayudado y ha estado en las buenas y en las malas. A Sonia Feliciano que ha estado para escuchar, corregir y para empujarme para que no detenga la marcha.

A mis queridos Edgardo Malavé y Milagros Rodríguez porque ustedes si han soportado toda la carga de estudios, trabajo y personal que he llevado durante este tiempo y han continuado a mi lado. A la Profesora Maria Calixta Ortiz por darme la oportunidad de trabajar con usted y orientarme y darme de sus sabios consejos. A Lourdes Febres que también ha estado a mi lado ayudándome y haciéndome parte de programas como el de *Geomodel*.

A Doña Delia Muñiz, Directora de Control Ambiental del Municipio de Carolina, mi segunda madre, que siempre ha estado para mí y me permitió realizar este proyecto en el relleno sanitario de Carolina. Al Ing. Olmar López que me explico los procesos de funcionamiento de la tres tecnologías. Y a todos los demás que de una u otra forma me ayudaron con su granito de arena, Gracias.

## TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS .....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	vii
RESUMEN .....	viii
ABSTRACT.....	ix
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN.....	1
Trasfondo del problema de Planificación.....	1
Problema de Planificación.....	7
Justificación del Proyecto de Planificación.....	13
Preguntas de investigación .....	16
Meta .....	16
Objetivos .....	16
CAPÍTULO II REVISIÓN DE LITERATURA.....	17
Trasfondo histórico.....	17
Marco conceptual o teórico.....	21
Estudio de casos .....	26
Marco legal.....	33
CAPÍTULO III METODOLOGÍA .....	45
Introducción .....	45
Área de estudio.....	45
Objetivos .....	46
Fuente de datos .....	46
Diseño metodológico .....	47
Técnica de análisis.....	49
CAPÍTULO IV ANÁLISIS DEL PROBLEMA.....	50
CAPÍTULO V ALTERNATIVAS, ESTRATEGIAS Y PLAN DE ACCIÓN .....	56
CAPÍTULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	71
LITERATURA CITADA.....	73

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Comparativa de gases generados en diferentes rellenos sanitarios en Puerto Rico.....	78
Tabla 2. Lectura promedio estacion de destruccion de gases en 2011.....	79
Tabla 3. Lectura promedio estacion de destruccion de gases en 2010.....	80
Tabla 4. Lectura promedio estacion de destruccion de gases en 2009.....	81
Tabla 5. Lectura promedio estacion de destruccion de gases en 2008.....	82
Tabla 6. Lectura promedio estacion de destruccion de gases en 2007.....	83
Tabla 7. Lectura promedio estacion de destruccion de gases en 2006.....	84
Tabla 8. Comparativa de gas generado vs gas destruido.....	85
Tabla 9. Historial promedio de muestreo realizado en los pozos. ....	86
Tabla 10. Porciento de no funcionamiento por pozo. ....	88
Tabla 11. Promedio de lectura de datos del incinerador. ....	90
Tabla 12. Mediana de lecturas de datos del incinerador. ....	91
Tabla 13. Desviación estándar de lecturas de datos del incinerador.....	92
Tabla 14. Evaluación de mejor alternativa. ....	93
Tabla 15. Estrategias de instalación de mejor alternativa. ....	94

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Foto aérea del relleno sanitario de Carolina . . . . .	96
Figura 2. Ubicación de los pozos en SRS Carolina. . . . .	97
Figura 3. Gráfica comparativa de gas destruido vs generado . . . . .	98
Figura 4. Pozos con niveles bajos de metano. . . . .	99
Figura 5. Gráfica de los pozos con metano bajo. . . . .	100
Figura 6. Pozos con niveles de oxígeno alto. . . . .	101
Figura 7. Gráfica de los pozos con oxígeno alto. . . . .	102
Figura 8. Pozos sin funcionamiento en el tiempo estudiado. . . . .	103

## RESUMEN

En 1996 la Ley de Aire Limpio le requirió a los rellenos sanitarios que tenían una capacidad mayor de 2.5 millones de metros cúbicos o que generaran más de 50 mega gramos de compuestos orgánicos al aire o estuvieran en operación desde antes de 1987 que cumplieran con permiso Título V en donde los requisitos del permiso exigían recoger y destruir los gases generados en el relleno sanitario. Esto debido a que los gases generados en el relleno sanitario como metano y bióxido de carbono son gases de invernaderos que destruyen la capa de ozono y algunos son explosivos. El relleno sanitario de Carolina luego de realizar los cálculos se percata que tiene que cumplir con estos requisitos e instalan un sistema de recolección y destrucción de gases. Este sistema opera desde 2004 pero la prueba de funcionamiento fue realizada en el 2006. Se cumple con la Ley al destruirlos pero estos gases tienen diferentes usos si se recuperan y puede redundar en economías para el dueño. En el proyecto se realizó un análisis del funcionamiento del sistema para ver de qué forma se podía mejorar ya que trabaja con un % de metano bajo y con muchos pozos fuera de servicio. Para esto analizamos las lecturas de los muestreos realizados durante el periodo de enero de 2006 hasta febrero de 2011. Dentro de los resultados encontrados podemos señalar que es necesaria la instalación de pozos adicionales ya que hay un pozo destruido que no se reemplazo y hay cuatro adicionales que no funcionan. Además, se debe instalar pozos adicionales ya que la cantidad de gases recuperado para destruir es muy bajo al comparar con el gas generado. Evaluamos las tecnologías de un incinerador de cremación de animales, conversión a energía y conversión a combustible del gas para analizar cual alternativa era la mejor para la preparación de un plan de instalación en SRS Carolina. Luego de evaluarlas las últimas dos alternativas fueron descartadas ya que es necesario la generación de más metano para que sea factible estos dos proyectos y por razones económicas y de ruido. Aunque son tecnologías buenas son para implantarse en rellenos sanitarios grandes y con buena generación de metano.



## ABSTRACT

In 1996 the Clean Air Act required that all landfills having a capacity greater than 2.5 million cubic meters or that generate more than 50 mega grams of organic compounds in air or was in operation since before 1987 that met with permission where Title V permit requirements required collecting and destroying landfill gas. This is because the gases generated in the landfill as methane and carbon dioxide are greenhouse gases that destroy the layer ozone, and some are explosive. The Carolina Landfill after performing computations notices that must meet these requirements and install a gas collection and destruction. This system operates since 2004 but the performance test was conducted in 2006. Law is fulfilled in destroying but these gases have different uses if they are recovered and can result in savings for the owner. For this, I analyze the readings of the samples taken during the period January 2006 to February 2011. Among the results we can say that it is necessary to install additional wells as there is a destroyed well that is not replacement and four additional wells that do not work. Furthermore, additional wells should be installed as the amount recovered to destroy gas is very low when compared with the generated gas. Technologies are assessed an animal cremation incinerator, landfill gas to energy and conversion landfill gas to fuel substitute to analyze what the best alternative was to prepare an installation plan in Carolina landfill. After evaluating the last two alternatives were discarded because it is necessary to generate more methane to be possible these two projects and for economic reasons and noise. This technologies discarded are good for implemented in large landfills with good methane generation.

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### **Trasfondo del problema de Planificación**

El problema del manejo y la disposición de los desperdicios sólidos en Puerto Rico es uno de los problemas ambientales más importante y apremiante que enfrenta este país en este momento. La producción de desperdicios sólidos en Puerto Rico es una de las más altas en el mundo llegando a generar 5.18 libras diarias de desperdicios por personas según el estudio realizado por la Autoridad de Desperdicios Sólidos y 3.91 libras de desperdicios diarias por persona si solo consideramos la generación de desperdicios sólidos domésticos(ADS, 2003). Algunos países con economías más altas y estables generan menos desperdicios como es el caso de Estados Unidos y países de Europa. La disposición de los desperdicios sólidos en Puerto Rico hasta la década de los 70 se realizaba mayormente mediante la quema de basura a campo abierto (JCA, 1988). Luego de la creación de la Junta de Calidad Ambiental en el año 1970 se comienza a modificar esta práctica y se pasa a exigir que se realice mediante los rellenos sanitarios. La agencia de Protección Ambiental también fue creada en el 1970 y ambas agencias tanto la federal como la estatal pasan a regular la forma de disposición de los desperdicios sólidos no peligrosos. El método de sistema de relleno sanitario para la disposición de los desperdicios domésticos es un método creado por la ingeniería para disponer los desperdicios sólidos en el suelo en una forma que se proteja la salud humana y el ambiente (Tchobanoglous & Kreith, 2002). El manejo de los desperdicios sólidos a través de los rellenos sanitario es una de las técnicas de manejo más utilizada en el mundo que generalmente presenta dos impactos

ambientales importantes que son la producción de lixiviados y la generación de gases (Berrueta & Castrillón, 1992).

La mayoría de los sesenta rellenos sanitarios que existían en la década de los noventa no cumplían con los requisitos de ley requerida para operar los mismos. En abril de 1994 la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) requiere el cumplimiento con el subtítulo D de la Ley de Conservación y Recuperación de Recursos (RCRA, por sus siglas en inglés). Puerto Rico a través de la Junta de Calidad Ambiental demostró que tenía un programa equivalente al 40CFR258 y por tanto se le da la delegación del Subtítulo D de RCRA. La Junta de Calidad Ambiental en coordinación con la Autoridad de Desperdicios Sólidos se dieron a la tarea de evaluar los vertederos llevándolos a cerrar treinta y tres vertederos que no cumplían con los requisitos de esta Ley tanto en la fase de ubicación, diseño y por problemas operacionales principalmente de contaminación de terreno y aguas subterráneas. El propósito principal del Subtítulo D (40CFR258) es que los desperdicios sólidos municipales sean dispuestos adecuadamente en orden que ayuden a proteger la calidad del ambiente y la salud humana, preservando los recursos naturales. Los rellenos sanitarios en Puerto Rico presentan una serie de retos que deben ser manejados adecuadamente en las fases de planificación, operación y cierre para asegurar la salud pública y que el impacto al ambiente sea mínimo (Nazario, 2003). Durante los procesos de disposición de desperdicios sólidos municipales una gran cantidad de gases de invernadero son emitidos, causando un impacto significativo a los cambios de clima (Lu, Huang, He, & Zeng, 2009). En Puerto Rico actualmente quedan 29 rellenos sanitarios en operación.

La jerarquía de manejo integral de desperdicios sólidos que impulsa la EPA a través de la Ley RCRA debe ser: reducción en el origen, reutilización, reciclaje y composta, tratamiento

termal con recuperación de energía y relleno sanitario. Basado en esto desde la perspectiva de gerencia de desperdicios sostenibles, la prioridad es la reducción en el origen seguido del reciclaje, ambas son altamente beneficiosas en términos de la reducción de emisiones de gases de invernaderos (Ryu, 2010). Es evidente que en Puerto Rico no cumplimos con esta jerarquía ya que al ser uno de los países que más desperdicios generamos por personas no cumplimos con la reducción en el origen, ni con la reutilización y menos con el reciclaje cuando los porcentajes de este no alcanzan ni un 16% (obs. pers.). En el 2008 según el Plan de Itinerario Dinámico de Infraestructura de la Autoridad de Desperdicios Sólidos se alcanzo solo un 15.6% que está muy por debajo de lo requerido por la Ley número 70 de 1992 mejor conocida como Ley para la Reducción y Reciclaje de los Desperdicios Sólidos en Puerto Rico que es un 35%. Los tratamientos termales (combustión) es una de las opciones para el manejo de los desperdicios sólidos para generar energía pero aun así siguen teniendo mucha oposición en nuestra isla por parte de la ciudadanía.

Este problema se complicará aún más con el cierre mandatorio de rellenos sanitarios que no cumplen con la reglamentación local y federal y que representan un riesgo potencial de contaminación. El 12 de junio de 2003, mediante la Resolución R-03-17-7 la Junta de Calidad Ambiental adopto el plan integral de trabajo para implantar el programa operación cumplimiento, que pretendía obligar a los rellenos sanitarios a cumplir con la ley, al momento ningún relleno sanitario cumple al 100% con lo establecido en ley. Si añades a esto que la vida útil de la mayoría de los rellenos sanitarios es bien corta lo cual nos indican, según la proyección del gobierno que siete rellenos sanitarios deberán estar operando para el 2030 (ADS, 2008). Esto nos plantea una situación que deja de ser grave y se convierte en crisis.

El manejo efectivo de los desperdicios sólidos municipales se ha convertido en una gran preocupación social y ambiental (Erses & Onay, 2003). Los rellenos sanitarios no son considerados la mejor alternativa para la disposición de desperdicios sólidos en países con poco terreno y densidad poblacional alta como es el caso de Puerto Rico porque consumen mucho espacio, representan altos costos y riesgos relacionados con las emisiones de contaminantes al aire y pueden generar descargas de lixiviados a los cuerpos de agua y a la superficie de la tierra, así como gases de invernadero que propician el calentamiento global si no son operados eficientemente. Aunque, siempre serán necesarios ya que se deberá tener un lugar donde disponer de los desperdicios que no pueden ser desviados, reciclados o reducidos y las cenizas de facilidades termales. Actualmente a cinco rellenos sanitarios en Puerto Rico se le emitió una orden de cierre por parte de la EPA por incumplimiento y por contaminación del ambiente, para el cierre de los mismos en unas fechas establecidas. Los mayores problemas de contaminación surgen de contaminación de agua por los lixiviados generados por la descomposición de los desperdicios. El otro problema que crea los desperdicios es la generación de gases que son explosivos y causan daño al ambiente. Los gases de rellenos sanitarios son compuestos mayormente de metano y bióxido de carbono con algunas trazas de nitrógeno y oxígeno (Zietsman, Ehsanul Bari, & Rand, 2008). Las emisiones producidas por los rellenos sanitarios en el mundo son responsables de cerca del 10% de las emisiones al aire de metano y por tanto una importante fuente de emisión de gases de invernaderos (Bogner, Meadows & Repa, 1998). Un alto porcentaje de los desperdicios sólidos domésticos o municipales está compuesto por material orgánico que con el tiempo se descomponen, se volatilizan y a través de reacciones químicas se genera de forma natural cantidades significativas de gas, siendo la de mayor concentración el

metano y el bióxido de carbono. El metano y el bióxido de carbono liberado son gases de invernadero que contribuyen al calentamiento global (Ferrey, 2007).

Las emisiones de gases de invernadero pueden ser incrementadas por la fuga descontrolada de gas metano debido a la disposición inadecuada de los desperdicios orgánicos en los rellenos sanitarios (Al-Dabbas, 1998). Se estima que en Estados Unidos se vierten a la atmosfera de 412 a 613 billones de pies cúbicos de metano anualmente. Esto representa la producción de hasta 4000 Mv de electricidad que podría darle electricidad a 3,000,000 de casas (EPA, 2006). En el plano internacional y como iniciativa de Estados Unidos y otros 17 países se firmo una alianza en julio 2004 llamada *Methane Markets* para trabajar en conjunto con la recuperación de las emisiones de gas metano y promover la producción de energía limpia (Goldstein, 2004).

Para trabajar con la generación de gases en los rellenos sanitarios y cubrir la contaminación al aire que estos emiten, la EPA en el 1996 incluyó como parte de la Ley de Aire Limpio unos parámetros para que todo relleno sanitario que cumpla con uno o más de estos tenga que cumplir con la instalación de un sistema para la destrucción de los gases. Según la Ley de Aire Limpio de la Agencia de Protección Ambiental toda facilidad que genere más de 50 mega gramos de compuestos orgánicos al aire, que cuente con una capacidad de diseño mayor de 2.5 millones de metros cúbicos y que esté en operación después de 1987 deberá cumplir con los requisitos de un permiso Título V, el cual exija recoger y destruir los gases generados. Además deberá reportar las emisiones anuales de estos gases y pagar por los mismos (JCA, 2001). Estimados de la eficiencia del sistema de recolección de gases son requeridos para calcular las emisiones de metano y el rendimiento ambiental del relleno sanitario (Monton, Chanton & Roger, 1995). En los primeros estudios realizados por la Junta de Calidad Ambiental los rellenos

sanitarios de Arecibo, San Juan, Carolina, Toa Baja, Humacao y Ponce deberían estar cumpliendo ya con estos requisitos. Actualmente en Puerto Rico solo existen cuatro rellenos sanitarios con estos sistemas activos y en funcionamiento. Estos SRS son Carolina, San Juan, Ponce y Humacao. El relleno sanitario de San Juan cerró operaciones desde el año 2000 pero sin embargo es requisito de Ley mantener cumplimiento con monitorear, recoger y destruir el gas generado por un período mínimo de 30 años.

El relleno sanitario de Carolina se encuentra cumpliendo con este requisito de Ley, por lo que recoge los gases los cuales son destruidos en un quemador (*flare*). Además, anualmente se reportan las emisiones de gases y se paga por las mismas. Este sistema se comenzó a instalar en el 2001 y comenzó a operar en el 2004. Estos gases en el caso particular del relleno sanitario de Carolina son recogidos por un sistema de tuberías de polietileno de alta densidad que consta de 40 pozos verticales interconectados por tuberías para llevarlos al quemador y destruirlos. El gas del relleno sanitario recolectado es actualmente dirigido a un quemador con antorcha encerrada con una capacidad de 1,500 scfm (pies cúbicos por minutos) y una entrada de calor de 90 MMBtu/hr. El combustible utilizado es propano a razón de 0.014 libras por hora. El combustible tiene un contenido máximo de azufre de  $1 \times 10^{-7}$  % por peso. Se realizó una prueba de funcionamiento reflejando un 98% de destrucción de compuestos orgánicos que no sean metano (NMOC por sus siglas en inglés).

La recuperación del gas en el relleno sanitario es una buena práctica de manejo operacional ya que controla las emisiones de gases de invernaderos de la facilidad a la atmósfera. El diseño de un sistema de recolección de gases de relleno sanitario requiere un buen conocimiento sobre la migración del gas para ubicar los pozos en los puntos en donde puedan recolectar mayor cantidad de gas (Tinet, 2010). Los sistemas de recolección de gases activos son

comúnmente utilizados en rellenos sanitarios municipales. Es necesario conocer los patrones de flujo del gas del relleno sanitario para poder hacer el diseño (Yu, Battle, Carrera & Lloret, 2009).

Aunque el SRS de Carolina cumple con la Ley de Aire Limpio existe un problema de planificación ya que el municipio de Carolina pudiera estar utilizando el gas generado para diferentes usos en lugar de estar destruyéndolo. Para poder analizar el uso adecuado para estos gases debemos realizar un estudio sobre la cantidad de gases que genera el sistema, realizar mejoras al sistema de ser necesario para que tenga más capacidad de generación de gases y buscar las posibles alternativas de uso del gas generado. Con el plan preparado pudimos hacer el análisis completo para poder decidir cuál era la mejor alternativa que se podía utilizar en el caso específico del relleno sanitario de Carolina y de esta forma poder recomendarle al municipio la mejor alternativa de utilización del gas.

### **Problema de Planificación**

De los 29 rellenos sanitarios que existen en operación en Puerto Rico solo cinco cumplen con las condiciones de Título V para la Ley de Aire Limpio. En los próximos meses se deben añadir a la lista alrededor de cinco rellenos sanitarios más que tendrán que cumplir con estos requisitos. Entre las condiciones que se deben cumplir para que el relleno sanitario sea catalogado como Título V están:

- 1) Haber aceptado desperdicios desde 8 de noviembre de 1987 o tener un espacio dentro de la capacidad de diseño para depositar más desperdicios.
- 2) Capacidad de diseño igual o mayor de 2.5 millones de mega gramos y 2.5 millones de metros cúbicos.
- 3) Una tasa de emisión igual o mayor de 50 mega gramos por año de compuestos orgánicos no metano (CONM).



Luego de que estas condiciones ocurran se deberá cumplir con diseñar e instalar un sistema de destrucción de gases. Entre los rellenos sanitarios que deben tener un sistema activo de destrucción de gases se encuentra el relleno sanitario de Carolina.

Los terrenos donde ubica el relleno sanitario de Carolina están clasificados como suelo rustico común según el plan desarrollado por el municipio de Carolina. El mismo ubica en una parcela de 147.86 cuerdas localizadas en el barrio Hoyo Mulas carretera PR-874 final mejor conocida como Avenida Monserrate y se encuentra a unos 3.7 kilómetros al norte-noreste del pueblo de Carolina (Figura 1). Esta parcela es propiedad del Municipio de Carolina. El aeropuerto Internacional Luís Muñoz Marín está ubicado a 17 mil pies de distancia del Relleno Sanitario. El mismo ubica fuera de áreas inundables según los mapas de FEMA. Dentro de los terrenos del relleno sanitario no se encuentran humedales pero en la inmediaciones existe un valle de inundación y un sistema de humedales los cuales el cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (COE por sus siglas en inglés) tiene jurisdicción sobre los mismos.

La facilidad está encerrada entre varios mogotes que forman el borde occidental de una cresta topográfica que se extiende hacia el este hasta el Río Grande de Loiza. La precipitación de lluvia en esta zona es bastante alta. Los meses donde se registra la mayor precipitación son los de agosto hasta noviembre y los meses secos son de enero a abril. La geología del lugar indica que es sustentada primeramente por depósitos de plataforma de carbonato de la formación de Aymamon combinada con la formación de piedra caliza Aguada. Esta consiste mayormente de piedra caliza (cárstica) y contiene depósitos de piedra, arena y sedimentos de arcilla. La piedra caliza generalmente es dura, densa y cristalina. La formación Aguada consiste mayormente de arena, arcilla y arcilla arenosa. Los tipos de suelos que dominan el área son mayormente Caguabo-Mucaro-Naranjito y Coloso-Toa-Bajura. Estos son derivados de la

formación de piedra caliza (*limestones formations*) y de depósitos aluviales no consolidados (*alluvial unconsolidated deposits*). La permeabilidad de los suelos en esta zona varía de 0.6 a 2 pulgadas por hora. El cuerpo de agua más cercano es el Río Grande de Loiza que se encuentra al sur de las facilidades (J.F. & Assoc., 1998).

Actualmente es administrado por la compañía *Landfill Gas Technologies, Corp.* Este comenzó a operar en el 1973 como vertedero municipal. Están autorizados a recibir desperdicios sólidos municipales que se dividen en chatarra, domésticos, escombros, material ferroso, material vegetativo y reciclaje municipal. Actualmente reciben desperdicios de todo el municipio de Carolina, agencias de gobierno y de algunas compañías privadas.

Es un relleno sanitario activo y poseen un sistema de pesajes que consta de dos básculas. Llevan registros de entrada y salida y tipo de material depositado. El horario de operación de la instalación es de lunes a viernes de 6:30 am a 4:00 pm, sábados de 6:30 am a 2:00 pm, y los domingos y días feriados se encuentran cerrados. En la operación diaria de la instalación los camiones o vehículos que entran al relleno sanitario para disponer desperdicios se pesan y son dirigidos a sus respectivas áreas. Cuentan con área de almacenaje de chatarra, área de trituración de material vegetativo, área de composta y el área de tiro o disposición. Los desperdicios que llegan al área de tiro son cubiertos al final de cada día con material procedente de un área dentro del relleno sanitario y el material utilizado es un tipo de suelo definido como caliche. Tienen proyectada una vida útil hasta el 2015 en la celda actual y tienen planes de expansiones adicionales. Dentro de esta instalación y formando parte del sistema de relleno sanitario de Carolina se encuentra una facilidad de procesamiento de material reciclable. Esta es una estación de transbordo y reciclaje de desperdicios sólidos del municipio autónomo de Carolina. En dicha estación se recuperan materiales reciclables provenientes de los desperdicios sólidos no

peligrosos. En estas facilidades se reciben y procesan los desperdicios domésticos recogidos en las casas de todo el municipio. Estos son procesados en la línea norte de la facilidad en donde pasan por un proceso en donde personal de la facilidad selecciona todo el material que puede ser reciclable. Los demás desperdicios continúan en el sistema de correa hasta llegar a la embaladora en donde se embalan y se transportan al área de tiro. En la línea sur se procesa todo el material reciclable que llega a la facilidad por medio de un sistema de correas que mediante un proceso combinado de personal y mecánico separa los diferentes materiales. De la línea sur el desperdicio que llega al tiro es mínimo. Todo el material reciclable luego de ser separado por su clasificación es embalado y almacenado hasta llenar vagones para ser vendido. En esta estación se recibe un flujo total aproximado de 300 toneladas de desperdicios por día. El horario de operación en la estación es de lunes a viernes de 6:00 am a 3:00 pm. La celda que se encuentra en operación y en donde se depositan los desperdicios actualmente cumple con los requisitos de diseño del Subtítulo D de RCRA. Se cumple con los requisitos de operación y el relleno sanitario cuenta con pozos de monitoria de aguas subterráneas y se monitorea los gases explosivos. Además, cuentan con tres tanques de almacenamiento de lixiviados con capacidad para 16,000 galones.

Desde el 2004 el relleno sanitario de Carolina cuenta con un sistema de extracción de gases activo que se encuentra en operación. Este sistema fue instalado ya que se verificó y comprobó que alcanzaba los requisitos para la instalación de un sistema de recolección de gases. En la verificación realizada se encontró que contaba con una capacidad de diseño igual a 2.5 millones de metros cúbicos (m<sup>3</sup>) y una tasa de emisión igual a 50 mega gramos de compuestos orgánicos no metano. A base de estos hallazgos se procedió a instalar el sistema de recolección de gases el cual consta de 40 pozos verticales de extracción de gases interconectados a un

quemador (*Flare*) y tuberías HDPE expuestas (Figura 2). La cantidad de pozos se determino por un radio de influencia que en este caso es de 44 metros. Aunque tienen autorización para recirculación de lixiviados en la celda en uso este método no se utiliza ya que en el municipio de Carolina llueve mucho y los niveles de lixiviados se mantienen bastante altos en la celda en operación.

El objetivo de éste sistema es evitar la emisión de gases contaminantes a la atmósfera, cumpliendo así con los criterios del reglamento para el control de la contaminación atmosférica de la JCA y la agencia federal EPA. Además de cumplir con las agencias reguladoras, éste sistema tiene como propósito:

- a) Controlar la migración de los gases fuera de los límites del SRS.
- b) Controlar la emisión de gases basándose en mediciones de las emisiones de gases en la superficie.
- c) Proteger las aguas subterráneas de los compuestos orgánicos volátiles.
- d) Controlar fuegos subterráneos en el interior del SRS.
- e) Proteger estructuras cercanas al SRS.

La operación del sistema consiste de las siguientes actividades:

- a) Monitorear los flujos, las temperaturas y las concentraciones de gases en los pozos de extracción.
- b) Verificar la integridad de las tuberías de transporte de gases, conexiones flexibles a los pozos de recolección de gases y reparar las mismas cuando sea necesario.
- c) Ajustar las presiones de vacío en el sistema cuando sea necesario basado en los parámetros del monitoreo del sistema.
- d) Verificar la operación del sistema de agua de condensado.

- e) Mantener archivados los datos del sistema.
- f) Operar el quemador de destrucción de gas.
- g) Monitorear las emisiones del quemador.
- h) Monitorear las emisiones de gases en la superficie del relleno sanitario.

La estación de incineración es el mecanismo de destrucción de los gases que se colectan mediante la operación del sistema. Posee un medidor de flujo automático, un eliminador de flama, un instrumento para medir temperaturas, separadores de condensado, *blowers* de aire, ventilador de vacío para gas, válvulas, tuberías en acero inoxidable para transportar los gases, quemador y tanque de condensado. El incinerador es quién garantiza la destrucción del 98% o más del gas metano. La concentración mínima de metano que debe entrar al incinerador es 25% para mantener una buena combustión en el quemador. El monitoreo consiste en verificar si el flujo de gas es el adecuado, verificar sonidos anormales y olores que indiquen escape de gas, verificar visualmente la combustión dentro del incinerador y tomar lecturas. Las concentraciones en la composición del gas deben ser las siguientes: 46% a 55% de CH<sub>4</sub>, 0 a 5% de O<sub>2</sub> y 2% a 14% de N<sub>2</sub>, además el monóxido de carbono no puede ser mayor de 25ppm y la temperatura del gas en el pozo no mayor de 55°C (131°F).

El sistema de gases del relleno sanitario de Carolina es uno que se construyo para cumplir con las regulaciones ambientales que exigen las agencias reguladoras tales como la Junta de Calidad Ambiental y la Agencia de Protección Ambiental y solo se llevo hasta donde lo exige la Ley que es la destrucción de los gases. Los gases generados y destruidos en el relleno sanitario pueden ser procesados y utilizados para producir energía eléctrica que podría utilizarse en las facilidades que se encuentran en los terrenos del relleno sanitario. Si esto es así, ¿porque no aprovechar los gases generados por el relleno sanitario para producir energía? ¿Porque no

recuperamos el gas y lo almacenamos para utilización de los vehículos municipales en lugar de combustible regular? ¿Porque no utilizamos el gas para la operación de un incinerador para los animales que el centro de control de animales municipal actualmente paga para que los incineren?

Es evidente que la utilización del gas tiene muchas alternativas y estas alternativas son recursos energéticos. Los nuevos y renovables recursos energéticos como lo serian los producidos por el gas del relleno sanitario son prospectos atractivos porque son libres de contaminantes, ilimitados y baratos (Akinbami, 2001). Tenemos un problema de planificación al no tener una alternativa clara en la utilización de este gas que puede ser de gran uso para las facilidades municipales y quién sabe si puede ser de un beneficio económico para el municipio de Carolina.

### **Justificación del Proyecto de Planificación**

El municipio de Carolina contrato los servicios de Landfill Gas Technologies, Corp. para instalar un sistema de recolección y destrucción de gases en el relleno sanitario para cumplir con los requisitos de la Ley de Aire Limpio mediante sistemas de tuberías de polietileno y estos gases son atrapados y succionados por presión negativa para llevarlos a una estación de destrucción. El agua producto de la condensación es bombeada hacia un tanque que se encuentra al lado de la estación de destrucción.

Las características más significativas de los gases de rellenos sanitarios son:

- Consisten primeramente de metano (de 40 a 60 %) y dióxido de carbono el resto (Anarug, Achari, & Joshi, 2007).
- El gas es húmedo, frío casi siempre resulta en la formación de agua condensada.
- El gas es inflamable.

- El gas puede migrar a través de los suelos circundantes y por conductos abiertos.
- El gas puede acumularse en espacios confinados (NREL, 1999).
- El peso (densidad específica) del gas es usualmente cerca del peso del aire.
- Tiene un promedio de temperatura de 16 a 52 grados centígrados (60 a 125 °F) dentro del relleno sanitario.
- Los componentes del gas (metano, dióxido de carbono, vapor de agua y otros) tienden a permanecer juntos pero pueden separarse a través del suelo y el contacto con líquidos.
- Los constituyentes secundarios (trazas de gases) pueden crear olores molestos, contaminación ambiental y crear un riesgo para la salud (Gas Control Engineering, 2010).

El metano o  $\text{CH}_4$  por su fórmula química es un hidrocarburo alcano más sencillo. Esta sustancia no polar se presenta en forma de gas a temperaturas y presiones ordinarias. En la naturaleza es incoloro e inodoro y no es soluble en agua cuando está en su fase líquida. Es el producto final de la putrefacción anaeróbica de las plantas y los desperdicios que puede ser aprovechado para producir biogás. Es generado por muchos microorganismos anaeróbicos y se utiliza en el proceso el  $\text{CO}_2$  como aceptor final de electrones. Es inflamable y explosivo y constituye hasta el 97% del gas natural en el mundo. Es uno de los gases de efecto de invernadero relativamente potente que contribuye a elevar el calentamiento global del planeta.

El metano no es tóxico. Las quemaduras que puede provocar si entra en ignición es uno de los principales peligros para la salud. Si forma mezclas con el aire estas pueden ser explosivas y es altamente inflamable. Reacciona violentamente con oxidantes, halógenos y algunos compuestos halogenados. Es también un asfixiante que puede llegar a desplazar el oxígeno por debajo de 19.5% por desplazamiento en espacios cerrados. En estructuras que se encuentren cerca o sobre el relleno sanitario, el metano puede llegar y penetrar al interior del edificio y

exponer a los empleados a niveles significativos del gas. Puede ser utilizado para la generación eléctrica ya que en algunos lugares se utiliza como combustible en las turbinas de gas o en generadores de vapor.

Tiene un calor de combustión, de unos 802 kJ/mol, haciéndolo el menor de todos los hidrocarburos, si lo dividimos por su masa molecular (16 g/mol) se encuentra que el metano, es el más simple de los hidrocarburos y que produce más cantidad de calor por unidad de masa que otros hidrocarburos más complejos. Es utilizado en algunas ciudades como combustible para calefacción y para cocinar al ser transportado por tuberías hasta los hogares y se le llama gas natural. En Bogotá, Colombia por ejemplo, el gas natural es utilizado como combustible alternativo por varios vehículos de transporte público.

El metano es utilizado también en procesos químicos industriales y generalmente es transportado como líquido refrigerado (gas natural licuado). La alta densidad de un gas frío hace que el escape de un contenedor refrigerado sea mínimo, ya que es más pesado que el aire pero a temperatura ambiente el gas metano es más ligero que el aire. Uno de los principales componentes de los gases que se transportan en un gasoducto es el metano.

El metano en la industria química, es la materia prima que se utiliza para la producción de hidrógeno, metanol, ácido acético y anhídrido acético. Cuando se utiliza para producir cualquiera de estos productos químicos, es necesario que primero se transforme en gas de síntesis, que es una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno, mediante reformación por vapor. En este proceso, el metano y el vapor reaccionan con la ayuda de un catalizador de níquel a altas temperaturas (700 -1,100 °C).

El acetileno que se obtiene haciendo pasar metano a través de un arco eléctrico, y los clorometanos (clorometano, diclorometano, cloroformo, y tetracloruro de carbono), producidos



por medio de la reacción del metano con cloro en forma de gas son otros de los productos químicos que provienen del metano. Pero el uso de estos productos está disminuyendo ya que el acetileno tiene sustitutos más económicos para ser reemplazado y los clorometanos debido a su toxicidad se están eliminando por motivos de salud y medioambientales.

En vez de destruir el gas debemos convertir este relleno sanitario en un bioreactor para procesar los gases ya que podemos sacar uso del mismo y así también cumplir con la Ley. Este gas puede ser recolectado, procesado y almacenado para usos posteriores cumpliendo también con el Título V de la Ley de Aire Limpio. Al no destruir el gas en el quemador evitaremos generar contaminantes a la atmosfera como los mercaptanos que se emiten al quemar hidrocarburos. Este gas es un recurso natural que no debe ser destruido ya que puede ser utilizado para producir energía y ser utilizado en las mismas facilidades.

### **Pregunta del proyecto de planificación**

¿Será viable ambiental y económicamente la utilización del gas en el relleno sanitario de Carolina?

### **Meta**

Preparar un plan para la utilización del gas generado por el sistema de gases del relleno sanitario de Carolina para que se optimice el sistema.

### **Objetivos**

1. Evaluar las condiciones existentes del sistema de gases del relleno sanitario de Carolina y de las facilidades en general para establecer las estrategias para optimizar el sistema.
2. Analizar las alternativas de uso del gas generado en el relleno sanitario para proponer un uso económicamente viable.
3. Elaborar un plan para la implantación de la tecnología seleccionada.

## **CAPÍTULO II**

### **REVISIÓN DE LITERATURA**

#### **Trasfondo histórico**

La Ley de Aire Limpio fue aprobada en el 1970 y se realizaron enmiendas en el 1976 y en el 1990 y su aplicación le corresponde a la Agencia de Protección Ambiental (EPA). Esta Ley se crea para trabajar con detener la contaminación al aire. Como primer paso se creó el Concilio Nacional de Calidad del Aire y el Ambiente (NAAQS). La Ley requería que la EPA identificara y estableciera las normas para los contaminantes identificados como perjudiciales a la salud humana y al medio ambiente. Los primeros contaminantes identificados fueron monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, ozono, dióxido de azufre y partículas de menor tamaño aerodinámico menor o igual a 10 micrómetros (PM-10). Como parte de la Ley se requería eliminar el plomo de la gasolina para mediados de la década de los 80. Las disposiciones de la Ley exigen que se cumplan cuatro etapas: identificar los contaminantes, demostrar cuales son causantes de que efecto en la salud o el ambiente, para establecer normas ambientales razonables, determinar las fuentes de los contaminantes y preparar y poner en práctica las medidas de control.

Conforme se obtiene más información sobre los efectos nocivos de los contaminantes se imponen normas más rigurosas y se establecen determinadas estrategias de control. La norma básica de cada contaminante se fundamenta en el mayor nivel de tolerancia de los seres humanos sin efectos perjudiciales. La enmienda a la Ley de 1976 estaba dirigida a empresas que no pudieran cumplir con estas regulaciones. La de 1990 extiende las secciones de la Reglamentación a 189 contaminantes atmosféricos tóxicos.

Las estrategias de control básicas consistían en regular los contaminantes de manera que se mantuvieran por debajo de los niveles señalados por las normas básicas establecidas. Para lograr esto era necesario establecer equipos de control específico. Las empresas eran reguladas por los estados y se hacía difícil poder lograr vigilarlos a todos para que cumplieran con los requisitos.

La Ley de Aire Limpio de 1990 se ocupó de ciertos contaminantes para poder solucionar el problema de incumplimiento y entonces exige con más fuerza que se sigan las normas imponiendo sanciones. Siguiendo el principio de la ley anterior, los estados son los que tienen la gran responsabilidad de hacer cumplir las disposiciones de la ley de 1990. Era necesario que cada uno preparara un plan estatal de implantación que pasaría a discusión pública antes de ser sometido a la EPA para su aprobación. El propósito del plan era reducir las emisiones de los contaminantes señalados por las normas nacionales de emisiones de contaminantes peligrosos que no se habían podido controlar. Un cambio en el proceso es la obligación de un trámite de solicitud de permiso. Las empresas contaminadoras deberían identificar los contaminantes que emiten, sus cantidades e identificar las medidas que se tomarían para reducirlas. Los trámites de esto tenían un costo que proveía fondos de asistencia económica federal a los estados para poder implantar el programa de control de la contaminación y el plan de implementación del estado (SIP por sus siglas en inglés). Esta nueva ley es más flexible que el planteamiento de orden y control de la anterior, permitiendo que las empresas contaminadoras elijan el método más económico para lograr los objetivos. Además, el sistema de salida utilizado distribuye la contaminación entre diferentes empresas. Estas medidas tomadas para reducir la contaminación del aire tienen un costo económico para las empresas contaminadoras.

La Ley de Aire Limpio se aplicó a los rellenos sanitarios en 1996 para aquellas facilidades que excedan los requisitos de:

- Haber aceptado desperdicios desde 8 de noviembre de 1987 o tener espacio dentro de la capacidad de diseño para depositar más desperdicios
- Capacidad de diseño igual o mayor de 2.5 millones de mega gramos y 2.5 millones de metros cúbicos
- Una tasa de emisión igual o mayor de 50 mega gramos por año de compuestos orgánicos no metano (CONM).

Esto se hace debido a que se identificó que los rellenos sanitarios eran una fuente de contaminación al ambiente, el cual no se estaba regulando. Además son una fuente de contaminación por los gases de invernaderos que causan daño a la capa de ozono.

Las regulaciones de EPA y JCA requieren la instalación de un sistema de recolección de gases y sistemas de control que cubra todas las partes de la instalación dentro de 30 meses (JCA, 2001). Los rellenos sanitarios sujetos a esta regla se espera que recojan al menos el 75% del gas producido. Los gases recogidos deberán ser quemados a una temperatura suficientemente alta como para destruir el 98% de los tóxicos. El éxito de un relleno sanitario en la destrucción de los gases tóxicos en el aire depende de las pruebas de las concentraciones de metano a la altura de los 10 centímetros sobre la superficie del relleno sanitario, cada 30 metros alrededor del perímetro del relleno sanitario y por *zig-zag*, perpendiculares a la superficie de la instalación y sus alrededores. Para esto entonces se requerirá una prueba de las tres fases: si la concentración de metano en cualquier lugar es mayor de 500 partes por millón, el relleno sanitario debe tomar medidas para reducir las emisiones en ese lugar, como la adición de la cubierta o el aumento de las líneas de gases instaladas debajo de la superficie del relleno. Se deben hacer pruebas de

metano en el relleno sanitario diez días más tarde. Si la concentración de metano es superior a 500 ppm de nuevo, se deben tomar medidas adicionales para reducir la concentración y volver de nuevo a la prueba diez días más tarde. Si el resultado es inferior a 500 ppm, una nueva prueba debe realizarse un mes después. Si el límite de 500 ppm se supera por tercera vez, se debe instalar un pozo de gases adicionales en ese lugar del relleno sanitario y además volver a medir concentraciones de metano dentro de 120 días. Si no se instala un nuevo pozo luego de fallar por tercera vez, no tendremos cumplimiento y entraremos en una violación de la Ley de Aire Limpio y por tanto estaremos expuestos a una acción de cumplimiento en virtud de la Ley.

Otros requisitos en virtud de la norma de gases de relleno sanitario incluyen el mantenimiento de una presión negativa (vacío) dentro de una cierta distancia de todos los pozos de gas y en todas las cabezas de pozos, la prevención de la infiltración de aire del exterior en todas las líneas de gas, y mantener una llama constante en los quemadores o dispositivos de combustión. El incumplimiento de cualquiera de estas disposiciones constituye una violación de la Ley. De no cumplir con esto el dueño de la facilidad pudiera ser multado por la Agencia de Protección Ambiental ya que esta parte de la Ley no ha sido delegada a la Junta de Calidad Ambiental.

Una forma más rápida de trabajar con la generación de gases de relleno sanitario lo es convirtiendo el relleno sanitario en uno bioreactor. Este se convierte en uno bioreactor para transformar rápidamente y degradar los desperdicios orgánicos. El aumento en la degradación se logra al añadir líquidos y aire para mejorar los procesos microbianos. De trabajarse de forma eficiente podemos ayudar a ampliar la vida útil del relleno sanitario y acelerar la generación del gas. Existen tres tipos de bioreactor que son los siguientes: a) En el bioreactor aeróbico el lixiviado se elimina de la celda recolectándolo en tanques de almacenamiento. Se inyecta aire en

la masa de desperdicios con pozos verticales u horizontales para promover la actividad aeróbica y acelerar la estabilización de los desperdicios. b) El bioreactor anaeróbico se le añade humedad a la masa de desperdicios por medio de la recirculación de lixiviados y otros líquidos para obtener los niveles óptimos de humedad. La biodegradación se produce en ausencia de oxígeno y acelera la producción de gas. c) El bioreactor híbrido acelera la degradación de los desperdicios mediante el empleo de una secuencia aeróbica – anaeróbica de tratamiento de materia orgánica. Esto ocasionara que los desperdicios se degraden rápidamente en los tramos superiores del relleno sanitario y que se pueda recoger los gases en las partes inferiores. Esto ocasionara el inicio más temprano de la metanogénesis en comparación con los rellenos sanitarios aeróbicos.

El SRS de Carolina comenzó la instalación del sistema de gases en el 2001 e inició su operación en el 2004. Las pruebas iniciales de funcionamiento fueron realizadas en el 2006 y las mismas fueron aprobadas por la Junta de Calidad Ambiental al destruir el 98% de los contaminantes requeridos. En el 2007 la Junta de Calidad Ambiental realiza pruebas de opacidad al sistema de gases y este no excede el 20% cumpliendo así con los requisitos establecidos en el Reglamento para el Control de la Contaminación Atmosférica de esta agencia.

### **Marco conceptual o teórico**

La planificación es una actividad técnica y política dirigida a guiar las transformaciones socioeconómicas y físicas espaciales de un entorno con el fin de mejorar su calidad de vida. Es un campo multidisciplinario que incluye los conceptos sociales, económicos, físicos (infraestructura), políticos y culturales que conlleva el análisis y diseño de la ciudad y las funciones de esta. La teoría de la planificación es un tema complejo debido a que no hay ciencia exacta para practicarla y tenemos que trabajar con múltiples intereses y diferentes tipos de

público buscando mejorar la calidad de vida. La teoría de planificación no es fácil definirla según Campbell y Fainstein (2002a) debido a cuatro factores:

1. La teoría de planificación se mezcla con todas las ciencias sociales haciendo difícil precisar el territorio específico de la planificación.
2. La relación entre planificadores y otros profesionales que todos planifican.
3. El campo de la planificación se encuentra dividido por campos específicos como lo es el urbano o el ambiental, cuando otros lo trabajan por la toma de decisiones.
4. Muchos de los campos son definidos por metodologías específicas pero el campo de la planificación toma prestado metodologías de diferentes campos por lo cual no se ha podido definir una metodología exacta para el mismo.

Sin embargo el análisis de problemas dentro de la planificación utiliza el método científico para la búsqueda de posibles alternativas. El proceso de planificación racional se compone de seis pasos que son los siguientes:

- Identificación de un problema o situación
- Establecer metas y objetivos
- Diseño y análisis del curso de acción
- Selección de estrategias para el curso de acción en donde tomamos en cuenta la eficiencia y eficacia. Es decir la maximización de recursos existentes con el fin de lograr el mayor beneficio posible al menor costo y la asignación adecuada de recursos para lograr un fin.
- Implantación del plan de acción
- Retroalimentación (*feedback*) (Friedman, 1987).

Uno de los dilemas del planificador es la posición que asume. En la teoría de planificación el planificador se encuentra en medio de los personajes que son tres: sector

privado, sector público y los ciudadanos. El planificador tiene que brindar la información como herramienta para cambiar los sucesos de acto presente. Esto es el propósito de planificar según Campbell y Fainstein (2007a). Debido a que el entorno en las ciudades cambia todos los días a consecuencias de las decisiones tomadas, esto lo convierte en un sistema vivo y evolutivo. Esto hace que el método racional de planificación termine en retroalimentación para evaluar los resultados y hacer los ajustes que sean necesarios.

Según Friedman la *planificación* es la práctica profesional que busca conectar formas de conocimiento a formas de acción en el dominio público. El propósito de esta definición es ver la planificación como algo que no es ingeniería en donde se establece un sistema y ruta para los personajes. La planificación debe ser normativa, innovadora, política, transitiva y basada en el aprendizaje social. Al planificar se debe ser flexible ya que el entorno estará en constante cambio y debemos considerar que en ocasiones tengamos que llevar a cabo cambios y adaptaciones.

La planificación urbana sigue el mismo proceso de la teoría de planificación pero orientada a las áreas urbanas de la ciudad y el comportamiento de esta. Es el conjunto de instrumentos técnicos y normativos que se redactan para ordenar el uso del suelo y regular las condiciones para su transformación o, en su caso, conservación. Comprende un conjunto de prácticas de carácter esencialmente proyectivo con las que se establece un modelo de ordenación para un ámbito espacial, que generalmente se refiere a un municipio, a un área urbana, o a una zona de escala de barrio. Está relacionada con la arquitectura y la ingeniería civil en la medida en que ordena espacios. Debe asegurar su correcta integración con las infraestructuras y sistemas urbanos. Se necesita un buen conocimiento del medio físico, social y económico que se obtiene a través de análisis según los métodos de la sociología, la demografía, la geografía, la economía y



otras disciplinas. El planeamiento urbanístico es, por tanto, una de las especializaciones de la profesión de urbanista, tradicionalmente practicada en los países en los que no existe como disciplina académica independiente por arquitectos e ingenieros civiles, entre otros profesionales. Muchos de los temas de la planificación urbana se relacionan directamente con la forma de funcionar de esta. La ciudad como sistema debe tener características como son los métodos de transportación, usos industriales, y usos residenciales. A través del tiempo hemos visto como ciudades han perdido función como sistemas urbanos. La razón principal para esto ha sido la homogenización de sectores los cuales son solo para algunos usos específicos privando a la ciudad de usos mixtos. Debemos considerar que la economía es un factor importante en la función de expansión de ciudades. En el pasado una de las principales fuentes económicas era la manufactura en donde esto motivo que el crecimiento de la ciudad se realizara en esta zona para estar cerca de su lugar de trabajo. Al pasar el tiempo la manufactura deja de ser una de las fuentes principales económicas y causa que las personas tiendan a retirarse de estas áreas ya que con los avances tecnológicos y mejores condiciones de transportación se pueden mover para llegar a sus áreas de trabajo. Las políticas creadas también fueron otro factor que afectaron en el desarrollo de las áreas urbanas. Una de estas políticas fue el saneamiento para el control y prevención de enfermedades y el factor cultural de la población. Al pasar del tiempo se reestructura la economía y las funciones de las ciudades y estas se ven afectadas por cambios positivos y negativos. Debido a la globalización de las ciudades se observa que la fuente de la economía lo es la industria de los servicios que desplaza a la manufactura. Esto tiene efecto en la configuración espacial de la ciudad debido a que hay que trabajar con reacomodar los usos de los suelos debido a que la demanda por los mismos es diferente. Los lugares industriales comienzan a estar abandonados.

El cambio a mejores métodos de transportación le han permitido a las personas mudarse a las afueras de las ciudades creando conurbaciones a lo largo de la ciudad (Campbell & Fainstein, 2002b). Esto ha creado que los patrones de crecimiento de la ciudad sean alterados y no necesariamente siguiendo el crecimiento esperado por el diseño original de la ciudad. Como antes mencionado las políticas creadas dentro de la ciudad son una parte esencial para la función de la ciudad. Las políticas permiten ciertos estándares de manejo de los suelos dentro de la ciudad, la expansión del área urbana y en el orden que se debe llevar la misma. No obstante estas políticas pueden cambiar debido a la evolución del entorno. Estas políticas permiten una visión de la imagen que se quiere adquirir de la ciudad.

El enfoque principal de la planificación ambiental es el manejo de recursos necesarios para el uso y disfrute de la ciudad. Es evidente que bajo la planificación ambiental tenemos el tema de ciudades sostenibles o sustentables. El dilema principal del planificador en esta área se conoce como el triangulo del planificador el cual contiene en cada una de sus puntas un factor a considerar; el crecimiento de la economía, justicia social y protección del ambiente (Campbell & Fainstein, 2007b). El llevar a producir un equilibrio entre estos tres factores nos producirá un desarrollo sustentable. De la mano de estos factores hay tres conflictos que debemos considerar. El primero es el conflicto de propiedad y está dirigido a resolver el dilema de la propiedad privada pero con intervención del gobierno para controlar los desarrollos que se llevan en la ciudad. Para tratar de controlar esto se establece las clasificaciones de zonificación donde se establece el uso que se le debe proveer a esos terrenos. El segundo es el conflicto de recursos y está dirigido a la utilización de los recursos como materia prima contra la conservación de los mismos. En esta parte es necesario la creación de políticas para la conservación y manejo de los mismos pero tiene mucha resistencia de la industria. El tercero es el conflicto de desarrollo que

crea un balance entre los dos conflictos anteriores. Con este conflicto tratamos de crear un crecimiento de la economía, alcanzar igualdad social pero protegiendo los recursos naturales (Campbell & Fainstein, 2007c). Esto es precisamente lo que un planificador debe buscar en los procesos de planificación de ciudades, tratar de lograr un equilibrio entre las partes del triangulo brindando la información necesaria y actuando como negociador en el proceso. El problema es que muchas veces el planificador asume una sola posición debido a la complejidad del triangulo y el equilibrio que hay que desarrollar.

En el caso específico del plan que se debe trabajar para buscar alternativas en la utilización de los gases del relleno sanitario de Carolina utilizamos los pasos del proceso de planificación racional según Friedman (1987).

A su vez utilizamos la relación entre planificador y otros profesionales según indicado por Campbell & Fainstein. Se tocara el factor privado, público y el del ciudadano. El proyecto está ubicado en las afueras del área urbana pero el crecimiento del área urbana ha llegado muy cerca de la zona de área de estudio. Esto nos crea el problema de la posible migración de gases hasta otros usos en operación principalmente residencias cercanas. En términos de manejo de recursos se trataran de proteger los mismos ya que al buscar alternativas para la utilización de estos gases que actualmente se destruyen se ayudara a que el consumo de recursos sea menor como es el caso de la energía y por tanto el combustible si finalmente se decide producir energía con los gases.

## **Estudio de casos**

### **1) Relleno Sanitario del Condado de Orange en Florida, Estados Unidos**

El relleno sanitario del Condado de Orange es el más grande que pertenece a un Condado operado en la Florida. En 1998, la División de Desperdicios Sólidos del Condado de Orange

inicio el proyecto del uso del metano de su Relleno Sanitario del Condado que consta de 250 hectáreas recolectándolo y enviándolo al Centro de Energía de Stanton (OUC, *Orlando Utilities Commission* por sus siglas en inglés) para ser utilizado como combustible para generar electricidad. El Condado de Orange y el Centro de Energía de Stanton se combinaron para trabajar juntos con el Programa de Alcance de Recuperación de Metano en Rellenos Sanitarios de la EPA (LMOP, *Landfill Methane Outreach Program*). La labor de LMOP fue muy importante ya que presto información sobre las tecnologías para ayudar a optimizar la eficiencia y la producción y reducir al mínimo los costos del sistema de recuperación de gas (EPA, 2010a).

OUC se involucró por los beneficios potenciales que el proyecto de recuperación de gas de relleno sanitario y conversión a energía le podría representar para los servicios públicos. Basado en esto utilizó el combustible más barato y los incentivos fiscales concedidos a los que promuevan los proyectos para mejorar la viabilidad de las calderas para adaptarlas para quemar biogás. El costo de este proyecto fue de cuatro millones de dólares de fondos federales y los incentivos fiscales permitidos para lograr sustituir combustible fósil por la quema de un combustible más limpio, un recurso energético renovable.

La División de Desperdicios Sólidos del Condado de Orange y varios consultores diseñaron el sistema de recolección de biogás y la tubería de transmisión. La Empresa DTE de Energía de Biomasa, Inc. es la propietaria y opera el sistema de recuperación de biogás a través de un contrato que se hizo con el Condado de Orange por un término de veinte años. De este proyecto se beneficia el Condado de Orange y sus socios, tanto financieramente como protegiendo el medio ambiente. Este proyecto muestra como se puede trabajar una asociación entre empresas privadas y públicas con éxito y proteger el ambiente. Le genera al Condado de Orange alrededor de \$400,000.00 en ingresos por los derechos anualmente y a la misma vez

reduce los olores de los gases del relleno sanitario y proporciona un aire más limpio para la comunidad.

Con el éxito alcanzado por este proyecto, el Condado piensa en la construcción de líneas horizontales de recolección de gas adicionales para añadir en una celda nueva como la fase siguiente del sistema para optimizar la recolección del gas. El proyecto es uno de caldera/turbina de vapor y es co-alimentado con carbón. El proyecto recupera 12.4 megavatios (MW) y los ahorros anuales son de un millón de dólares para OUC. Los socios que trabajan este proyecto son DTE Energía de la Biomasa, el Condado de Orange y OUC.

## **2) Relleno Sanitario Altamonte en Livermore California**

El 2 de noviembre de 2009, la Empresa Waste Management inauguró oficialmente una planta de combustible de alta tecnología que demuestra la viabilidad de la utilización de gas de relleno sanitario (GRS) como combustible de transporte alternativo. Cada día, la planta de procesos de 3 millones de pies cúbicos de biogás, produce 13 mil galones de gas natural licuado (GNL) que es equivalente al combustible de 300 camiones de basura. La planta es una de las mayores plantas de conversión de biogás a gas natural licuado en el mundo y proporcionará 4 millones de galones de GNL por año (EPA, 2010b).

La inauguración del proyecto se hizo después de casi 10 años de investigación y desarrollo entre WM y los socios del proyecto llamado Linde América del Norte. La empresa construyó la planta basado en la tecnología patentada por el Instituto de Investigación de gas. WM y Linde esperaron por el proyecto para validar la tecnología y su impacto ambiental positivo.

El uso de gas natural licuado en camiones de basura de WM reemplaza la necesidad de unos 2.5 millones de galones de diesel al año. Teniendo en cuenta las emisiones de gases de

efecto de invernadero desde la producción hasta el consumo, se emite en la conversión de biogás a gas natural licuado cerca de una séptima parte de las emisiones de efecto de invernadero del combustible diesel, lo que resulta en un transporte de combustible de muy baja emisión de carbono. Además, los camiones de basura alimentados con gas natural licuado emiten mucho menos materia particulada y óxidos de nitrógeno.

El proyecto de 15.5 millones de dólares de California cumple con las iniciativas para avanzar en la biomasa como combustible para el transporte y para reducir las emisiones del estado de gases de efecto de invernadero en un 25% en 2020. Por lo tanto, cuatro agencias estatales se comprometieron con hasta \$ 2.4 millones para realizar el proyecto. Se espera reducir las emisiones de dióxido de carbono en 30,000 toneladas por año.

El proyecto tiene como socio a la *California Energy Commission (CEC)*, *Cornstone Environmental Group, LLC*, *Guild Associates, Inc.*, *Linde, LLC* y *Waste Management, Inc.* El usuario final del gas licuado es *Waste Management* que lo utiliza para la flota de camiones de recogido de basura. La capacidad del relleno sanitario es de 36.8 millones de toneladas de desperdicios y el proyecto produce 2,500 pies cúbicos por minuto (scfm) de gas.

### **3) Relleno Sanitario de Fargo, Dakota del Norte**

El Relleno Sanitario de la Ciudad de Fargo debido a la cercanía de residencias, se enfrentaba a un enorme problema de reducir los olores creados por las operaciones del relleno sanitario. Para ayudar a resolver este problema, la ciudad instaló un sistema de recogido del gas del relleno sanitario y un sistema de quemador (*flare*) para la destrucción. La Empresa Cargill, Inc., la cual es vecina del relleno sanitario, tiene proceso de semillas oleaginosas, reconoció el potencial de energía que podía recuperar del gas del relleno sanitario y se acercó a la ciudad para proponerle la utilización del gas en sus calderas. De esta forma se crea una alianza público-

privada entre la Ciudad de Fargo y la Empresa Cargill para desarrollar un biogás de uso directo para proyectos de energía. Este proyecto energético del biogás genera ingresos para la ciudad de Fargo y reduce los costos de energía, emisiones y la dependencia del gas natural para Cargill. Esto dio paso a que la empresa iniciara una conversión de uso de gas natural al uso de biogás del relleno sanitario y se espera que en los próximos veinte años la empresa reemplace el uso de gas natural por el uso de biogás completamente.

El proyecto fue un esfuerzo exitoso de cooperación entre la Empresa Cargill y la Ciudad de Fargo. La ciudad se encargó del financiamiento de la instalación del sistema de recolección de biogás y el costo de 1.5 kilómetros de tubería. Mientras que la Empresa Cargill se encargó del financiamiento de la instalación de quemadores de doble combustible y su sistema de control. La ciudad recuperará su gasto inicial mediante la venta de biogás y la Empresa Cargill recuperará su gasto de capital en el ahorro de combustible por el uso del biogás en lugar de gas natural. Entre los beneficios de este sistema está que este gasoducto ayudará a reducir las emisiones de olor del relleno sanitario y a la misma vez le generará ingresos a la Ciudad del producto de los desperdicios. Este es un ejemplo claro entre la asociación de la industria y el gobierno para hacer frente a un grave problema con una solución innovadora (EPA, 2010c).

El usuario final del gas es la Empresa Cargill, Inc. que utilizará el gas en sus calderas. Esta empresa es una de productos alimenticios. El relleno sanitario pertenece a la Ciudad de Fargo y tiene una capacidad total de 1.5 millones de toneladas de desperdicios. El proyecto produce 800 pies cúbicos por minutos (scfm) de gas.

#### **4) Relleno Sanitario de Centralia, Washington**

El relleno sanitario de 55 acres localizado en Centralia, Washington, fue operado desde 1958 hasta 1994 y aceptó desperdicios municipales e industriales incluyendo suelos que

contienen bifenilos policlorados (PCB), residuos de pintura, y los residuos de plaguicidas. El problema principal de este relleno sanitario es que más de 12,000 personas que viven dentro de un radio de tres millas utilizan las aguas subterráneas para beber. Además la quebrada cercana es una zona de desove del salmón. En estudios realizados a las aguas subterráneas se determinó que contienen niveles elevados de cloruro, conductividad y metales pesados como manganeso, arsénico y hierro. Una característica de los lixiviados generados en el relleno sanitario es que tienen metales pesados. Esto sugiere que las aguas subterráneas están siendo contaminadas por el relleno sanitario y las personas que ingieran estas aguas contaminadas podrían estar en riesgo (EPA, 2010d).

En 1991, se decretó responsable de la contaminación de las aguas subterráneas al relleno sanitario y se hizo un Decreto de Consentimiento con el Estado para instalar una cubierta protectora temporal sobre el relleno sanitario y asegurar el lugar. En 1994 se cerró el relleno sanitario en virtud del decreto de consentimiento y se instaló una cubierta de 46 acres en el relleno sanitario. Para esto se utilizó un plástico (*liner*) con las especificaciones requeridas. Este sistema de cubierta final reduce en gran medida la cantidad de lixiviados generados por la infiltración de la precipitación a través de rechazar las escorrentías impidiendo que estas ganen acceso hasta donde están los desperdicios. Un monitoreo continuo de las aguas subterráneas fue requerido para poder determinar si eran necesarias medidas adicionales.

Además de la cubierta, se requirió un sistema de recolección de gas permanente debajo de la cubierta, y un sistema de quemado de gases que se instaló junto a la entrada de las instalaciones del relleno sanitario para la destrucción del gas. Este gas es utilizado para la evaporación del lixiviado evitando que este drene hasta las aguas subterráneas. Para controlar el lixiviado se construyeron zanjas alrededor del relleno sanitario que recogía los lixiviados



mezclados con las esorrentías y no le permitían la salida de la propiedad. Además se le exigió un sistema de recogido de lixiviados debajo de la cubierta que lleva lo lleva a tanques de almacenamiento y desde el tanque se lleva al quemador en donde se evapora. También como parte de los requisitos se tiene que monitorear las aguas subterráneas periódicamente. Es un proyecto en sitio que se utiliza para beneficio del mismo relleno sanitario. El relleno sanitario tiene un tamaño de 1.77 millones de toneladas de desperdicios en el lugar. Tiene una producción de 53 pies cúbicos por minutos (scfm) de gas.

##### **5) Relleno Sanitario de Racine, Wisconsin y SC Johnson Waxdale**

La Planta SC Johnson Waxdale utiliza gas de relleno sanitario hace casi 20 años en las calderas. En el 2003 SC Johnson cambio la turbina de 3.2 MW de gas Centauro 40 para el uso de biogás con un sistema de recuperación de calor de *Solar turbines Incorporated*. En el 2004 esta empresa continuó su compromiso con la comunidad al anunciar los planes para su segunda turbina de gas para ser alimentada con gas natural, pero con la capacidad de utilizar el 10% de biogás. Hoy en día, las dos turbinas de suministrar electricidad y la mayor parte del vapor de agua para los 2.2 millones de pies cuadrados de la planta utilizan biogás. SC Johnson consume mucho menos energía eléctrica y gas natural mediante la utilización de biogás del relleno sanitario y la recuperación del calor que de otro modo se perdería en la generación de energía (EPA, 2010e).

Este proyecto pone en relieve lo siguiente: es la primera planta de productos de consumo en el medio oeste que produce una cantidad sustancial de su propia energía a través de tecnologías de combustión limpia, 3.2 MW y 19,000 libras de vapor por hora de turbina, con una eficiencia global del 70%, logrando reducir el 50% en el uso de combustibles fósiles y el 17% de gases de efecto invernadero en un año.

Esta Planta de Waxdale es la más grande de SC Johnson y fue el primer proyecto piloto de la EPA como líder en la iniciativa para el cambio climático. Esta estableció desafíos a las demás corporaciones para hacer reducciones voluntarias de sus emisiones de gases de efecto invernadero. Los cambios en la planta de Waxdale ayudó a SC Johnson en Estados Unidos a reducir sus emisiones de gases de efecto de invernaderos en un 24% entre el 2000 y 2005.

El gas utilizado por SC Johnson proviene del relleno sanitario de Racine Wisconsin. Este tiene una capacidad total de 9.4 millones de toneladas de desperdicios. El gas es utilizado para la cogeneración de calor y electricidad mediante turbinas de gas. El proyecto genera 3.2 megavatios (MW) y 19 millones de unidades térmicas británicas por horas (MMBtu/hr) de gas. Tiene un ahorro de un millón de dólares por año y reduce el uso de las plantas de combustibles fósiles en un 50%.

### **Marco legal**

Las leyes estatales que aplican a esta investigación son principalmente la Ley 416 del 2004 (12 LPRA sec. 8001 et seq.), mejor conocida como la Ley de Política Pública Ambiental que derogó y sustituyó la Ley número 9 (12 LPRA sec. 1121 et seq.) que creó la Junta de Calidad Ambiental en 1970, la Ley de Reducción y Reciclaje de Puerto Rico (12 LPRA sec. 1320 et seq.), la Ley de la Autoridad de Desperdicios Sólidos (12 LPRA sec. 1301 et seq.) y la Ley de Política Pública Energética de Puerto Rico (Ley 82 de 19 de julio de 2010). Entre los Reglamentos que aplican son el Reglamento para el Control de la Contaminación Atmosférica y el Reglamento para el Manejo de los Desperdicios Sólidos No Peligrosos. Entre las federales están la Ley de Conservación y Recuperación de Recursos (RCRA por sus siglas en inglés)(42 USC §6901) del 1976 que regula los desperdicios sólidos, la Ley de Aire Limpio (CAA por sus siglas en inglés)(42 USC §7401) de 1970 con sus enmiendas que regula las emisiones de gases al

ambiente y la Ley de agua potable segura (SDWA por sus siglas en inglés)(42 USC §300f) que establece los límites de contaminantes permitidos a las aguas subterráneas.

#### Ley de Política Pública Ambiental o Ley 416

La “Ley Sobre Política Pública Ambiental” se crea en 1970, siendo un paso de avance para el Estado Libre Asociado de Puerto Rico que sirvió para declarar como su política pública ambiental la utilización de “todos los medios y medidas prácticas con el propósito de alentar y promover el bienestar general, para crear y mantener las condiciones bajo las cuales los seres humanos y la naturaleza puedan existir en armonía productiva y cumplir con las necesidades sociales y económicas y cualesquiera otras que puedan surgir con las presentes y futuras generaciones de puertorriqueños.” Esa legislación se aprobó antes de la primera cumbre mundial de relevancia sobre asuntos ambientales, celebrada en Estocolmo, en 1972, y constituyó el primer y principal esquema estatutario adoptado en Puerto Rico para atender de modo integral los asuntos concretos que se plantean en el país con relación a la administración y protección del ambiente; y de esta forma convirtió a la Junta de Calidad Ambiental en la primera agencia reguladora, en América, dedicada al control de la contaminación y la degradación ambiental.

La misión de la Junta de Calidad Ambiental fue la de proteger la calidad del ambiente, mediante el control de la contaminación del aire, las aguas y los suelos y de la contaminación por ruidos; así como el utilizar todos los medios y medidas prácticas para crear y mantener las condiciones bajo las cuales el hombre y la naturaleza puedan existir en armonía productiva y cumplir con las necesidades sociales y económicas y cualesquiera otras que puedan surgir con las presentes y futuras generaciones de puertorriqueños.

El creciente interés de la ciudadanía en Puerto Rico sobre este tema ha aumentado el nivel de conciencia sobre los aspectos ambientales del desarrollo. No obstante, aun no se han

superado los problemas que representan el que algunos sectores consideren que los principios de protección ambiental y de desarrollo sostenible constituyen restricciones o impedimentos para el desarrollo económico y social. Estas concepciones incorrectas o equivocadas han limitado nuestra capacidad, para detener el creciente deterioro ambiental de ecosistemas críticos y controlar la contaminación, que nos creara una degradación de nuestros recursos naturales y nuestro ambiente.

La Ley 416 (12 L.P.R.A. sec. 8001 et seq.) que derogó y sustituyó la Ley 9, viabilizo y complemento otras facultades y deberes que poseía La Junta de Calidad Ambiental; tales como las siguientes: (1) la planificación y respuesta adecuada a emergencias ambientales; (2) la recolección de información oportuna y autoritaria sobre las condiciones y tendencias en la calidad del medio ambiente tanto actuales como proyectadas, para analizar e interpretar tal información con el fin de determinar si las condiciones y tendencias están interfiriendo o quizás puedan interferir con el logro de la política pública ambiental de Puerto Rico, y recopilar y someter al Gobernador los estudios relacionados a tales condiciones y tendencias; (3) el documentar y definir cambios en el medio ambiente natural, incluyendo los sistemas de plantas y animales, y acumular la información necesaria o conveniente para un análisis continuo de estos cambios o tendencias y una interpretación de sus causas fundamentales; y, (4) adoptar, promulgar, enmendar y derogar reglamentación para establecer un mecanismo destinado al control de la calidad de los datos generados durante el muestreo y análisis de parámetros indicativos de la calidad del ambiente existente o que se genere por una fuente contaminante y que deba someterse en cumplimiento con las normas y requisitos de las reglamentaciones ambientales aplicables, incluyendo pero sin limitarse a: (a) establecer un procedimiento que vaya dirigido a certificar y acreditar aquellos individuos, corporaciones o instituciones públicas o

privadas que generen datos sobre calidad del ambiente en cumplimiento con la reglamentación ambiental; y, (b) mantener un registro de los individuos, corporaciones o instituciones públicas o privadas que generan datos sobre la calidad del ambiente y los desperdicios generados por las fuentes contaminantes, con el fin de garantizar la confiabilidad de dichos datos para agilizar el proceso de validación de datos ante la consideración de la Junta de Calidad Ambiental. Entre sus facultades y deberes también estaban emitir órdenes para recuperar gastos incurridos para corregir efectos adversos a la calidad del ambiente, cobrar y recaudar por emisiones a los dueños u operadores de facilidades con permisos, requerimientos de permisos antes de construir alguna fuente de emisión y control de emisiones al aire.

Para lograr los objetivos expuestos la Ley requiere: (1) efectuar cambios a la estructura organizacional actual de la Junta de Calidad Ambiental, (2) la creación de un banco de datos ambientales digitalizados y la incorporación de la mejor tecnología disponible para la validación y manejo de estos datos; (3) reafirmar su autoridad para la evaluación de acciones y programas gubernamentales que puedan conflagrar con las facultades y responsabilidades delegadas a la misma o dilatar o impedir el cumplimiento con las políticas públicas del Estado Libre Asociado de Puerto Rico sobre el ambiente y su desarrollo sostenible, (4) reafirmar las facultades y responsabilidades delegadas a la Junta de Calidad Ambiental; y, (5) requerir el establecimiento de acuerdos interagenciales 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.

La Ley establece que es responsabilidad de la Junta de Calidad Ambiental velar por la calidad del aire y establecer mediante reglamentos los requisitos que sean necesarios para el

control de emisiones a la atmósfera y para la prevención, disminución o control del calentamiento global y de daños al ambiente y a los recursos naturales. Para esto crea un programa de certificación de lectores de opacidad en donde deben certificar individuos para determinar la opacidad de fuentes estacionarias a tenor con la Ley de Aire Limpio. Establece también el programa de permisos de operación de aire bajo el Título V de la Ley para requerir permisos a dueños u operadores de fuentes de contaminantes atmosféricos reglamentados. Es bajo los requisitos del Título V de la Ley de Aire Limpio que se regula el sistema de recolección y destrucción de gases de Carolina.

Ley número 70 de 23 de junio de 1978 (12 LPRA sec. 1301)

Esta Ley se conoce como la Ley de la Autoridad de Desperdicios Sólidos y se aprueba para crear la agencia. El propósito de la misma era que con los constantes problemas que existían en Puerto Rico relacionados al manejo de los desperdicios sólidos una agencia gubernamental fuera responsable de velar por proteger y mejorar las condiciones del medio ambiente y afrontar la creciente demanda por mayores controles y facilidades para el manejo de los desperdicios sólidos. Entre sus facultades estaba planificar, financiar y operar en todo Puerto Rico todas las facilidades de desperdicios sólidos, tener completo control de las facilidades, designar un plan regional para el manejo de los desperdicios sólidos y establecer tarifas. Esta agencia se crea para que sea responsable del cumplimiento con las leyes aplicables a las facilidades de desperdicios sólidos.

En término de calidad de aire la Autoridad de Desperdicios Sólidos debe velar porque se cumplan con las disposiciones de Ley aplicables a los rellenos sanitarios de la Ley de Aire Limpio.

Ley de Reciclaje en Puerto Rico (12 LPRA sec. 1320 et seq.)

La Ley para la Reducción y Reciclaje de los Desperdicios Sólidos en Puerto Rico o Ley Núm. 70 de 18 de septiembre de 1992, establece que será política pública del gobierno de Puerto Rico el desarrollo e implantación de estrategias económicamente viables y ambientalmente seguras que resulten en la disminución del volumen de desperdicios sólidos que requerirá disposición final. La Ley Núm. 13 de 20 de enero de 1995, enmienda la Ley Núm. 70, a los fines de ampliar el Programa para la Reducción y el Reciclaje de Desperdicios Sólidos en Puerto Rico; crear nuevos incentivos económicos para promover el reciclaje; especificar las responsabilidades de las agencias y municipios para desarrollar el reciclaje; y promover la reducción de desperdicios sólidos, la reutilización y separación en la fuente de materiales reciclables. En esta enmienda se incluye al sector privado a participar en la meta de reciclar un 35% de los residuos sólidos que se generan, mediante la implantación mandatoria de planes de reciclaje. También se persigue mayor participación de los municipios y de igual forma, se amplían las responsabilidades, bajo esta Ley, al hacer compulsorio la radicación de informes de logros y dificultades en la implantación de los Planes de Reciclaje.

Ley de Política Pública Energética (Ley 82 de 19 de julio de 2010)

Esta Ley es conocida como la Ley de Política Pública de Diversificación Energética por Medio de la Energía Renovable Sostenible y Alterna en Puerto Rico o Ley 82 de 19 de julio de 2010. Se busca con la Ley establecer normas para fomentar la generación de energía renovable, crea la Comisión de Energía Renovable de Puerto Rico y aclara los deberes de la Administración de Asuntos Energéticos. Se busca bajar la dependencia de fuentes de energía derivados de combustibles fósiles al diversificar fuentes de electricidad y la infraestructura de tecnología energética.

La utilización del gas del relleno sanitario es una fuente alterna a los derivados de combustibles fósiles y puede ser un sustituto a este cumpliendo con la diversificación energética señalada en esta Ley.

#### Reglamento para el Control de la Contaminación Atmosférica

Es el reglamento que crea la Junta de Calidad Ambiental con el propósito de proteger la calidad natural del aire y para prevenir, eliminar y controlar la contaminación atmosférica. En este se establecen normas y requisitos para la prevención, eliminación y control de la contaminación del aire. El último reglamento aprobado es el de 28 de agosto de 1995 y se le realizaron enmiendas el 21 de marzo de 2001 para cumplir con los requisitos de la Ley de Aire Limpio que aplican a sistemas de rellenos sanitarios. En este reglamento están los requisitos necesarios para un permiso Título V en cumplimiento con la Ley de Aire Limpio.

#### Reglamento para el Manejo de los Desperdicios Sólidos No Peligrosos

Es el reglamento que crea la Junta de Calidad Ambiental con el propósito de proteger la calidad natural del aire, agua y terreno y para prevenir, eliminar y controlar la contaminación por parte de los desperdicios sólidos no peligrosos. En éste se establecen normas y requisitos para la prevención, eliminación y control del manejo y operación de facilidades de desperdicios sólidos no peligrosos; facilidades que generen, transportan o dispongan desperdicios biomédicos; manejo de composta e implementar disposiciones para el manejo de aceite usado y neumáticos desechados. Este es el Reglamento que regula los requisitos de cumplimiento con el subtítulo D de RCRA y la última versión aprobada del reglamento es de 14 de noviembre de 1997.

#### Ley de Conservación y Recuperación de Recursos (RCRA) (42 USC § 6901)

La Ley de Conservación y Recuperación de Recursos (RCRA) o Ley número 94-580 de 21 de octubre de 1976 y es la principal ley federal en los Estados Unidos que rige la disposición



de desperdicios sólidos y desperdicios peligrosos. El Congreso aprobó la Ley RCRA el 21 de octubre de 1976 al analizar los crecientes problemas de la nación frente al creciente volumen de desperdicios municipales e industriales. RCRA, que modificó la Ley de Disposición de Residuos Sólidos de 1965, establece metas nacionales para: la protección de la salud humana y el medio ambiente de los riesgos potenciales que pueda causar la eliminación de desperdicios, conservar la energía y los recursos, reducir la cantidad de desperdicios generados, y garantizar que los desperdicios sean manejados de manera ambientalmente segura.

Para alcanzar estos objetivos, la RCRA estableció tres programas distintos, pero relacionados entre sí:

- 1) Desperdicios Sólidos según RCRA subtítulo D (40 CFR 240-258), que alienta a los estados para desarrollar planes integrales para el manejo de los desperdicios sólidos no peligrosos industriales y desperdicios sólidos residenciales, establece criterios para los rellenos sanitarios de desperdicios sólidos municipales y otras instalaciones de desperdicios sólidos, y prohíbe el vertido a campo abierto de desperdicios sólidos (JCA, 1997).
- 2) Desperdicios Peligrosos según RCRA subtítulo C (40 CFR 260-279), establece un sistema de control de desperdicios peligrosos desde el momento en que se genera el desperdicio peligroso hasta su disposición final (JCA, 1998).
- 3) Tanques de Almacenamiento Soterrado (UST según sus siglas en inglés) según RCRA subtítulo I (40 CFR 280), que regula los tanques de almacenamiento subterráneo que contengan sustancias peligrosas y productos derivados del petróleo (JCA, 1990).

Bajo la Ley RCRA está prohibido todo vertido de desperdicios a campo abierto, promueve la reducción de las fuentes de generación de desperdicios y el reciclaje de los mismos, y promueve el manejo seguro de desperdicios municipales. RCRA también ordena un estricto

control sobre el tratamiento, almacenamiento y eliminación de desperdicios peligrosos. RCRA fue modificado y fortalecido por el Congreso en noviembre de 1984, con el paso de las Enmiendas Federal para los desperdicios sólidos peligrosos (HSWA por sus siglas en ingles). Estas enmiendas a la Ley requieren la eliminación gradual de la disposición de desperdicios peligrosos en el terreno. Algunos de los otros mandatos de la Ley incluyen el aumento de la autoridad a la EPA para la aplicación de la Ley, normas de manejo de desperdicios peligrosos más estrictas, y un amplio programa para los tanques de almacenamiento soterrado. Las facultades de la Ley RCRA son para trabajar con facilidades activas o en operación y no se ocupa de lugares abandonados o sitios históricos que son atendidos por el programa conocido comúnmente como Superfondo (CERCLA por sus siglas en inglés).

Ley de Aire Limpio (CAA por sus siglas en inglés) (42 USC § 7401)

La Ley de Aire Limpio fue aprobada en el 1970 y se realizaron enmiendas en el 1976 y en el 1990 y su aplicación le corresponde la Agencia de Protección Ambiental (EPA). Esta Ley se crea para trabajar con detener la contaminación al aire. Como primer paso se creó el Concilio Nacional de Calidad del Aire y el Ambiente (NAAQS). La Ley requería que la EPA identificara y estableciera las normas para los contaminantes identificados como perjudiciales a la salud humana y al medio ambiente. Los primeros contaminantes identificados fueron: monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, ozono, dióxido de azufre, partículas de menor tamaño aerodinámico menor o igual a 10 micrómetros (PM-10) y plomo.

Como parte de la Ley se requería eliminar el plomo de la gasolina para mediados de la década de los 80. Las disposiciones de la Ley exigen que se cumplan cuatro etapas: identificar los contaminantes, demostrar cuales son causantes de que efecto en la salud o el ambiente, para establecer las normas ambientales razonables, determinar las fuentes de los contaminantes y

preparar y poner en práctica las medidas de control. Conforme se obtiene más información sobre los efectos nocivos de los contaminantes se imponen normas más rigurosas y se establecen determinadas estrategias de control. La norma básica de cada contaminante se fundamenta en el mayor nivel de tolerancia de los seres humanos sin efectos perjudiciales. La enmienda de Ley de 1976 estaba dirigida a empresas que no pudieran cumplir con estas regulaciones. La de 1990 extiende las secciones de la Reglamentación a 189 contaminantes atmosféricos tóxicos.

Las estrategias de control básicas consistían en regular los contaminantes de manera que se mantuvieran por debajo de los niveles señalados por las normas básicas establecidas. Para lograr esto era necesario establecer equipos de control específico. Las empresas eran reguladas por los estados y se hacía difícil poder lograr vigilarlos a todos para que cumplieran con los requisitos.

Para resolver este incumplimiento, la Ley de Aire Limpio de 1990 se ocupó de ciertos contaminantes y exige con más firmeza que se sigan las normas imponiendo sanciones. Como en la ley anterior, los estados tienen la gran responsabilidad de hacer cumplir las disposiciones de la ley de 1990. Cada uno debe preparar un plan estatal de implantación que pasa a discusión pública antes de ser sometido a la EPA para que lo apruebe. Este plan está destinado a reducir las emisiones de los contaminantes señalados por las normas nacionales de emisiones de contaminantes peligrosos que no se han logrado controlar. Un cambio fundamental es un trámite de solicitud de permiso. Los contaminadores deben identificar los contaminantes que emiten, sus cantidades y las medidas que han tomado para reducirlas. El costo del trámite provee de fondos a los estados para llevar a cabo sus actividades de control de la contaminación. La nueva ley es también más flexible que el planteamiento de orden y control de la anterior, pues permite que los contaminadores elijan el medio más económico de lograr los objetivos. Además, utiliza un

sistema de salida para distribuir la contaminación entre diferentes empresas. Sin duda alguna, las medidas tomadas para reducir la contaminación del aire tienen un costo económico.

La Ley de Aire Limpio (40 CFR 60) se aplicó a los rellenos sanitarios en 1996 para aquellos rellenos sanitarios que excedan los requisitos de:

- Haber aceptado desperdicios desde 8 de noviembre de 1987 o tener espacio dentro de la capacidad de diseño para depositar más desperdicios
- Capacidad de diseño igual o mayor de 2.5 millones de mega gramos y 2.5 millones de metros cúbicos
- Una tasa de emisión igual o mayor de 50 mega gramos por año de compuestos orgánicos no metano (CONM).

Esto se hace debido a que se identificó que los rellenos sanitarios eran una fuente de contaminación al ambiente que no se estaba regulando. Además son una fuente de contaminación por los gases de invernadero que causan daño a la capa de ozono.

Ley de Agua Potable Segura (SDWA) (42 USC § 300f)

La Ley de agua potable segura (SDWA, por sus siglas en inglés), aprobada en 1974 y enmendada en 1986 y en 1996, le otorga a la EPA la autoridad para establecer estándares de agua potable. Los estándares de agua potable son regulaciones establecidas por la EPA para controlar el nivel de contaminantes en el agua potable de la nación. Estos estándares son parte del enfoque de barreras múltiples del SDWA para asegurar la protección del agua potable e incluye: el análisis y protección de las fuentes de agua, la protección de los pozos y sistema de captación, el tratamiento por medio de operadores cualificados y el control de la integridad de sistemas de distribución y de la información al público sobre la calidad del agua que beben. Con la contribución de la EPA, de los estados, de los servicios públicos de agua potable, de las

comunidades y los ciudadanos, estas barreras múltiples aseguran que el agua potable en los Estados Unidos y territorios sea segura para beber. En la mayoría de los casos, la EPA delega a los estados la responsabilidad referente a la implementación de estos estándares.

Existen dos categorías de estándares del agua potable:

El estándar primario son los estándares aplicables legalmente a los sistemas públicos de agua. Los estándares primarios protegen la calidad del agua potable mediante la limitación de los niveles de contaminantes específicos que puedan afectar negativamente a la salud pública y que se sabe que existen o pueden existir en el agua. Estos estándares están relacionados con los niveles máximos de contaminantes o con las técnicas de tratamiento.

El estándar secundario es una guía para informar sobre los contaminantes que pueden producir efectos estéticos, como decoloración de la piel o dentadura, o dificultades de sabor, olor y color en el agua potable. La EPA recomienda los estándares secundarios a los sistemas de agua pero no los obliga a cumplir con ellos. Sin embargo, los estados pueden adoptarlos como estándares obligatorios. Esta información se centra en estándares nacionales primarios.

Estos estándares son los que aplican a los muestreos de aguas subterráneas en los rellenos sanitarios y se debe cumplir con estar por debajo de los niveles máximos de contaminantes que establece el estándar primario. Los gases del relleno sanitario pueden emigrar hasta el acuífero donde se encuentra el agua subterránea contaminándolo con compuestos volátiles por eso se requiere realizar muestras de volátiles a las aguas subterráneas y comparar los resultados con los niveles máximos permitidos de contaminantes para agua potable segura.

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA**

El propósito de este trabajo es desarrollar un plan para la utilización del gas generado por el relleno sanitario de Carolina para optimizar el sistema pero utilizando una tecnología viable. Este sistema de recolección de gases del relleno sanitario de Carolina lleva funcionando hace seis años y solo se destruye el gas. Aunque se cumple con la Reglamentación estipulada en la Ley de Aire Limpio, hay formas de utilizar este gas para beneficio de las facilidades que se encuentran en el relleno sanitario o para beneficio del municipio de Carolina. El periodo de tiempo que utilizamos para este estudio fue desde enero de 2006 hasta febrero de 2011 que comprenden 62 meses. A través de este estudio realizamos una evaluación del sistema para identificar posibles alternativas para mejorar la calidad y condiciones del gas generado y ver de qué forma se puede aumentar la generación de gas, de ser posible, ya que esto nos daría mejores alternativas para utilización del mismo. Esto nos ayudara a analizar diferentes métodos para la utilización del gas y buscaremos las alternativas que sean ambientalmente segura y económicas. Basado en esto prepararemos un plan para la utilización del gas con la tecnología seleccionada.

#### **Área de estudio**

Los terrenos donde ubica el SRS de Carolina es una parcela de 147.86 cuerdas localizada en el barrio Hoyo Mulas carretera PR-874 final mejor conocida como Avenida Monserrate. Desde el 2004 este relleno sanitario cuenta con un sistema de extracción de gases activo que se encuentra en operación. El mismo fue instalado ya que se verificó y comprobó que alcanzaba los requisitos para la instalación de un sistema de recolección de gases. A base de estos hallazgos se procedió a instalar el sistema de recolección de gases el cual consta de 40 pozos verticales de

extracción de gases interconectados a un quemador y tuberías HDPE expuestas (Figura 2). La cantidad de pozos se determinó por un estudio de ingeniería en donde se utilizó un radio de influencia de 44 metros para esta facilidad. Los 40 pozos fueron distribuidos por todo el relleno sanitario en donde se había depositado desperdicios sólidos. El gas recuperado a través de las tuberías es llevado hasta la estación del incinerador en donde se destruye y cumpliendo así con el objetivo de éste sistema que es evitar la emisión de gases contaminantes a la atmósfera, cumpliendo así con los criterios del reglamento para el control de la contaminación atmosférica de la JCA y la agencia federal EPA.

### **Objetivos**

- 1. Evaluar las condiciones existentes del sistema de recolección de gases del relleno sanitario de Carolina y de las facilidades en general para establecer las estrategias para optimizar el sistema.**
- 2. Analizar las alternativas de uso del gas generado por el relleno sanitario para proponer un uso económicamente viable.**
- 3. Elaborar un plan para la implantación de la tecnología seleccionada.**

### **Fuente de datos**

Los datos obtenidos en este proyecto son los datos tomados de los muestreos que se realizan mensualmente en el relleno sanitario de Carolina por los empleados del proyecto para el sistema de gases. Tomamos los datos correspondientes a los muestreos desde enero de 2006 hasta febrero de 2011. Estos datos son los muestreos realizados al quemador y en cada pozo independiente en donde el técnico de gases realizó medidas de metano, bióxido de carbono, oxígeno, balance, temperatura, presión y flujo. Los datos fueron obtenidos con el equipo el GEM 500 o con el GEM 2000 que es la nueva versión. Este es un instrumento diseñado para monitorear los gases de los rellenos sanitarios. Con este instrumento el técnico registró las concentraciones de metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), oxígeno (O<sub>2</sub>) y balance (generalmente nitrógeno) en un pozo de extracción de gas. También calcula el flujo del gas, la

temperatura, presiones y los límites de explosividad. Es un monitor portátil que utiliza un analizador infrarrojo de gases de auto compensación, una fuente de alimentación recargable para el uso diario, y una bomba capaz de extraer una muestra de gas de hasta 70 pulgadas de vacío.

### **Diseño metodológico**

1. Realizamos una inspección completa al relleno sanitario de Carolina para conocer la situación actual en que se encontraba el mismo. Para esto utilizamos el formato de inspección preparado por la Junta de Calidad Ambiental. Evaluamos las condiciones físicas y operacionales existentes del relleno sanitario. Obtuvimos los datos de visitas de campo realizadas. Recuperamos toda la información posible de estudios realizados, mapas, información geográfica y datos técnicos a través del municipio de Carolina, el operador del relleno sanitario y de las Oficinas de Gobierno Central como Junta de Calidad Ambiental y Autoridad de Desperdicios Sólidos entre otras.
2. Realizamos una revisión a los cálculos de emisión utilizados para escoger el diseño instalado en la facilidad y los cálculos de emisiones anuales. Para esto se utilizamos las guías de cómputos y el programa de realizar cálculos provistos por EPA llamado *Landgem*. Estas formulas se encuentran en las Enmiendas al Reglamento para el Control de la Contaminación Atmosférica de la Junta de Calidad Ambiental en la Regla 704.
3. Luego de ver el diseño utilizado para la instalación de pozos revisamos el diseño instalado y he hicimos un análisis para determinar si se podía mejorar en algún aspecto. Tratamos de analizar los radios de influencia utilizados y los comparamos con los permitidos o recomendados por EPA en otros casos.
4. Realizamos una inspección al sistema de gases para conocer las condiciones actuales del mismo. Utilizamos el equipo SEM 500 para monitorear escapes de gases superficiales y



realizamos una inspección visual a todo el sistema. El SEM 500 es un equipo compacto, basado en un microprocesador para monitorear el aire sobre la superficie del relleno sanitario para detectar las emisiones del metano. Es un detector de ionización de llamas que cuenta con un medidor que tiene una pantalla de visualización que permite que el técnico de campo lleve el instrumento en una mochila de espalda ya que en la pantalla del medidor puede ver las lecturas. Este medidor debe ubicarse a un máximo de cuatro pulgadas del suelo para realizar el muestreo y se puede caminar con el instrumento a la vez que se van tomando las lecturas utilizando el equipo eficientemente.

5. Hicimos recomendaciones para mejorar las condiciones del sistema al identificar algunas áreas que podrían mejorarse en el sistema de gases.
6. Conseguimos copia de los muestreos realizados en los últimos 62 meses con el instrumento GEM 2000 a los pozos y la data de gases en el quemador y realizamos un análisis de los mismos. Efectuamos un análisis del promedio, mediana y desviación estándar de los resultados de los muestreos para conocer la calidad del gas.
7. Luego de que analizamos los resultados de los muestreos de gases e hicimos recomendaciones para mejorar el sistema, ya que conocemos las cantidades aproximadas de gases que se generaron, entonces estudiamos tres posibles alternativas para el uso del gas generado.
8. Recopilamos información sobre los costos de las diferentes alternativas para el uso del gas y la información que sea ambientalmente segura para cada alternativa. Esta información nos ayudó en la recomendación final de la alternativa o alternativas costo efectivas.

9. Preparamos un Plan para recomendar la mejor alternativa seleccionada que resulte viable para el uso del gas.

### **Técnicas de análisis**

Analizamos los datos registrados en el incinerador de gases (*flare*) mediante el cálculo del promedio, la mediana y la desviación estándar de los datos del muestreo realizados en el periodo de enero de 2006 hasta febrero de 2011 y los comparamos con los datos calculados por *landgem*.

*Landgem* es un *software* relativamente simple que provee la Agencia de Protección Ambiental para estimar las emisiones de los gases generados en rellenos sanitarios. Esto se hace por una ecuación de descomposición de primer orden para la cuantificación de la tasa de emisiones de la descomposición de los desperdicios en los rellenos sanitarios.

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS DEL PROBLEMA

El SRS de Carolina cuenta con un sistema de recolección de gases activo que se encuentra en operación desde el 2004. Este sistema se instaló ya que mediante un estudio realizado en el sistema de relleno sanitario (SRS) se comprobó que alcanzaba los requisitos para la instalación de un sistema de recolección de gases. En el estudio realizado se encontró que el SRS contaba con una capacidad de diseño igual a 2.5 millones de metros cúbicos (m<sup>3</sup>) y una tasa de emisión igual a 50 mega gramos de compuestos orgánicos, además de que comenzó a operar antes de 1987 y continua operando. A base de estos hallazgos el municipio procede a contratar una empresa para la instalación del sistema de recolección y destrucción de gases. Estos gases son recogidos y dirigidos mediante tuberías a un incinerador donde se procede a destruir los gases. La destrucción del gas representa una pérdida significativa de energía y una falta de responsabilidad ambiental y operacional de parte de los dueños y operadores según Gongaware, Barclay, Barclay y Skrzypkowski (2004). Estos gases pueden ser utilizados para necesidades municipales tales como producción de energía, incineración de animales, la falta de combustible para camiones y en su lugar los destruyen.

Realizamos una inspección al relleno sanitario para poder ver en las condiciones en que se encuentra. Este relleno sanitario opera en condiciones satisfactorias. Dentro de los hallazgos pudimos observar que tienen control de entrada ya que cuenta con guardia las 24 horas. La facilidad esta verjada y al llegar a la misma los camiones pasan por la estación de pesaje donde se registran y por un sistema computadorizado se lleva record del tipo de desperdicios y el peso del mismo. Luego de eso el camión pasa al área dependiendo el tipo de desperdicio que

trae. Las áreas están rotuladas por lo que no debe haber problemas para llegar a las diferentes áreas. En el área de tiro un empleado realiza inspecciones a los desperdicios que llegan. No hay presencia de rescatadores ni de vectores en la facilidad. Tienen tanques de almacenaje de lixiviados y un sistema de recolección y destrucción de gases. Poseen pozos de monitoria de aguas subterráneas y estación para monitoreo de gases explosivos y para toma de muestras de aguas de escorrentías. Los desperdicios son compactados y al final del día quedan tapados en su totalidad con seis pulgadas de relleno. Tienen un área de almacenaje y trituración de desperdicios vegetativos. En la parte central de la facilidad tienen un área para la preparación de composta en donde se puede observar las pilas que están en proceso. El área de almacenaje de chatarra y material voluminoso es limpiada y trabajada diariamente y el material es transportado a las facilidades de Salinas Recycling al tener cantidades suficiente. También cuentan con la planta de reciclaje y embalaje en donde llega el material reciclable y se procesa para separarlo por clasificación del material. El material domestico también se pasa por la planta de reciclaje donde se procesa para recuperar material reciclable. Los desperdicios no reusables son embalados y son llevados al área de tiro. El material reciclable luego de separado es embalado y almacenado en vagones para su posterior venta. En términos de permisos los mismos están vigentes y cuentan con permiso de operación de la facilidad, plan CES, permiso Título V, permiso de inyección subterránea y NPDES. El relleno sanitario cuenta con 23 cuerdas cerradas en la cual se le aplico una capa de arcilla y *topsoil* según requerida por Ley en cumplimiento con el subtítulo D y se le da mantenimiento a las mismas según los requisitos de post cierre del reglamento. La celda actual que se utiliza para el depósito de desperdicios sólidos que es de seis cuerdas tiene un revestimiento compuesto según los requisitos del subtítulo D de RCRA. La

celda utilizada anteriormente que era de una cuerda también contaba con un revestimiento compuesto según requerido por la reglamentación.

Los cálculos de emisión fueron revisados desde el 2003 hasta el 2010 y todos fueron realizados utilizando el programa *LandGem* provisto por la EPA. Los datos de cantidad de desperdicios recibidos, la cantidad de camiones registrados, la cantidad de viajes del camión de agua y las horas de uso de la planta eléctrica fueron datos obtenidos en la facilidad. Luego de ver los cálculos y las formulas utilizadas concluimos que los mismos están bien. Revisamos el plano preparado para la instalación de los pozos de extracción de gases y nos percatamos que el radio de influencia utilizado es de 44 metros según el reporte de diseño básico.

Una inspección a todo el sistema de recolección de gases demostró que algunas mangas flexibles deben ser reemplazadas ya que están en mal estado, ya sea rotas o agrietadas, algunas tuberías se encuentran rotas posiblemente por la maquina taladora al momento de cortar el pasto, algunos pozos tienen acumulación de agua que impiden el paso del gas. Se debe dar mantenimiento más frecuente a las áreas para impedir que el pasto cubra las líneas.

Para mejoramiento del sistema es necesario que se realice una inspección diaria al sistema para poder identificar problemas de roturas a mangas y demás piezas que deben ser reemplazadas. Mantener un inventario más amplio de piezas de reemplazo para cambiarlas tan pronto se dañan. Mantener el área de las tuberías limpias para evitar que la taladora rompa las tuberías. El radio de influencia utilizado si lo comparamos con el recomendado por EPA en el caso de SRS Toa Baja (30 metros) es demasiado grande por lo que se debe instalar pozos adicionales para recoger más gas ya que el porcentaje de gas que se recupera para quemarlo es muy bajo comparado con lo que se genera. Se recomienda que el radio de influencia no sea mayor de 30 metros. Para mejorar el sistema sería recomendable añadir más pozos y sustituir el

pozo que se quemó (CARWH029) y no ha sido reemplazado; y el reemplazo de los pozos CARWH016, CARWH005, CARWH036 y CARWH024 que no han funcionado durante más del 90% del tiempo estudiado. Es necesario realizar el cierre de aquellas áreas que han completado su vida útil para minimizar el escape del gas.

Al realizar una comparación de generación de gas con los demás tres SRS en Puerto Rico que tienen sistema de gases nos percatamos que el SRS de Carolina es el que menos gases está destruyendo en su quemador (Tabla 1). Además la cantidad de pozos que mantienen cerrados generalmente porque el nivel de oxígeno está por encima de 5% es demasiado alto. El pozo CARWH016 estuvo cerrado durante 58 meses de los 62 estudiados. El pozo CARWH005 estuvo cerrado 59 meses. El pozo CARWH036 estuvo cerrado 56 meses y el pozo CARWH024 estuvo cerrado 61 meses. Según el reglamento estos pozos se deben poner en funcionamiento en un término no mayor de diez días. En las tablas del 2 al 7 se puede observar que el porcentaje de flujo de gas destruido en todos los años estudiados que corresponde desde 2006 hasta 2011 es menos de 40 % del gas generado según los cálculos de emisiones (Tabla 8). También pudimos observar que el quemador trabajó por encima del valor de la prueba de funcionamiento por lo que se debe realizar una prueba de funcionamiento nueva para subir el valor. Además la cantidad de gas que se está destruyendo está por debajo del 40% del generado si los comparamos con los cálculos de *LandGem*.

Obtuvimos los resultados de los muestreos realizados en los pozos desde enero de 2006 hasta febrero de 2011 para un total de 62 meses. Tabulamos los datos de cada pozo individual para ver el comportamiento por pozo y poder hacer un análisis específico por pozo. Se calculó el promedio de porcentajes de metano, bióxido de carbono, oxígeno, balance, temperatura, presión y flujo de cada pozo (Tabla 9). De la data obtenida podemos observar que el pozo CARWH029 se

quemado y nunca se reemplazo. Este pozo se quemó antes del 2006 y por tanto no tenemos datos para el análisis. De los restantes 39 pozos al realizar un análisis de los promedios de ellos podemos apreciar que el 50% de los pozos estuvo cerrado o no funcionó por estar desconectado en la mitad del tiempo analizado. En cuanto al metano generado el promedio de 26 de ellos es menor de 30%. Al analizar el oxígeno nos percatamos que 16 pozos tienen promedio de más de 5%. Estos resultados reflejan que la mayoría de los pozos no han estado funcionando adecuadamente para la extracción del gas necesario en el relleno sanitario.

Para mejorar el sistema es necesario que todos los pozos estén operando adecuadamente para que generen la cantidad de gas esperado. Todos los pozos que dejen de operar deben ser reemplazados inmediatamente como el caso del CARWH029 y los pozos CARWH016, CARWH005, CARWH036 y CARWH024 que apenas funcionaron en el periodo de estudio (Tabla 10). Los pozos que quedan deben ser monitoreados frecuentemente y verificar si tienen alguna obstrucción interna ya que algunos en 62 meses de operación estuvieron inoperantes por la mitad del tiempo. Recomendamos instalar pozos adicionales ya que el radio de influencia utilizado es muy grande. Se utilizó un radio de influencia de 44 metros y lo recomendado por EPA es 30 metros máximo. Además, si observamos el promedio, la mediana y la desviación estándar de los datos registrados en el incinerador nos percatamos que las lecturas están variando demasiado con desviaciones de más de 50 cfm para el flujo y más de 50 °F para la temperatura llevando las lecturas en ocasiones por debajo y en otras por encima de las lecturas registradas en la prueba de funcionamiento (Tablas 11-13). Es necesario realizar una prueba de funcionamiento nueva para aumentar el flujo del gas que se destruye y de esa forma subir el porcentaje de gas que se destruye con relación al que se genera.

Las razones principales para el uso del gas del relleno sanitario son variables y podemos señalar entre las más comunes el cumplimiento ambiental, ventajas económicas, mercadeo y relaciones públicas, y salud ocupacional (Gordon, Burdelski & Cannon, 2003). Los desperdicios sólidos en un relleno sanitario después de cerrado continúan su proceso de descomposición y por tanto se siguen generando grandes cantidades de lixiviados y gases que pudiesen representar un riesgo al ambiente (Bilitewski, 1994). Hay estudios que nos demuestran que es más ventajoso tener un SRS grande que genere suficientes gases para generar energía en lugar de SRS pequeños a pesar de lo que podría representar la reducción en transportación en SRS pequeños (Wanichpongpan & Gheewala, 2007). Esto es debido a que los SRS producirán más energía y eso se convierte en más ahorros económicos y más beneficios ambientales. En el caso específico del SRS de Carolina este se considera una facilidad pequeña ya que recibe alrededor de 350 toneladas diarias pero solo 290 toneladas diarias llegan al área de tiro.



## CAPÍTULO V

### ALTERNATIVAS, ESTRATEGIAS Y PLAN DE ACCIÓN

Luego de realizar un análisis del funcionamiento del sistema de gases y como el mismo podría mejorar seleccionamos tres alternativas para el uso del gas del relleno sanitario de Carolina. Para la selección de las tres alternativas es necesario considerar que este relleno sanitario genera alrededor de 386 scfm y que el porcentaje de gas metano es de 32%. Realizamos un análisis de las tres alternativas posibles tomando en cuenta los criterios ambientales, económicos, capacidad de operación y cantidad de gas generado para seleccionar la mejor alternativa. A continuación se describen las tres alternativas para el uso del gas recolectado en el relleno sanitario de Carolina.

#### **Alternativa 1. Sistema de Cremación de Animales**

Los animales domésticos son parte integral de la familia por lo que se pretende que estén bien cuidados y una vez llegan al final de su vida darle un proceso de disposición adecuada. En Puerto Rico los animales domésticos se han convertido en un problema para los municipios ya que los mismos son abandonados en la calle por gente que luego de que los adoptan no los quieren y los abandonan. Según el documental de cine titulado 100,000 debe haber más de 100,000 animales realengos o abandonados en las calles de Puerto Rico. Esto le crea un problema a los municipios responsables que tienen que proveer refugios aceptables y facilidades para su disposición cuando mueren. . Luego de que son recogidos y se tratan medicamente por un veterinario en los refugios mayormente municipales, se presentan problemas de los animales enfermos que no tienen formas de salvarlos y mueren. Además el problema de sobrepoblación obliga a los refugios a tomar

decisiones referente a qué hacer con los animales que llevan mucho tiempo ya que necesitan espacio para los demás animales que siguen llegando.

El municipio de Carolina tiene una división que se dedica al control de animales. En esta división se reciben animales abandonados que constan mayormente de perros y gatos. Estos animales son tratados medicamente por un veterinario y se tratan de dar en adopción pero la cantidad que llega es alta y algunos están enfermos, la solución es ponerlos a dormir. Una vez los perros y gatos están muertos hay que disponer de ellos y uno de los métodos es la incineración por lo que el municipio debe pagar para el recogido y disposición de los animales muertos. El municipio paga alrededor de \$ 6,600.00 mensual para la disposición de los mismos.

La incineración de nuestros animales es una costumbre que va en crecimiento y surgió como una alternativa sanitaria y ambientalmente segura debido a la gran cantidad de mascotas que fallecían en clínicas veterinarias y en las calles de nuestro país. La norma anterior era que las personas los enterraban en sus patios pero con los espacios tan reducidos hoy en día la gente prefiere la cremación.

Existen equipos de cremación compactos que utilizan el gas del relleno sanitario. El modelo C1000P de Crawford-Emcotek con una capacidad de 175 lbs/hr y una carga de 600 lbs. por cremación es un equipo que bien podría utilizarse en Carolina. El requerimiento de gas es de solo 2,000,000 Btu/hrs que equivale a 75 scfm del gas generado en el SRS. El incinerador tiene una válvula reguladora de flujo que es la que controla la cantidad de gas que entra al equipo. El mismo tiene sensores de opacidad. Es un equipo ya fabricado que solo hay que construir una base de cemento para instalarlo. Se requiere un estudio de suelo geotécnico antes de instalarlo para estar seguro que el

terreno puede soportar el peso 24,500 lbs. Además se tiene que tomar en cuenta el peso de la base de cemento. Sus dimensiones son de 14 pies y 5 pulgadas de largo y 6 pies con 5 pulgadas de ancho y su alto es de 8 pies con 8 pulgadas. La cámara principal tiene una capacidad de 65.37 pies cúbicos y en esta cámara es donde se incineran los animales. La segunda cámara es la que controla los niveles de particulado y los compuestos orgánicos volátiles y opera generalmente a 100 grados más que la primera. El incinerador opera en cumplimiento con los límites de emisiones requeridos por ley. El equipo se puede instalar en la parte externa sin protección ya que está preparado para eso. También puede construirse con una estructura techada para ubicar los congeladores cerca para almacenamiento de los animales muertos. El incinerador opera a una temperatura de entre 1600 a 1800 °F. Será necesario capturar el gas antes de que llegue al *flare*. Para cumplimiento ambiental será necesario realizar pruebas de funcionamiento para asegurar que se destruye el 98% del gas en el incinerador. La temperatura de incineración de gases en el quemador es de 1500 °F y el incinerador de los animales opera entre 1600 a 1800 °F que es una temperatura más alta que la que opera el quemador de gases por tanto al incinerar los animales debemos destruir los gases que entran al incinerador. No se generaran desperdicios peligrosos ni aguas de procesos ya que solo generara cenizas que serán un desperdicio no peligroso que se dispondrán en el mismo relleno sanitario.

### **Alternativa 2. Generación de Energía Eléctrica**

Los altos costos de energía eléctrica que presenta nuestro país nos lleva a la conclusión que debemos buscar alternativas para utilizar otras fuentes de energía para combatir las altas facturas de energía eléctrica y el consumo del combustible fósil. Tradicionalmente los combustibles fósiles han sido empleados para la generación de

energía pero ante la escasez del material y los problemas ambientales ha aumentado la necesidad de encontrar nuevos recursos energéticos. Una alternativa es la generación de energía por medio de los gases generados por la descomposición anaeróbica de los residuos sólidos municipales (Aguilar-Virgen, Armijo-de Vega & Tobada-González, 2009).

En el caso específico del municipio de Carolina las facilidades del relleno sanitario de Carolina cuenta con la Planta de Reciclaje, las facilidades de las básculas, las oficinas del Departamento de Control Ambiental y el taller. Estas facilidades tienen un consumo aproximado de 600 KW/hr durante horas laborables siendo el mayor consumo de la planta de reciclaje que tiene las maquinas de procesar material y embalar. En horario fuera de horas laborables el consumo de las facilidades es de 75 Kw/hr. Esto hace un costo aproximado de \$100,000.00 mensuales.

Las facilidades de Carolina trabajan de 6:00 am a 4:00 pm para un total de 10 horas diarias de lunes a viernes y sábado y domingo no se trabaja. Por tanto tenemos un consumo de 38,850 KW/semana en toda la facilidad.

Se puede utilizar el gas del relleno sanitario para generar energía eléctrica y bajando así la dependencia de la AEE y el uso de combustible fósil. El relleno sanitario de Carolina tiene una generación de gas metano de 32% por lo que se sugiere utilizar la tecnología de micro turbinas para generar energía. La generación de energía por otros métodos requiere que el porcentaje de metano sea mayor de 45% para poder operar con regularidad y que el equipo no sufra desperfectos.

Los sistemas típicos de microturbinas están compuestos de un compresor, un recuperador, un combustor, una turbina y un generador magnético permanente y

requieren poco espacio para operar. La baja capacidad de estas unidades hace que sean las más adecuadas para aplicaciones en sitios pequeños y remotos con bajas tasas de producción gas. Estas son recomendables en áreas donde la energía eléctrica es costosa.

Una microturbina de la marca Ingersoll Rand serie MT 250 producirá un total de 250 KW/hr., y utilizara 100 cfm de gas para producir esta energía que se controla con una válvula reguladora de flujo. Si generamos 250 KW/ hr, en una semana se generan 42,000 Kw/semana. Esta cantidad generada de energía nos dará para suplir la energía necesaria en las facilidades en el SRS de Carolina. Es un equipo compacto de medidas de 84 pulgadas de ancho por 163 pulgadas de largo y 160 de alto para el equipo a ubicarse en el exterior. El peso es de 12,000 lbs.

Las emisiones que genera este equipo cumplen con los niveles permitidos por ley de Aire Limpio (CAA) y los niveles de ruido están por los 83 decibeles pero existe un aditamento adicional del fabricante que es recomendable que se instale para bajar los niveles de ruido a 77 decibeles. Además podemos trabajar con *muffler* y barreras de aislamiento de sonido para bajar los niveles de ruido. Esto para proteger los empleados que están expuestos a estos en horas laborables.

Se requiere la instalación de un metro para medir la cantidad de energía producida que entra y sale del sistema de AEE. Al tener un equipo de generación de energía es necesario conectarlo al sistema de energía eléctrica y se tiene que llevar un registro de cuanta energía se transfiere o se utiliza para computar el pago o los créditos que se tendrán que realizar al final del mes. Este proceso se efectúa utilizando el sistema llamado *netmetering* de la AEE. El sistema *netmetering* establece las tarifas a pagar en

caso de tener un excedente de energía producida sobre la energía consumida por las facilidades del SRS de Carolina.

### **Alternativa 3. Conversión del gas a combustible para los camiones municipales**

El consumo de combustible fósil para los camiones de recogido de desperdicios cada día es una incertidumbre y sus costos varían dependiendo del costo del combustible en el mercado. Los camiones de recogido de desperdicios salen diariamente a la calle a recoger desperdicios sólidos representando un gran costo en gastos de combustible diesel para los municipios.

El municipio de Carolina en su departamento de control ambiental realiza la recolección de desperdicios sólidos utilizando 20 camiones que utilizan combustible diesel. Además, utilizan equipo pesado adicional tales como *digger*, excavadoras, barredoras, tractores ya que recogen escombros y material voluminosos y estos equipos también consumen combustible diesel. El costo del combustible es de \$3.33 por galón aproximadamente y cada camión consume 65 galones diarios aproximadamente. El consumo diario de combustible de 20 camiones es de 1,300 galones diarios con un costo total de \$4,329.00. Los camiones de recolección operan 260 días al año lo que representa un consumo de diesel anual de 338,000 galones. El costo anual aproximado será de \$1,125,540.00 en la compra de combustible diesel para los camiones.

El gas generado en los rellenos sanitarios es un sustituto viable para los combustibles a base de petróleo (Hansen, 2006). Este gas es uno no convencional que puede ser muy versátil. El mismo puede ser transformado a combustible tipo gas natural comprimido o gas natural líquido. El gas natural es una de las formas más limpias y eficiente de energía y un componente vital en el suministro energético. El gas es refinado y condensado con el

propósito de hacer más conveniente su almacenamiento y transportación (Cheng, Lin, Hsu & Shu, 2009).

Si convertimos el gas del relleno sanitario en combustible estamos utilizando una alternativa ambiental a los combustibles fósiles como el diesel. Para lograr esto es necesario limpiar el gas para aumentar la cantidad de metano y eliminar o reducir la cantidad de bióxido de carbono. Además, es necesario eliminar o reducir los demás gases tales como sulfuro de hidrógeno y siloxano que pueden causar daño al motor de los camiones. El gas de relleno sanitario es un gas húmedo y con trazas de otros gases que pueden causar corrosión a los camiones.

El equipo *greenlane* biogás de *Flotech* es un equipo que trata el gas con agua en donde pasa el gas por unos procesos para atrapar el bióxido de carbono y demás gases que no sean necesario y purificarlo dejando un 98 % metano. El gas pasa por procesos de compresión, depuración, limpieza, separación y finalmente por un secador para llevarlo comprimido al tanque de almacenamiento. Una vez en el tanque es transferido por medio de una bomba a los camiones que tienen instalado un tanque para el gas.

Un camión que opera con gas natural produce menos emisiones que los que utilizan diesel o gasolina. Para convertir el camión a un sistema de gas natural es necesario la instalación de un tanque que puede estar ubicado debajo del camión o en la parte de atrás. Lo más recomendable es que cada camión opere con un sistema combinado de gas natural y diesel. Cada tanque tiene un dispositivo de presión y válvula de cierre. Del tanque se instala una tubería de acero inoxidable que contiene una válvula manual en el interior del vehículo y de ahí llega hasta el motor.

Un equipo de conversión de gas a combustible gas comprimido que utiliza 250 scfm nos debe producir 970 galones equivalente a diesel. Si producimos 970 galones diarios de gas comprimido a la semana produciremos 6790 galones de gas comprimido. La flota de 20 camiones del municipio de Carolina consume 6500 galones semanales. El costo de estos 6500 galones sería un ahorro semanal para el municipio al instalar este equipo.

### **Selección de la mejor alternativa**

Para poder escoger cual es la mejor alternativa de las tres es necesario desarrollar criterios de evaluación para poder comparar y escoger la mejor. Para esto utilizaremos criterios de costo de instalación, recuperación de inversión, factores de demanda necesaria del equipo para operar en condiciones satisfactorias, factores ambientales y factores físicos espaciales que determinen si el equipo cabe en el espacio disponible. En los factores de costos se debe considerar el proceso completo de instalación del proyecto y dejarlo funcionando satisfactoriamente en el lugar.

El primer criterio que evaluamos es el criterio de costo de instalación del equipo. La alternativa 1 incinerador para cremación de animales tiene un costo de \$385,243.00. La alternativa 2 de generación de energía por medio de la microturbina tiene un costo de \$425,000.00. La alternativa 3 de conversión de gas a combustible para el uso de los camiones tiene un costo de \$1,700,000.00.

El segundo criterio que evaluamos fue el de recuperación de inversión. La alternativa 1 nos presentaba un gasto mensual de \$6,600.00 para la cremación de 11,000 libras de animales muertos. Los costos de instalación del equipo dividido entre los gastos mensuales de cremación nos darán los meses necesarios para la recuperación de la inversión. Esto equivale a 58 meses para recuperar la inversión si mantenemos el



incinerador solo para uso del municipio. Este equipo es capaz de incinerar 600 libras cada 4 horas, de esta forma trabajando 4 días a la semana y dejando un día para mantenimiento, podemos procesar 20,800 lbs. al mes. Esto nos da la posibilidad de tener clientes adicionales en el incinerador y recuperar la inversión más rápidamente. De las 20,800 lbs. que podemos procesar mensualmente le descontamos las que el municipio procesa nos queda espacio para procesar 9,800 lbs. Si utilizamos el 85% de las 9,800 lbs. para procesar animales muertos de otros clientes y cobramos a una tarifa de \$0.35 por libra recuperamos \$2,915.50 mensual adicional recuperando la inversión de capital en 40 meses.

La alternativa 2, generación de energía nos presenta un caso un poco más complicado para hacer un análisis de inversión de capital. Los municipios por regla general no pagan a la AEE porque cancelan sus facturas contra los arbitrios que le cobran a la agencia. Si no tomamos en cuenta las facturas de AEE por las facilidades del relleno sanitario tendremos que analizar cuanta energía podemos producir para conocer si tenemos excesos de energía que nos presentaran ganancia. Si el equipo produce 250 Kw/ hr. en una semana producirá 42,000 Kw. Las facilidades consumen 600 Kw/ hr en horas laborables y 75 Kw/ hr. en horas no laborables para un total de 38,850 Kw/semana. El generador producirá 3,150 Kw/semana en exceso o 13,650 Kw/mes. La AEE paga según la tabla de *netmetering* el 75% del exceso a \$0.10 por Kw. De esta forma el municipio debe recuperar \$1,023.75 mensual. Al dividir la inversión entre lo recuperado nos tardaremos 415 meses en recuperar la inversión. Si consideramos las facturas de energía eléctrica que son de alrededor de \$80,000.00 mensuales se podría recuperar la inversión en 6 meses.

La alternativa 3, conversión de gas a combustible para los camiones este nos generara 970 galones de gas diario para reemplazar el combustible diesel. Si generamos 970 galones diarios de combustible generaríamos 29,504 galones al mes para uso de los camiones. Si cada camión consume 65 galones diarios y trabaja 5 días a la semana entonces los 20 camiones consumirán un total de 28,166 galones mensuales. El costo del combustible diesel varia pero en las últimas semanas ha fluctuado en \$3.33 por galón. Si dejamos de gastar \$93,792.78 mensual en la compra de diesel entonces recuperaríamos la inversión en 17 meses.

El tercer criterio de evaluación es la demanda necesaria del equipo. Para la alternativa 1 se requiere el uso de 75 scfm y no tiene requerimiento del porcentaje de metano. La alternativa 2 requiere 100 scfm y está diseñado para que pueda trabajar con menos de 40% de metano. La alternativa 3 requiere 250 scfm y se necesita que el gas tenga más de 40% de metano para poder producir 970 galones diarios de combustible.

El cuarto criterio de evaluación son los factores ambientales. La alternativa 1 cumple con criterios de opacidad y en emisiones de particulado y monóxido de carbono está por debajo de los permitidos por ley. Las cenizas producidas son desperdicios no peligrosos y serán dispuestas en el mismo relleno sanitario de Carolina. La temperatura a la que opera el incinerador destruye los gases al igual que el incinerador de gases y para probar esto se tendrán que realizar pruebas de funcionamiento. La alternativa 2 tiene emisiones de NOx, CO y VOC pero los mismos están por debajo de los permitidos por Ley de Aire Limpio. Los niveles de ruido de la microturbina son de 83 decibeles. La alternativa 3 El sistema de conversión de gas a combustible no tendrá generación de desperdicios y cumplirá con los requerimientos de emisiones.

El quinto criterio de evaluación es el de espacio para la ubicación de cada una de las alternativas en el sistema de relleno sanitario. El área donde se encuentra el incinerador de gases cuenta con espacio suficiente para ubicar cualquiera de las tres alternativas.

Luego de evaluar los criterios de costos de instalación de equipo, recuperación de inversión, los factores de demanda necesaria de flujo para que el equipo funcione en condiciones satisfactorias, factores ambientales y los factores de disponibilidad de espacio disponible para poder ubicar el equipo llegamos a las siguientes conclusiones:

- 1) En términos de costo el equipo más costoso es el de conversión de gas a combustible y el más económico es el de cremación de animales.
- 2) En términos de recuperación de inversión el proyecto que se podría recuperar más rápido lo invertido es el de conversión de gas a combustible y el de más lenta recuperación es el de las microturbinas. El proceso de recuperación de microturbinas es más lento ya que el municipio actualmente no paga por consumo de energía eléctrica. El método que tienen los municipios con energía eléctrica es que cancelan facturas de luz contra los arbitrios que se pagan y eso hace que no consideren pago por consumo de luz. Si se analiza detalladamente lo que debería pagar el municipio por el consumo de luz en las facilidades de Carolina este proyecto sería el de más rápida recuperación de inversión.
- 3) En términos de la demanda de flujo el mejor proyecto es el de cremación de animales ya que no tiene requisitos de porcentaje de metano. El proyecto de conversión de gas a combustible requiere que se genera más de 40% de metano para operar adecuadamente. El sistema de gases de Carolina opera con un 32 % aproximado de metano lo que no hace atractivo la conversión de gas a combustible ya que puede

traer problemas en la operación del equipo. Las empresas que desarrollan las tecnologías de conversión de gas a combustible sugieren que los proyectos con potencial competitivo deberían estar generando 10,000 galones por día y que menos de 1000 galones no deben ser considerados (*National Renewal Energy Laboratory*, 2005). El caso de Carolina debe tener un máximo de generación diaria cerca de los 1000 galones pero la generación de metano está muy baja lo que redundara en menos galones de combustible generado y problemas operacionales.

- 4) En términos de factores ambientales las tres alternativas operan de forma satisfactoria de acuerdo a la ley. Las emisiones de contaminantes al aire están reguladas y están tienen que ser incluidas como parte del permiso de emisiones a la atmósfera de la facilidad. El problema principal en términos ambientales lo presentan las microturbinas por ruido ya que hay personal trabajando en estas facilidades y estarían expuestos a niveles de ruido todo el tiempo sobre 80 decibeles.
- 5) En términos de espacio las tres alternativas pueden ser construidas ya que el área al lado del incinerador de gases tiene espacio suficiente para su ubicación.

Las tres alternativas son alternativas que bien podrían construirse en las facilidades de Carolina si consideramos la cantidad de flujo de gas necesaria. Pero si realizamos un análisis más detallado de las tres alternativas en este momento con las condiciones de la cantidad de metano que se está generando debemos descartar la alternativa de conversión de gas a combustible ya que nos puede representar problemas operacionales en el sistema y redundara en mayores gastos y problemas operacionales de recogido en el municipio posiblemente.

Las microturbinas presentan un problema de ruido y su recuperación de inversión es muy lenta si consideramos que no están pagando por la luz. Esto hace que este proyecto no sea

atractivo para el municipio en estos momentos aunque si es una buena alternativa para disminuir el consumo de combustible fósil y resolver el problema de las constantes veces que se va la luz en la facilidad.

De acuerdo a los criterios de evaluación analizados la mejor alternativa en estos momentos es la instalación de un incinerador de animales para su cremación. La tabla 14 es una tabla comparativa de las tres alternativas.

### **Implantación de alternativa seleccionada**

Para implantar la tecnología seleccionada es necesario realizar una serie de pasos que son los siguientes:

#### 1) Subasta

Es necesario que el municipio prepare una invitación a subasta para requerir que el suplidor provea los estudios necesarios como el estudio de suelo y la construcción de la base de hormigón así como también la estructura para ubicar el incinerador y también debe incluir los costos del equipo y la instalación del mismo así como el cumplimiento ambiental necesario. Se debe considerar llevar infraestructura hasta el área de construcción tales como agua y electricidad. El costo de preparación de subasta es de \$3,000.00 aproximadamente.

#### 2) Adjudicación de subasta

Luego de evaluar las empresas interesadas en la instalación del equipo será necesario adjudicar la subasta al mejor postor considerando criterios económicos, experiencia y la seriedad de la empresa y cuan comprometida esta en el cumplimiento ambiental. El costo de adjudicación de subasta es de \$2,000.00 aproximadamente.

### 3) Construcción de la facilidad

Antes de comenzar la construcción de la facilidad será necesario cumplir con un documento ambiental y con la fase de permiso de construcción. Además deberá tramitar los pagos de seguros y arbitrios requeridos. Luego de esto se realizara una reunión antes de comenzar a construir para discutir las fases a seguir de construcción. Es necesario que el municipio tenga contratado a un inspector para que esté presente en el proyecto mientras se construye para que al final pueda certificar la construcción. En términos de costos esta fase se divide en varias áreas. La primera es realizar un estudio de suelo para certificar que no tendrán problemas con la ubicación del proyecto en esta zona. El costo del estudio de suelo es de \$5,000.00 aproximadamente. Los trámites de permisos ambientales, patentes y seguros tiene un costo de \$30,000.00. Como parte de la construcción el municipio tendrá que contratar un inspector para el proyecto que tendrá un costo de \$30,000.00. La construcción de estructura, techo, compra e instalación del incinerador tiene un costo de \$315,000.00. La compra de refrigeradores para almacenamiento de animales tiene un costo de \$8,000.00.

### 4) Pruebas de funcionamiento, certificación del proyecto y permiso de operación

Una vez la facilidad está construida es necesario realizar pruebas de funcionamiento y en esta etapa se debe notificar a la Junta de Calidad Ambiental. Es necesario que estas pruebas demuestren que el gas dentro del incinerador se destruye a un 98%. Una vez logrado esto se certificara el incinerador y se procederá a sacar el permiso de operación mediante una enmienda al permiso de Título V en la Junta de Calidad Ambiental bajo el Programa de Calidad de Aire. El costo de las pruebas de funcionamiento y el permiso de operación es de \$8,000.00.

#### 5) Operación del Incinerador de Animales

Al tener los permisos requeridos se puede comenzar a operar la facilidad de incineración de animales. Esto puede realizarse por el municipio o la empresa privada. Tendrá un costo aproximado de \$ 20,000.00 mensuales.

#### 6) Mercadear la facilidad a clientes externos

Como el incinerador tiene capacidad para recibir desperdicios externos es necesario que alguien ofrezca estos servicios a clínicas veterinarias para aumentar la recuperación de la inversión. Se podría comenzar con los veterinarios en el Municipio de Carolina que se tiene más facilidad para llegar a ellos.

En la tabla 15 podemos ver las estrategias, costo y tiempo estimado para la implantación de la mejor alternativa. El costo total de implantación es de \$420,243.00 y el tiempo estimado de completar el proyecto es de 15 meses.

## **CAPÍTULO VI**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

El desarrollo de un plan para la utilización del gas del relleno sanitario de Carolina es necesario ya que al destruir el mismo no utilizamos esta alternativa como una fuente de energía renovable. Este plan recoge tres alternativas de tecnologías que son viables y se podrían instalar en cualquier relleno sanitario. Escogimos la mejor alternativa al realizar un análisis y ver que las condiciones existentes del sistema de gases podrían presentar problemas a la hora de operar la alternativa 2 de generación de energía y la 3 de conversión de gas a combustible.

El sistema de gases podría mejorarse y mejorar la cantidad de gas que se destruye y a la misma vez mejorar el porcentaje de metano recogido y esto viabiliza que se pueda instalar los demás equipos. Estos equipos podrían instalarse a la misma vez ya que ninguno consume la totalidad del gas dando opciones de combinar diferentes tecnologías.

La tecnología de cremación de animales es la más viable actualmente ya que no tiene requerimientos de porcentaje de generación para el gas metano. La alternativa de la microturbina puede ser una gran alternativa para mejorar los problemas de energía eléctrica que tiene la facilidad ya que las interrupciones de energía eléctrica constantes, atrasa las operaciones en la planta de reciclaje. Para implantar la tecnología de conversión de gas a combustible es necesario mejorar las condiciones del sistema ya que actualmente opera con un porcentaje de generación de metano muy bajo.

Como recomendación para mejorar al sistema es necesario se instalen pozos adicionales ya que el radio de influencia es muy grande. Hay que sustituir el pozo número CARWH029 que se destruyó por un fuego y nunca fue reemplazado. Los pozos CARWH016, CARWH005,



CARWH036 y CARWH024 deben ser sustituido ya que en el periodo de tiempo estudiado no funcionaron lo que nos indica que deben estar obstruidos. Cerrar las áreas que ya llegaron al máximo de utilización ayudaría a mantener el gas en el sistema ya que la arcilla utilizada controlará parte de las emisiones que puedan estar escapando a la atmosfera. La preparación de una bitácora de operación del sistema de extracción de gases que incluya un programa de inspecciones diarias al sistema para mantenerlo funcionando de forma eficiente.

La cantidad de metano que se recupera en el quemador es muy bajo dando un promedio de un 32% y esto hace que descartemos tecnologías que podrían ser mejores. Esto no hace atractivo este relleno sanitario para posibles inversionistas que puedan estar buscando la utilización del gas para nuevas tecnologías. La cantidad de desperdicios que recibe este relleno sanitario lo hace uno pequeño por definición y esto no es atractivo ya que no generara la cantidad de gas que generan rellenos sanitarios grandes.

Las limitaciones del estudio son que no conocemos a ciencia exacta la cantidad de material orgánico que llega a la facilidad ya que esta información no se lleva en los datos del relleno sanitario. Conocer la cantidad de materia orgánica nos podría dar información relacionada a la generación de metano. Solo tenemos un estudio realizado en el 2003 sobre esta información.

## 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.
- Anarug, G., Achari, G. & Joshi, R. (2007). Application of Fuzzy Logic to Estimate Flow of Methane for Energy Generation at a sanitary Landfill. *Journal of Energy Engineering*. Doi:10.1061/(ASCE)0733-9402(2007)133:4(212).
- Aguilar-Virgen, Q., Armijo-de Vega, C. & Tobada-González, P. (2009). El potencial energético de los residuos sólidos municipales. *Ingeniería*, 13(1), 59-62.
- Autoridad de Desperdicios Sólidos. (2003). Shaw EMCON/OWT, Inc. & Wehran-Puerto Rico, Inc. *Final Report: waste characterization study report executive summary*
- Autoridad de Desperdicios Sólidos. (2004). *Plan estratégico para el manejo de los residuos sólidos en Puerto Rico*. Estado Libre Asociado de Puerto Rico. San Juan, Puerto Rico.
- Autoridad de Desperdicios Sólidos (2008). *Itinerario dinámico de proyectos de infraestructura*. Estado Libre Asociado de Puerto Rico. San Juan, Puerto Rico.
- Berrueta, J. & Castrillón, L. (1992). Anaerobic treatment of leachate in UASB reactors. *Biotechnology*, 54; 33-37.
- Bilitewski, B. H. (1994). *Waste Management*. Berlin: Springer.
- Bogner, J., Meadows, M. & Repa, E. (1998). A new perspective: measuring and modeling of landfill methane emissions. *Waste Age*, 29: 118-130.
- Campbell, C. & Fainstein, S. (2002a). *Regulation theory, post fordism and urban politics*. Readings in Urban Theory 2<sup>nd</sup> Edition. Reino Unido. Blackwell Publishing, Ltd.
- Campbell, C. & Fainstein, S. (2002b). *Theory of urban development and their implications for policy and planning*. Readings in Urban Theory 2<sup>nd</sup> Edition. Reino Unido. Blackwell Publishing, Ltd.
- Campbell, C. & Fainstein, S. (2007a). *Regulation the death and life of great american cities*. Readings in Planning Theory 2<sup>nd</sup> Edition. Reino Unido. Blackwell Publishing, Ltd.
- Campbell, C. & Fainstein, S. (2007b). *The structures and debates of planning theory*. Readings in Planning Theory 2<sup>nd</sup> Edition. Reino Unido. Blackwell Publishing, Ltd.

- Campbell, C. & Fainstein, S. (2007c). *Toward a non-euclidian mode of planning*. Readings in Planning Theory 2<sup>nd</sup> Edition. Reino Unido. Blackwell Publishing, Ltd.
- Cheng, S., Lin, B., Hsu, B. & Shu, M. (2006). Fault-tree analysis for liquified natural gas terminal emergency shutdown system. *Expert Systems with Applications*, 36(9) 11918-11924.
- Environmental Protection Agency. (2010a). Landfill Methane Outreach Program. Recuperado de: <http://www.epa.gov/lmop/project-candidates/profiles/orangecountyfloridaandorl>.
- Environmental Protection Agency. (2010b). Landfill Methane Outreach Program. Recuperado de: <http://www.epa.gov/lmop/project-candidates/profiles/altamontlandfillgastpliqu>.
- Environmental Protection Agency. (2010c). Landfill Methane Outreach Program. Recuperado de: <http://www.epa.gov/lmop/project-candidates/profiles/cityoffargoandcargillfge>.
- Environmental Protection Agency. (2010d). Landfill Methane Outreach Program. Recuperado de: <http://www.epa.gov/lmop/project-candidates/profiles/centralialandfillleachate>.
- Environmental Protection Agency. (2010e). Landfill Methane Outreach Program. Recuperado de: <http://www.epa.gov/lmop/project-candidates/profiles/cogenerationatjscjohnsonso>.
- Environmental Protection Agency. (2006). Air Quality Criteria for Ozone and Related Photochemical Oxidant. Recuperado de: <http://www.cfpub.epa.gov/ncea>.
- Erses, A.S. & Onay, T.T. (2003). In situ heavy metal attenuation in landfills under methanogenic condition. *Journal of Hazardous Materials*, 99(2): 159-175.
- Ferrey, S. (2007). Converting Brownfield Environmental Negatives into Energy Positives. Boston College Environmental Affairs Law Review.
- Friedman, J. (1987). *The terrain of planning theory*. Planning in the Public Domain. Estados Unidos. Princeton University Press.
- Garg, A., Achari, G. & Joshi, R. (2007). Application of fuzzy logic to estimate flow of methane for energy generation at a sanitary landfill. *Journal of Energy Engineering*.
- Gas Control Engineering, Inc. (2010). Landfill Gas Systems Operation & Maintenance. Manual of Practice. SWANA course manual.
- 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 gas. *AIP Conference Proceedings*, 710(1):83-90.

- 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.
- J.F. & Assoc., Geoscience Consultants. (1998). *Geologic and hydrogeologic characterization at the Carolina municipal sanitary landfill site*. Carolina, Puerto Rico.
- Junta de Calidad Ambiental. (1988). *El Problema de la Disposición Final de los Desperdicios Sólidos en Puerto Rico*.
- Junta de Calidad Ambiental. (1990). *Reglamento para el Control de Tanques de Almacenamiento Soterrados*.
- Junta de Calidad Ambiental. (1997). *Reglamento para el Manejo de los Desperdicios Sólidos No Peligrosos*.
- Junta de Calidad Ambiental. (1998). *Reglamento para el Control de los Desperdicios Sólidos Peligrosos*.
- Junta de Calidad Ambiental. (2001). *Enmiendas al Reglamento para el Control de Contaminación Atmosférica para implantar las guías de Emisiones para Sistemas de Relleno Sanitario*.
- Junta de Calidad Ambiental. (2001). *Reglamento para el Control de Contaminación Atmosférica*.
- Lu, H. & Huang, G. & He, L. & Zeng, G. (2009). *An inexact dynamic optimization model for municipal solid waste management in association with greenhouse gas emission control*.
- Monton, A. & Chanton, J. & Roger, B. (1995). Controls of landfill gas collection efficiency. *Journal of the Air and Waste Management Association*.
- National Renewable Energy Laboratory. (2005). Franklin County Sanitary Landfill- Landfill Gas (LFG) to Liquified Natural Gas (LNG)- Project. Recuperado de: <http://www.afdc.energy.gov/afdc/pdfs/landfillreportfinal.pdf>.
- National Renewable Energy Laboratory. (1999). Landfill gas operation & maintenance. Manual of Practice. SWANA course manual.
- Nazario, F. (2003). Manual de desarrollo y operación de un sistema de relleno sanitario en Puerto Rico. San Juan: Autoridad de Desperdicios Sólidos.
- Ryu, C. (2010). Air And Waste Management Association. *Potential of Municipal Solid Waste for Renewable energy Production and Reduction of Greenhouse gas emission controlling South Korea*.

- Sullivan, T. (2007). Clean Water Act. *Environmental Law Handbook 19 Edition*, EEUU: Government Institute.
- Tchobanoglous, G. & Kreith, F. (2002). *Handbook of Solid Waste Management*. New York: McGraw Hill.
- Tinet, A. J. (2010). Chemical Engineering Science. *Stationary Gas Flow to Vertical Extraction Well in Municipal Solid Waste Landfill*.
- Wanichpongpan, W. & Gheewala, S.H. (2007). Life Cycle Assessment as a Decision support Tool to Landfill Gas Energy Projects. *Journal of Cleaner Production*. Bangkok: The Joint Graduate School of Energy and Environment, 15(18): 1819- 1826.
- Yu, L., Battle, F., Carrera, J. & Lloret, A. (2009). Gas Flow to a vertical gas extraction well in deformable Municipal Solid Waste Landfills. *Journals of Hazardous Materials*.
- Zietsman, J., Ehsanul Bari, M. & Rand, A. (2008). Air and Waste Association. *Feasibility of Landfill Gas as a liquefied Natural Gas Fuel Source for Refuse Trucks*.

## **TABLAS**

Tabla 1

*Comparativa de gases generados en diferentes rellenos sanitarios en Puerto Rico.*

<b>SRS</b>	<b>Temp. (°F)</b>	<b>Flujo (cfm)</b>	<b>Metano (%)</b>	<b>Oxígeno (%)</b>	<b>Pozos</b>	<b>Pozos cerrados</b>	<b>Toneladas (desp/día)</b>	<b>Orgánico (%)</b>
CAROLINA	1498	386	32	1.1	39	19	379.34	8.73
SAN JUAN	1463	440	40.7	2.6	120	42		
PONCE	1550	858	50.2	0.1	56	8	1253	7.13
HUMACAO	1600	2000	50	0.1	97		2000	17.09

Tabla 2

*Lectura promedio estación destrucción de gases en 2011.*

<b>Mes</b>	<b>Flujo (cfm)</b>	<b>Temperatura (°F)</b>	<b>CH<sub>4</sub> (%)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>O<sub>2</sub> (%)</b>	<b>Balance (%)</b>
enero	467.9	1501.9	31.6	31.4	1.12	35.88
febrero	403.5	1479.4	29.1	30.2	1.34	39.36



Tabla 3

*Lectura promedio estación destrucción de gases en 2010.*

<b>Mes</b>	<b>Flujo (cfm)</b>	<b>Temperatura (°F)</b>	<b>CH<sub>4</sub> (%)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>O<sub>2</sub> (%)</b>	<b>Balance (%)</b>
enero	415.7	1487	39.12	49.37	1.36	10.15
febrero	384.2	1508	31.1	64.9	1.34	2.66
marzo	300.5	1474	40.9	53.7	1.44	3.96
abril	309.9	1332.4	34.1	58.2	1.58	6.12
mayo	297.2	1486.7	41.3	52.1	2.26	4.34
junio	296.7	1484.3	43.9	40.2	0.76	15.14
julio	379.8	1492	46.9	29.6	1.26	22.24
agosto	261.4	1479	41.8	29.7	1.21	27.29
septiembre	361.8	1496.8	38.3	31.9	0.75	29.05
octubre	396.2	1495.6	37.2	31.4	0.74	30.66
noviembre	445.9	1498.6	34.4	32.2	0.5	32.9
diciembre	385.6	1496.8	32.8	32.1	0.59	34.51

Tabla 4

*Lectura promedio estación destrucción de gases en 2009.*

<b>Mes</b>	<b>Flujo (cfm)</b>	<b>Temperatura (°F)</b>	<b>CH<sub>4</sub> (%)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>O<sub>2</sub> (%)</b>	<b>Balance (%)</b>
enero	417.4	1497.6	30	28.8	2.86	38.34
febrero	409.2	1492.6	33.6	30.6	1.34	34.46
marzo	375	1502.5	31.4	29.4	1.36	37.84
abril	393.3	1526.2	29.5	28.3	1.43	40.77
mayo	321.4	1480.4	26	29.5	1.9	42.6
junio	336	1505.1	34.1	28.6	1.65	35.65
julio	369	1502.7	37	32	1.08	29.92
agosto	411.2	1488.2	42.2	35.4	0.57	21.83
septiembre	361.8	1496.8	38.3	31.9	0.75	29.05
octubre	409.8	1503.4	36	38	0.89	25.11
noviembre	433.7	1531.6	38.8	39.2	0.84	21.16
diciembre	416	1485.2	37.7	51.1	1.5	9.7

Tabla 5

*Lectura promedio estación destrucción de gases en 2008.*

<b>Mes</b>	<b>Flujo (cfm)</b>	<b>Temperatura (°F)</b>	<b>CH<sub>4</sub> (%)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>O<sub>2</sub> (%)</b>	<b>Balance (%)</b>
enero	313.3	1499.9	29.5	28.3	1	41.2
febrero	336.8	1511.4	31	28.4	1.16	39.44
marzo	359.2	1502.7	28.5	28.3	1.28	41.92
abril	364.8	1509.3	27.2	27.6	1.11	44.09
mayo	359.8	1492.6	27.3	28	1.64	43.06
junio	350.5	1512.5	30.9	28.4	1.28	39.42
julio	326.7	1499.3	28.8	28.8	0.96	41.44
agosto	447.2	1522.9	25.6	25.4	2.31	46.69
septiembre	440.7	1509.3	29.5	29.8	1.4	39.3
octubre	465.5	1532.3	33.5	31.7	0.8	34
noviembre	461.5	1488.8	31.7	30.1	1.48	36.72
diciembre	450.7	1468	30.7	29.4	1.81	38.09

Tabla 6

*Lectura promedio estación destrucción de gases en 2007.*

<b>Mes</b>	<b>Flujo (cfm)</b>	<b>Temperatura (°F)</b>	<b>CH<sub>4</sub> (%)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>O<sub>2</sub> (%)</b>	<b>Balance (%)</b>
enero	373.2	1487.7	34.2	30.4	0.54	34.86
febrero	362.6	1408.1	25.1	31	0.05	43.85
marzo	342.1	1432.4				0
abril	371	1446.4	26.6	28	0.26	45.14
mayo	367.2	1506.3	31	31.9	0.37	36.73
junio	375.1	1493.6				0
julio	379.1	1493.2	29.1	29.9	0.5	40.5
agosto	366.7	1510.8	27	29.8	1.87	41.33
septiembre	390	1499.3	29.8	24.8	2.78	42.62
octubre	498.1	1503.1	29.9	18.5	1.4	50.2
noviembre	636.2	1449	33.3	26.6	1.73	38.37
diciembre	310.1	1502	24.9	31.9	1.05	42.15

Tabla 7

*Lectura promedio estación destrucción de gases en 2006.*

<b>Mes</b>	<b>Flujo (cfm)</b>	<b>Temperatura (°F)</b>	<b>CH<sub>4</sub> (%)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>O<sub>2</sub> (%)</b>	<b>Balance (%)</b>
enero	298.6	1060.9				0
febrero	292.5	1032				0
marzo	352.1	1021.7				0
abril	333.6	957.1				0
mayo	343.8	969.8				0
junio	381.1	1003.4	28.1	29.4	0.5	42
julio						
agosto	387.3	1083	32.7	29	0.75	37.55
septiembre	378.3	1326.5	29.5	26.4	2.27	41.83
octubre	377.1	1395.7	25.5	34.2	1.79	38.51
noviembre	377.6	1304.7	29.2	25.7	3.76	41.34
diciembre	364.8	1523.3	34.3	26.5	2.55	36.65

Tabla 8

*Comparativa de gas generado vs gas destruido.*

<b>Año</b>	<b>LFG destruido (incinerador)</b>	<b>LFG generado (landgem)</b>	<b>diferencia</b>	<b>% destruido/generado</b>	<b>Prueba Funcionamiento</b>
2011	435.7	997.5	561.8	44%	380
2010	352.9	1038	685.1	34%	380
2009	387.8	1019	631.2	38%	380
2008	389.7	1008	618.3	39%	380
2007	397.6	994.5	596.9	40%	380
2006	353.3	975.2	621.9	36%	380

Tabla 9

*Historial promedio de muestreo realizado en los diferentes pozos.*

<b>Número de pozo</b>	<b>CH<sub>4</sub> (%)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>O<sub>2</sub> (%)</b>	<b>Balance (%)</b>	<b>Temp. (°F)</b>	<b>Presión (pulg.)</b>	<b>Flujo (cfm)</b>
CARWH016	1.865	11.385	5.439	81.311	79.304	-0.139	0.391
CARWH020	25.857	23.67	0.858	49.615	80.417	-2.375	13.617
CARWH019	20.051	18.993	4.441	56.369	92.164	-6.609	8.098
CARWH015	20.853	19.935	7.223	51.989	74.965	-5.56	5.474
CARWH014	21.323	21.005	4.775	52.896	79.263	-5.672	5.088
CARWH013	30.457	20.496	7.004	39.179	56.232	-10.452	7.161
CARWH012	12.047	10.14	11.982	64338	79.782	-11.862	0.164
CARWH011	49.277	28.425	1.577	20.721	89.286	-16.514	0.75
CARWH028	18.996	20.02	6.742	54.247	78.4	-6.036	0
CARWH026	32.926	21.13	5.986	36.739	83.07	-12.786	0.912
CARWH027	37.54	29.463	0.308	32.688	118.9	-4.057	14.833
CARWH030	33.325	29.857	0.605	36.213	106.067	-2.052	13.367
CARWH009	33.434	30.928	0.475	35.3	100.77	-2.021	13.311
CARWH008	47.738	31.483	0.402	20.378	110.897	-4.084	12.172
CARWH044	18.83	23.788	1.647	54.315	65.117	-3.622	6.133
CARWH007	29.943	26.326	3.303	40.428	68.787	-16.287	1.033
CARWH031	10.367	19.649	2.379	67.618	95.066	-0.316	3.426
CARWH 043	7.117	11.146	10.092	71.985	82.407	-0.18	1.746
CARWH042	16.666	23.17	2.827	57.338	85.107	-1.509	9
CARWH032	37.403	29.147	1.427	32.022	85.133	-2.612	11.2
CARWH041	18.4	19.507	6.167	56.09	74.951	-1.693	3.984
CARWH006	5.715	23.698	3.902	58.55	85.767	-7.94	0.833
CARWH005	1.261	2.907	16.526	72.232	103.807	-1.835	0.018
CARWH033	33.872	27.451	0.377	38.283	74.981	-1.965	9.962
CARWH004	49.589	31.856	0.316	18.239	103.049	-3.567	18.23
CARWH034	26.132	28.573	0.344	44.951	101.966	-2.417	11.424
CARWH003	19.22	15.572	9.61	54.369	72.836	-9.327	0.984
CARWH035	14.948	22.932	1.3	59.375	90.446	-0.455	5.821
CARWH002	17.998	23.395	0.705	56.484	68.107	-1.114	4.536
CARWH036	3.3	14.537	5.738	69.302	53.467	-0.086	0.233
CARWH037	6.768	12.1	8.214	68.544	72.932	-0.183	1.898
CARWH001	17.407	21.347	3.235	55.185	74.582	-3.449	7.273
CARWH018	10.9	14.511	3.425	68.877	80.705	-2.102	6.432
CARWH045	8.941	14.085	6.337	70.5	87.805	-1.493	5.61
CARWH021	40.044	25.037	4.459	29.75	93.111	-16.437	7.185
CARWH024	0.843	4.763	17.757	76.637	79.467	-0.593	1.4
CARWH025	28.648	16.703	9.471	45.2	79	-14.005	0.258

Tabla 9 (cont.)

CARWH023	23.49	20.419	7.684	48.406	83.161	-7.865	3.548
CARWH022	41.168	27.869	3.843	27.124	75.676	-15.192	3.162
CARWH029							

---



Tabla 10

*Porcentaje de no funcionamiento de los pozos en periodo estudiado.*

<b>numero de pozo</b>	<b>meses no funciono</b>	<b>% no funcionamiento</b>
CARWH016	58	94%
CARWH020	5	8%
CARWH019	15	24%
CARWH015	38	61%
CARWH014	28	45%
CARWH013	29	47%
CARWH012	45	73%
CARWH011	16	26%
CARWH028	42	68%
CARWH026	25	40%
CARWH027	1	2%
CARWH030	3	5%
CARWH009	3	5%
CARWH008	6	10%
CARWH044	15	24%
CARWH007	10	16%
CARWH031	34	55%
CARWH 043	47	76%
CARWH042	21	34%
CARWH032	7	11%
CARWH041	34	55%
CARWH006	47	76%
CARWH005	59	95%
CARWH033	9	15%
CARWH004	1	2%
CARWH034	4	6%
CARWH003	38	61%
CARWH035	24	39%
CARWH002	19	31%
CARWH036	56	90%
CARWH037	46	74%
CARWH001	31	50%
CARWH018	36	58%
CARWH045	42	68%
CARWH021	21	34%
CARWH024	61	98%

Tabla 10 (cont.)

CARWH025	47	76%
CARWH023	47	76%
CARWH022	29	47%
CARWH029	62	100%

---

Tabla 11

*Promedio de lectura de datos del incinerador.*

<b>Año</b>	<b>Flujo (cfm)</b>	<b>Temperatura (°F)</b>	<b>CH<sub>4</sub> (%)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>O<sub>2</sub> (%)</b>	<b>Balance (%)</b>
2011	435.7	1490.7	30.4	30.8	1.2	37.6
2010	352.9	1477.6	38.5	42.1	1.1	18.3
2009	387.8	1501	34.6	33.6	1.3	30.5
2008	389.7	1504.1	29.5	28.7	1.4	40.4
2007	397.6	1477.7	29.1	28.3	1.1	41.6
2006	353.3	1152.6	29.9	28.5	1.9	39.6
promedio	386.17	1433.95	32.00	32.00	1.33	34.67

Tabla 12

*Mediana de lecturas de datos del incinerador.*

<b>Año</b>	<b>Flujo (cfm)</b>	<b>Temperatura (°F)</b>	<b>CH<sub>4</sub> (%)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>O<sub>2</sub> (%)</b>	<b>Balance (%)</b>
2011	435.7	1490.65	30.35	30.8	1.23	37.62
2010	370.8	1489.5	38.71	36.2	1.24	18.69
2009	401.25	1500.05	35.05	31.25	1.35	32.19
2008	362.3	1506	29.5	28.4	1.28	40.32
2007	371.1	1493.4	29.5	29.9	0.79	40.92
2006	364.8	1060.9	29.35	27.75	2.03	36.65
promedio	384.33	1423.42	32.08	30.72	1.32	34.40

Tabla 13

*Desviación estándar de lecturas de datos del incinerador.*

<b>Año</b>	<b>Flujo (cfm)</b>	<b>Temperatura (°F)</b>	<b>CH<sub>4</sub> (%)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>O<sub>2</sub> (%)</b>	<b>Balance (%)</b>
2011	45.54	15.91	1.77	0.85	0.16	2.46
2010	57.64	46.66	4.77	12.78	0.51	12.47
2009	35.14	15.19	4.66	6.64	0.62	9.7
2008	58.09	16.62	2.2	1.53	0.42	3.4
2007	86.91	34.26	3.21	4.13	0.88	16.66
2006	33.18	197.16	3.18	3.16	1.21	20.77
promedio	52.75	54.30	3.30	4.85	0.63	10.91

Tabla 14

*Evaluación de mejor alternativa.*

<b>Criterios de evaluación</b>	<b>cremación animales</b>	<b>producir energía</b>	<b>combustible alterno</b>
costo de instalación	\$ 420,243.00	\$ 460,000.00	\$ 1735,000.00
recuperación inversión	58 meses	415 meses/6 meses	17 meses
demanda necesaria requerimiento metano	75 cfm	100 cfm	250 cfm
factores ambientales	cumple con CAA, RCRA y JCA	opera menos 40% Emisión CO y VOC, niveles ruidos alto	mayor de 40%
espacio necesario	aceptable	aceptable	en cumplimiento aceptable

Tabla 15

*Estrategias de instalación de mejor alternativa.*

Objetivo	estrategia	entidad responsable	costo aproximado	tiempo de implantación	resultado esperado
implantar uso de tecnología para el uso del gas SRS	1) preparar aviso	Municipio	\$ 3,000.00	un mes	interés de empresas
	2) Contratar empresa seleccionada	Municipio	\$ 2,000.00	un mes	seleccionar empresa y contratarla
	3) estudio de suelo	empresa seleccionada	\$ 5,000.00	un mes	poder justificar ubicación del proyecto
	4) Conseguir permisos, seguros y patentes	empresa seleccionada	\$ 30,000.00	tres meses	poder construir la facilidad
	5) Contratar inspector	Municipio	\$ 30,000.00	al comenzar construcción	según especificaciones
	6) Construcción	empresa seleccionada	\$ 334,243.00	seis meses	Hacer pruebas funcionamiento
	7) compra de congeladores	empresa seleccionada	\$ 8,000.00	un mes	congelar animales
	8) Pruebas funcionamiento	empresa seleccionada	\$ 5,000.00	un mes	poder operar equipo
	9) Permiso de operación	empresa seleccionada	\$ 3,000.00	un mes	poder operar equipo
Total			\$ 420,243.00	15 meses	

## **FIGURAS**





*Figura 1.* Foto aérea de sistema de relleno sanitario de Carolina.

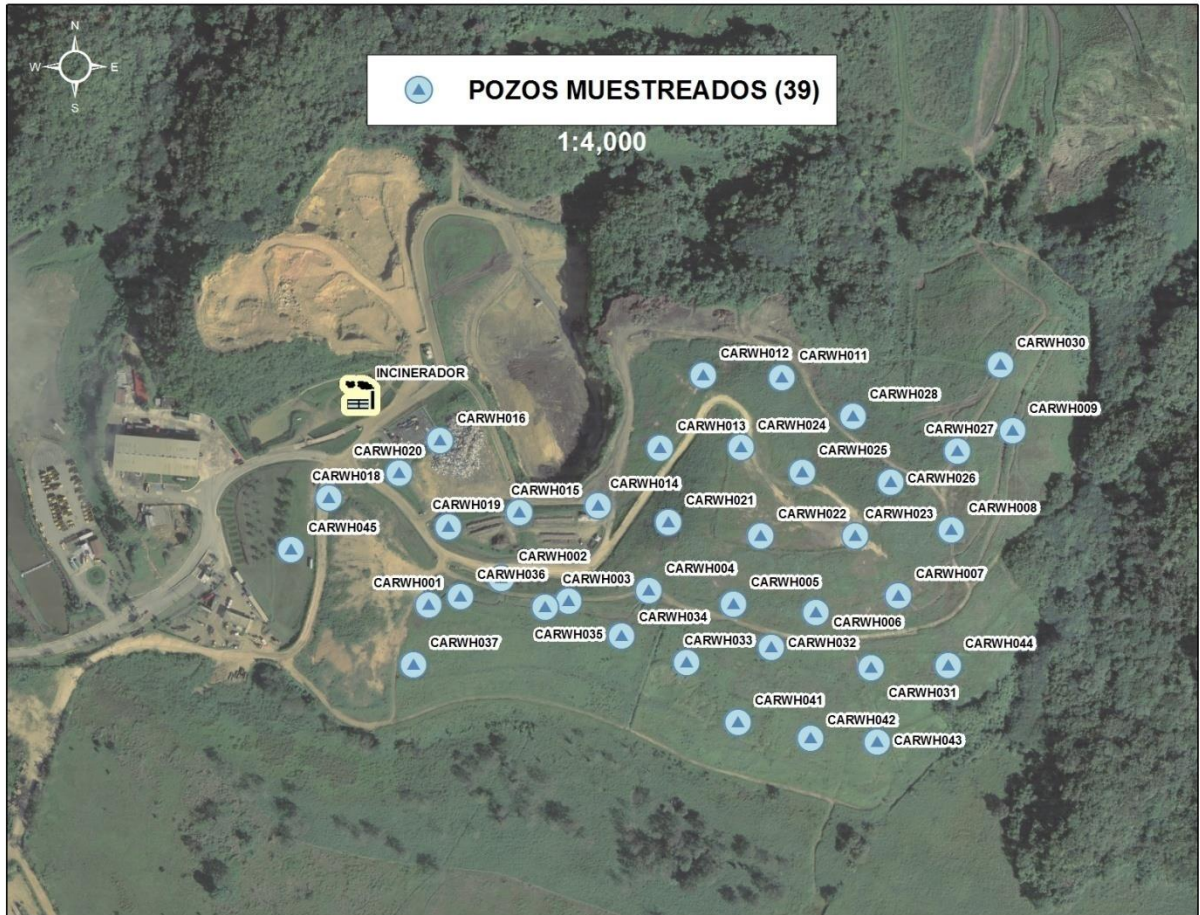


Figura 2. Ubicación de pozos en SRS Carolina.

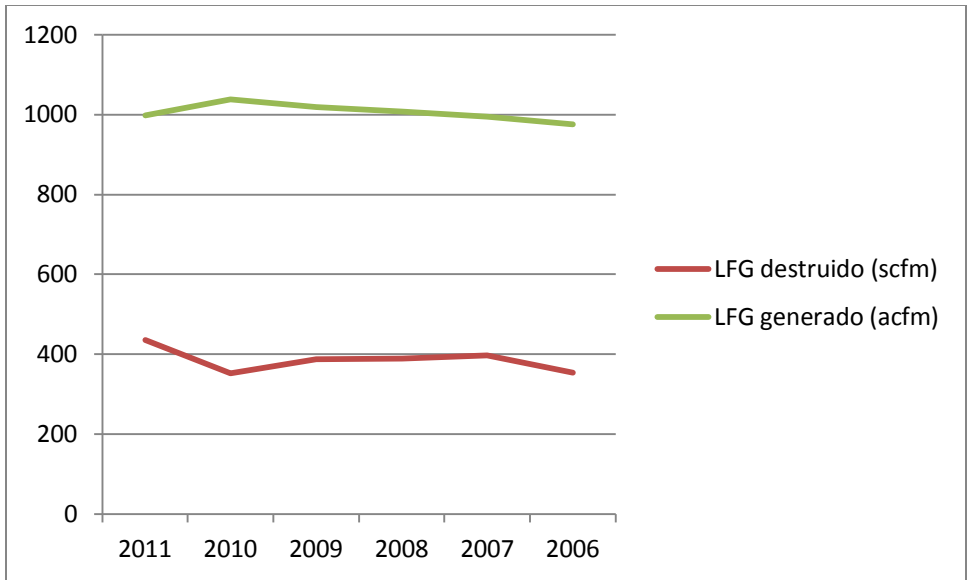


Figura 3. *Grafica comparativa entre gas destruido vs. gas generado.*



Figura 4. Pozos con niveles bajos de metano.

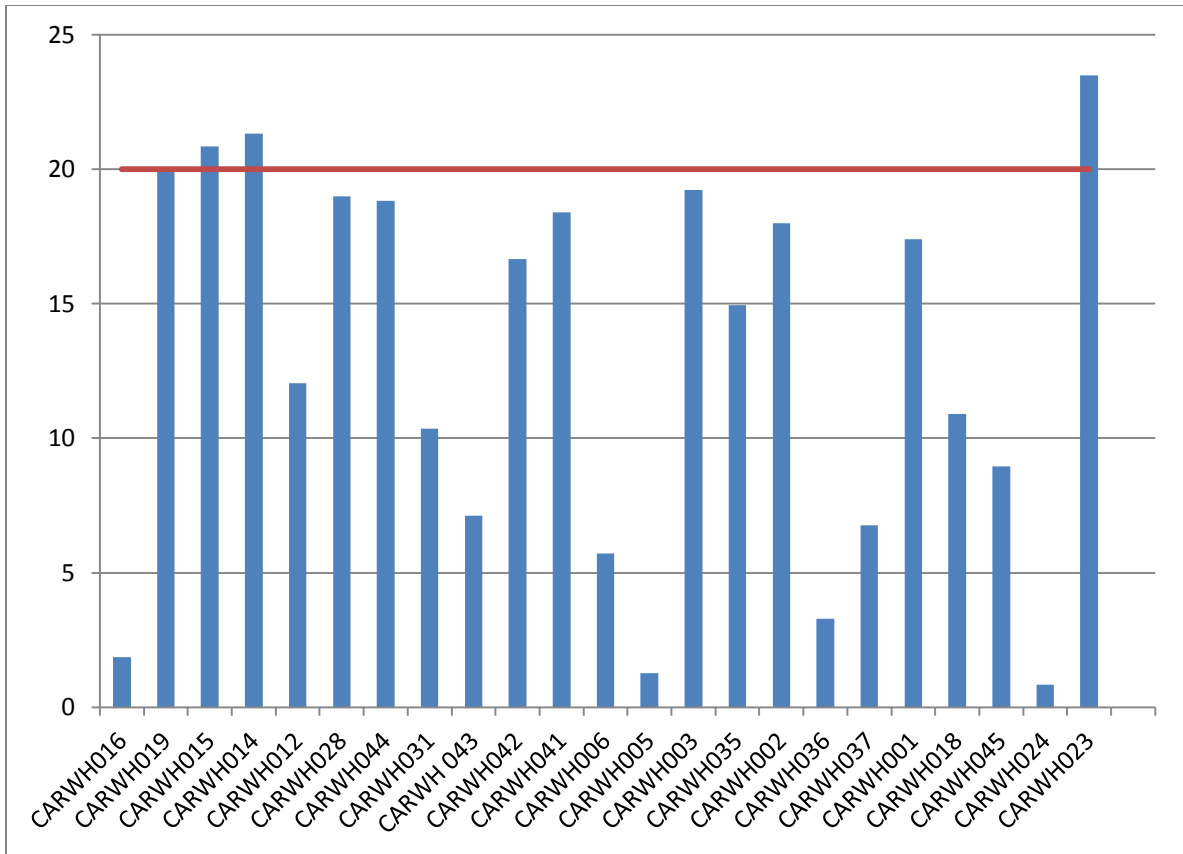


Figura 5. Grafica de pozos con metano bajo.

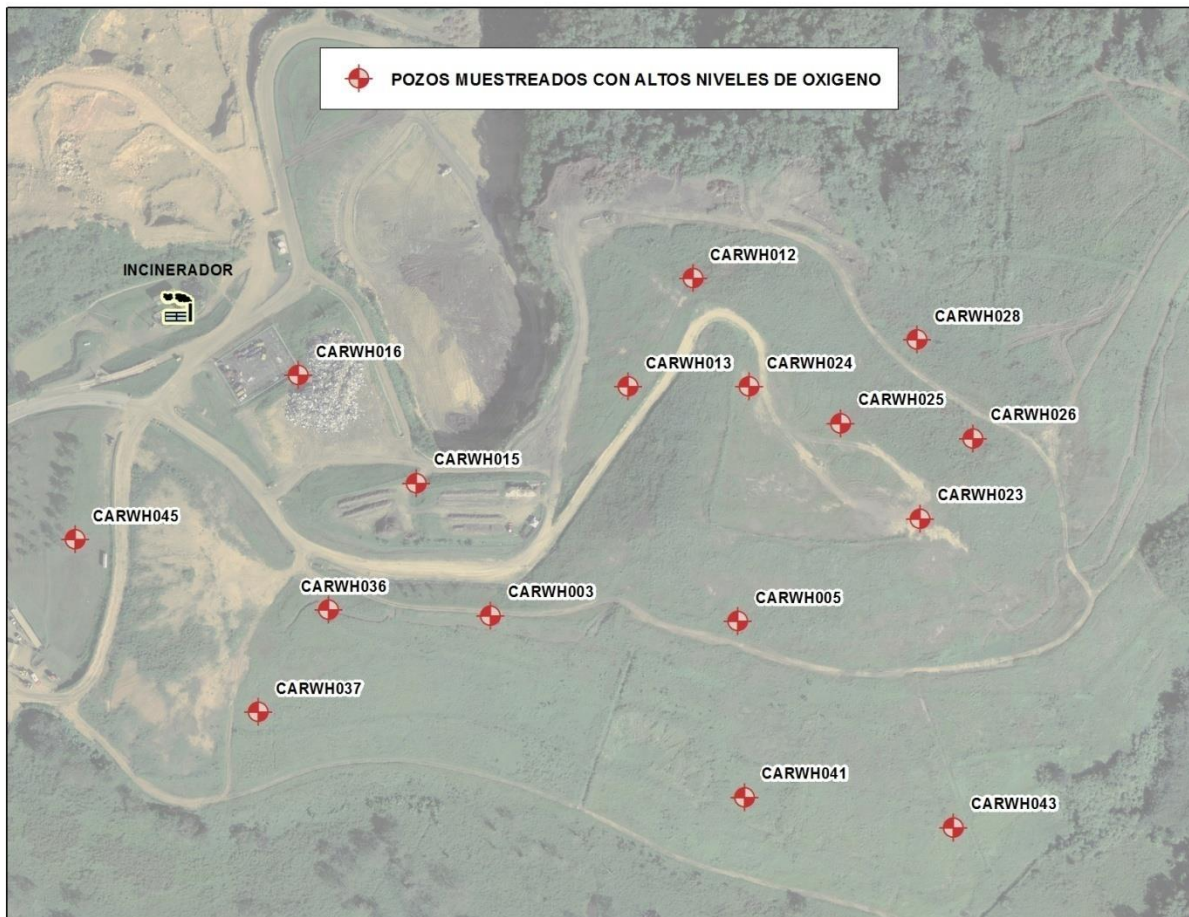


Figura 6. Pozos con oxígeno alto.

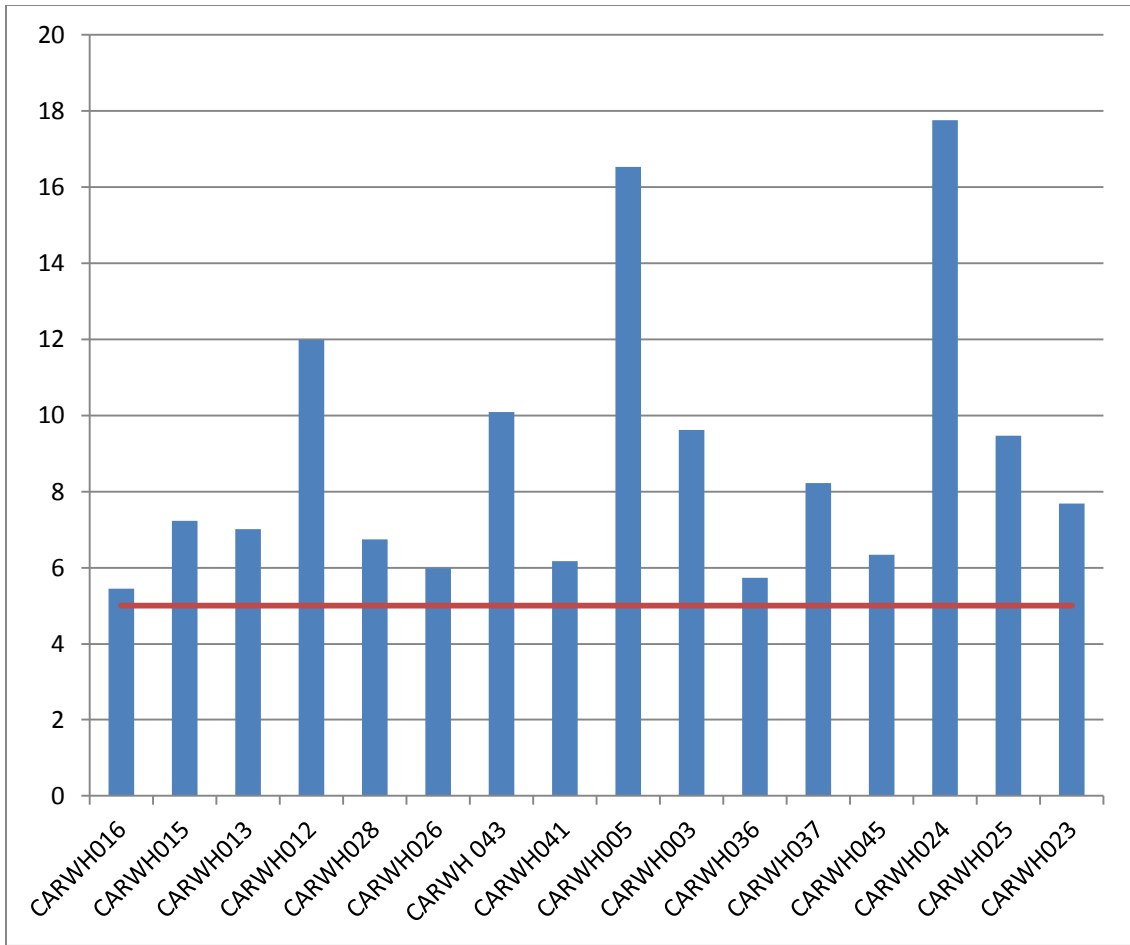


Figura 7. Gráfica de pozos con oxígeno alto.



Figura 8. Pozos sin funcionamiento en el tiempo estudiado.