



SEP

TMN

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
Instituto Tecnológico de Toluca

**“Evaluación del escalamiento a campo de la biodegradación
acelerada de los residuos sólidos urbanos”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

P R E S E N T A
I.Q. VÍCTOR JESSÉ MARÍN CALDERÓN
No. DE CONTROL: 0328M0721

DIRECTORA DE TESIS
DRA. MARÍA DEL CONSUELO HERNÁNDEZ BERRIEL

CODIRECTOR DE TESIS
DR. JULIO CÉSAR GONZÁLEZ JUÁREZ

METEPEC, ESTADO DE MÉXICO, ENERO 2015

"2014, Año de Octavio Paz"

Metepec, Méx., 09/Diciembre/2014

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN

DEPI-395-1056/2014

DRA. YESICA I. SAAVEDRA BENÍTEZ
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN
P R E S E N T E.

Por este medio comunicamos a usted que la Comisión Revisora designada para analizar la tesis denominada "EVALUACIÓN DEL ESCALAMIENTO A CAMPO DE LA BIODEGRADACIÓN ACELERADA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS", que como parte de los requisitos para obtener el grado académico de Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental presenta el **C. VÍCTOR JESSÉ MARÍN CALDERÓN**, con número de control 0328MO721 para sustentar el acto de Recepción Profesional, ha dictaminado que dicho trabajo reúne las características de contenido y calidad necesario para proceder a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE

DRA. MA. DEL CONSUELO HERNÁNDEZ BERRIEL
DIRECTORA DE TESIS

DR. JULIO CÉSAR GONZÁLEZ JUÁREZ
CO-DIRECTOR DE TESIS

DRA. MARÍA DEL CONSUELO MAÑÓN SALAS
REVISORA

DRA. ROSA ELVIRA ZAVALA ARCE
REVISORA

DRA. SARA OJEDA BENÍTEZ
REVISORA



"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

Metepec, Méx., 14/Enero/2015

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN

DEPI-395-032/2015

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS

C. VICTOR JESSE MARÍN CALDERÓN
Candidato al Grado de Maestro en Ciencias,
en Ingeniería Ambiental
PRESENTE.

De acuerdo con el Reglamento de Titulación del Sistema Nacional de Educación Superior Tecnológica de la Subsecretaría de Educación Superior de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora realizó con respecto a su Trabajo de Tesis titulado **"EVALUACIÓN DEL ESCALAMIENTO A CAMPO DE LA BIODEGRADACIÓN ACELERADA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS"** la División de Estudios de Posgrado e Investigación concede autorización para que proceda a la impresión del mismo.

Sin más por el momento, quedo de usted.

ATENTAMENTE



SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA
DR. YESICA IMELDA SAAVEDRA BENÍTEZ
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN
DE TOLUCA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E
INVESTIGACIÓN

YISB/MICM.



AGRADECIMIENTOS:

- Ing. Leticia Esperanza Colón Izquierdo, por el consejo de estudiar la maestría.
- Al grupo de profesores de posgrado del Instituto Tecnológico de Toluca, en especial a la Dra. María del Consuelo Hernández Berriel por la oportunidad de participar en su grupo de RSU.
- A la empresa MASERA S.A. de C.V. por proporcionar el RESA para elaborar el presente trabajo.
- CONACYT por la beca asignada para realizar la maestría.
- Y a la UC, en especial a la Dra. Amaya Lobo, por las facilidades brindadas y los conocimientos adquiridos durante la estancia en Santander.

RESUMEN

El Relleno Sanitario (RESA) es el método más utilizado para la disposición final de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), producidos por las actividades diarias de los seres humanos. Los RESA constituyen una fuente importante de Gases de Efecto Invernadero (GEI), como el Metano (CH_4) y el bióxido de carbono contenidos en el biogás, resultado de la descomposición biológica de la fracción orgánica de los RSU.

Los RESA son un riesgo ambiental, si no se les maneja con la intención de que no se vuelvan pasivos ambientales debido al biogás, el cual puede ser una alternativa de fuente renovable, como lo utilizan los países desarrollados (Alemania, Inglaterra, E.U.) y para países en vías de desarrollo (Colombia, Argentina, México), que están produciendo energía eléctrica por medio de la transformación del biogás generado in-situ. El desarrollo de este aprovechamiento genera beneficios económicos, tecnológicos, sociales y principalmente ambientales, por lo que su aprovechamiento en México, ha sido por parte de empresas privadas con fondos de apoyo internacionales, mientras que para los RESA públicos solo deben de cumplir con la NOM-083-SEMARNAT-2003.

El objetivo de este trabajo fue la evaluación económica del escalamiento a campo de la biodegradación acelerada de RSU, con la información del RESA de Zinacantepec, Estado de México; iniciando con una recopilación de información bibliográfica y de campo, que se utilizó para los programas de simulación y modelación de RESA con y sin recirculación de lixiviados, generación de biogás de manera controlada y la estimación de los costos preliminares requeridos. Conforme a los resultados obtenidos se concluye que la recirculación de lixiviados genera mayor cantidad de producción de CH_4 , resultando el proyecto, viable económicamente para generar energía eléctrica a partir de la quema de biogás.

SUMMARY

The Landfill (RESA) is the most common method for the disposal of Municipal Solid Waste (MSW) produced by the daily activities of humans. The RESA are a major source of greenhouse gases (GHG) such as methane (CH₄) and carbon dioxide content in the biogas resulting from the biological decomposition of the organic fraction of MSW.

The RESA are an environmental hazard if they are not handled with the intention that no environmental liabilities become due to biogas, which can be an alternative renewable source, as used by developed countries (Germany, UK, EU) and for developing (Colombia, Argentina, Mexico), who are producing electricity by transforming the biogas generated in-situ countries. The development of this use generates economic, technological, social and environmental benefits mainly, therefore its use in Mexico, has been by private enterprises with funds from international support, while only for public RESA must comply with NOM -083-SEMARNAT-2003.

The aim of this work was the economic evaluation of scaling to field accelerated biodegradation of MSW with information Zinacantepec RESA, State of Mexico; starting with a collection of bibliographic and field, which was used for the simulation and modeling programs RESA with and without recirculation of leachate, landfill gas generation controlled manner and preliminary estimate of costs required. It accordance with the results obtained it is concluded that generates leachate recirculation amount greater CH₄ production, resulting in project economically feasible to generate electrical energy from burning biogas.

ÍNDICE

RESUMEN	v
SUMARY	vi
ÍNDICE	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABLAS	xii
INTRODUCCIÓN	1
1. FUNDAMENTOS.....	3
1.1 GASES DE EFECTO INVERNADERO	3
1.1.1 Aportaciones mundiales	4
1.1.2 Aportaciones nacionales	8
1.2 RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS	10
1.2.1 Generación de RSU	11
1.2.2 Subproductos de la degradación.....	13
1.3 PROCESOS DE TRATAMIENTO PARA RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	15
1.3.1 Relleno sanitario.....	18
1.3.2 Biorrelleno	22
1.4 ESTUDIOS DE GENERACIÓN DE BIOGÁS	25
1.4.1 Estudios a escala	26
1.4.2 Estimación de generación de biogás.....	29
1.4.3 Simuladores de procesos	36
1.5 EVALUACIÓN ECONÓMICA	38
1.6 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	44
2 PARTE EXPERIMENTAL.....	47
2.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN	47

2.1.1 Información documental	48
2.1.2 Información de campo	48
2.2 PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN.....	49
2.3 ESTIMACIÓN PRELIMINAR DE BIOGÁS.....	49
2.4 ESCALAMIENTO A CAMPO DE BIODEGRADACIÓN ACELERADA	50
2.4.1 Simulación con MODUELO	50
2.4.2 Dimensionamiento y selección de equipo	50
2.5 EVALUACIÓN ECONÓMICA	51
2.5.1 Determinación de costos de inversión.....	52
2.5.2 Determinación de costos de operación	52
2.5.3 Análisis de sensibilidad	53
3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	54
3.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.....	54
3.1.1 Información documental	54
3.1.2 Información de campo	56
3.2 PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN.....	61
3.2.1 Arreglo de información para el Modelo Mexicano	61
3.2.2 Arreglo de información para MODUELO	63
3.3 ESTIMACIÓN PRELIMINAR DE BIOGÁS.....	68
3.4 ESCALAMIENTO A CAMPO DE LA BIODEGRADACIÓN ACELERADA	70
3.4.1 Simulación con MODUELO	70
3.4.2 Dimensionamiento y selección de equipo	75
3.5 EVALUACIÓN ECONÓMICA	80
3.5.1 Determinación de costos de inversión.....	80
3.5.2 Determinación de costos de operación	83

3.5.3 Análisis de sensibilidad	84
CONCLUSIONES.....	87
RECOMENDACIONES	88
FUENTES CONSULTADAS.....	89
ANEXOS	101
ANEXO A. Recopilación de información	102
ANEXO B. Procesamiento de la información	108
ANEXO C. Estimación preliminar de biogás	121
ANEXO D. Escalamiento a campo de la biodegradación acelerada	130
ANEXO E. Evaluación económica.....	137
ANEXO F. Análisis de sensibilidad.....	140

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Contribución porcentual de las emisiones de CO ₂ e en el año 2010.....	5
Figura 1.2 Emisiones de CO ₂ e por categoría y tipo de gas.....	9
Figura 1.3 Generación de residuos sólidos a nivel mundial.	11
Figura 1.4 Regiones geográficas de México conforme a generación de RSU.	12
Figura 1.5 Generación de RSU por región (miles de toneladas).	13
Figura 1.6 Regiones climáticas de México	34
Figura 2.1 Diagrama de bloques de la parte experimental.....	47
Figura 3.1 Localización del municipio de Zinacantepec	55
Figura 3.2 Municipios colindantes	55
Figura 3.3 Zona de cobertura del RESA de Zinacantepec	56
Figura 3.4 Ubicación RESA de Zinacantepec (2003)	57
Figura 3.5 Ubicación RESA de Zinacantepec (2013)	57
Figura 3.6 Ubicación de pozos de venteo	58
Figura 3.7 Muestra de RSU C03	60
Figura 3.8 Muestra apartada	60
Figura 3.9 Método del cuarteo.....	60
Figura 3.10 Peso específico	60
Figura 3.11 Estimación de generación de biogás.....	69
Figura 3.12 Estimación de generación de biogás MODUELO	73
Figura 3.13 Simulación global de la generación de biogás	74
Figura 3.14 Dinámica de DQO en lixiviados: a) Sin recirculación y b) Con recirculación	74
Figura 3.15 Red de extracción y conducción de biogás	79
Figura 3.16 Analisis de sensibilidad con MMB	85
Figura 3.17 Analisis de sensibilidad con MODUELO	85
Figura A.1 RESA en el año 2011	102
Figura A.2 RESA en el año 2012	102
Figura A.3 Geolocalización de pozos de venteo	104
Figura B.1 Curvas de nivel del RESA.....	114

Figura B.2 Estaciones metereologicas cerca del RESA.....	115
Figura B.3 Planos del proyecto en autocad.....	118
Figura B.4 Modelo de terreno con celdas de vertido de RSU	118
Figura B.5 Modelo morfológico con celdas de residuos	118
Figura C.1 Generación de CH ₄ simulada con MODUELO en Cs con y sin recirculación de lixiviados	123
Figura C.2 Generación de CH ₄ simulada con MODUELO en C01 con y sin recirculación de lixiviados	125
Figura C.3 Generación de CH ₄ simulada con MODUELO en C02 con y sin recirculación de lixiviados	127
Figura C.4 Generación de CH ₄ simulada con MODUELO en C03 con y sin recirculación de lixiviados	129
Figura D.1 Arreglo de tubería opción 01	132
Figura D.2 Arreglo de tubería opción 02	133
Figura D.3 Diagrama de proceso en Chemcad	136
Figura E.1 Determinación de flujo para motogenerador	137

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Composición de RSU	14
Tabla 1.2 Ventajas y desventajas del RESA	22
Tabla 1.3 Ventajas y desventajas de RESA biorreactor	25
Tabla 1.4 Valores del índice de generación de CH ₄ (<i>k</i>).....	34
Tabla 1.5 Valores de la generación potencial de CH ₄ (<i>L₀</i>)	34
Tabla 1.6 Costos de inversión en Argentina.....	42
Tabla 1.7 Costos de inversión en Colombia.....	43
Tabla 1.8 Costos de proyectos de inversión en México	43
Tabla 1.9 Costos de proyecto Saltillo	44
Tabla 2.1 Normas y métodos para caracterización de RSU.....	48
Tabla 2.2 Normas y métodos para caracterización de lixiviados.....	49
Tabla 3.1 Análisis fisicoquímicos.....	61
Tabla 3.2 Valores empleados en el modelo hidrológico.	66
Tabla 3.3 Componentes de RSU.....	67
Tabla 3.4 Periodos de generación.....	68
Tabla 3.5 Elementos de un sistema de conducción de biogás.....	77
Tabla 3.6 Costos de un sistema de conducción de biogás	82
Tabla 3.7 Costos para una planta de generación de energía.....	83
Tabla 3.8 Costos totales de ingresos	84
Tabla 3.9 Indicadores de viabilidad del proyecto a \$20 USD/t CO ₂ e	86
Tabla A.1 Coordenadas y alturas sobre el nivel del mar de los pozos de venteo ...	103
Tabla A.2 Caracterización de RSU en Cs y C01	105
Tabla A.3 Caracterización de RSU C02	106
Tabla A.4 Caracterización de RSU en C03	107
Tabla B.1 Índice de disposición.....	108
Tabla B.2 Valores de alimentación MMB	109
Tabla B.3 Caracterización de celdas.....	110
Tabla B.4 Caracterización de celdas MODUELO.....	111
Tabla B.5 Muestreo en campo	116

Tabla B.6 Caracterización hidrológica.....	117
Tabla B.7 Modelo meteorológico.....	119
Tabla B.8 Resultados de simulación Cs.....	120
Tabla C.1 Estimaiones de biogás.....	121
Tabla C.2 Comparativa C01	124
Tabla C.3 Comparativa C02.....	126
Tabla C.4 Comparativa C03.....	128
Tabla D.1 Volumen de biogás generado MMB y MODUELO Sin y Con recirculación de lixiviados (M_S_R y M_C_R).....	130
Tabla D.2 Propiedades de tubería.....	135
Tabla E.1 Determinación de costos de equipo.....	138
Tabla E.2 Costos de inversión (Ejemplo con cuatro años).....	139
Tabla F.1 Valor presente neto con generación de electricidad	140
Tabla F.2 Valor presente neto con bonos de carbono.....	141

INTRODUCCIÓN

En México, la problemática derivada de los residuos sólidos urbanos (RSU), ha dado lugar a los rellenos sanitarios (RESA). Sin embargo, el resultado del confinamiento de los materiales orgánicos, produce una degradación tanto aerobia como anaerobia, además de escurrimientos de líquidos mezclados, mejor conocidos como lixiviados (SEMARNAT, 2013). El proceso anaerobio es aprovechado en diversos países como Alemania, Inglaterra, Estados Unidos, entre otros, para la obtención y utilización de biogás en la generación de energía eléctrica. Los lixiviados en ocasiones son llevados a recirculación para acelerar la degradación de la materia orgánica (MO) de los RSU (Sanchez *et al.*, 2012). Debido a la búsqueda de fuentes renovables para el aprovechamiento de energía se ha originado un interés en los RESA de México, tal es el caso de los RESA de Monterrey, Cancún y Saltillo (REB, 2010;SCS Engineers,2013). En el Estado de México se cuenta con 13 RESA (GEM, 2012); entre ellos se encuentra el ubicado en Zinacantepec, el cual está en estudio constante para su control y actualmente se encuentra en negociaciones para la implementación de un sistema de captación del biogás, para su aprovechamiento y reducción del daño ambiental.

Conforme a lo anterior, el objetivo de este trabajo fue la evaluación económica del escalamiento a campo de la Biodegradación Acelerada (BA) de RSU, utilizando información del RESA de Zinacantepec, Estado de México, con ayuda de software de modelación y simulación de RESA. En el presente trabajo se muestran los fundamentos donde se definen a los gases de efecto invernadero (GEI), el contraste de países productores de biogás, además del daño que provocan al ambiente. Se define a los RSU, los métodos de disposición final y los procesos de degradación. Posteriormente se define a los RESA y biorrelleno en sus diversas etapas. Se describe al escalamiento, modelación y simulación como herramienta de apoyo para la estimación de generación de biogás, mediante el uso de datos

bibliográficos y de campo. Finalmente se describen las etapas necesarias para realizar una evaluación técnico-económica del proyecto.

En la segunda parte se desarrolla la metodología propuesta a seguir, la cual está conformada por la recopilación de información tanto documental como de campo, siguiendo con el procesamiento de la misma que sirvió para generar la estimación de generación de biogás con ayuda del Modelo Mexicano de Biogás V2.0 (MMB). Posteriormente se realizó el escalamiento a campo con ayuda del MMB y el simulador MODUELO 4.0 (MODUELO), este último para la recirculación de lixiviados. Con los datos obtenidos de las estimaciones de biogás y de simulación, se utilizaron para comparar con trabajos similares y efectuar la selección de equipo, del cual se determinaron los costos de inversión y operación, finalizando con un análisis de sensibilidad que dio como resultado la mejor propuesta viable para el RESA de estudio.

En la tercer parte que corresponde a resultados, se presentan los datos obtenidos de la información bibliográfica y de campo, las caracterizaciones de RSU para cada celda y sus respectivas estimaciones preliminares de biogás conforme al MMB y MODUELO. También se incluyen los análisis técnicos y económicos, determinándose la factibilidad del proyecto. Por último se presentan las conclusiones y recomendaciones, seguidas de sus respectivos anexos.

1. FUNDAMENTOS

La fuente de energía más importante para que funcione el sistema climático es el Sol, pero existe otra fuente de cambio, que desde hace más de 100 años se viene estudiando y estos son los GEI que dan como resultado cambios en la temperatura del planeta. Este efecto se asocia con las actividades humanas desde la llamada Revolución Industrial. La combinación de estos dos procesos ha convencido a la mayoría de los científicos del mundo de que se está produciendo un cambio climático, cuyos efectos se han observado y seguramente se observarán no en millones de años, sino en decenas a cientos de años (Conde, 2007).

La variación de las concentraciones de GEI en la atmósfera, alteran el equilibrio energético del sistema climático (IPCC, 2007). Entre estos GEI se suman los generados por la descomposición de los RSU produciendo biogases que resultan desagradables no sólo por los olores que generan, sino que pueden ser peligrosos debido a su toxicidad o por su explosividad. Entre estos GEI destacan el bióxido y monóxido de carbono (CO_2 y CO , respectivamente), CH_4 , ácido sulfhídrico (H_2S) y compuestos orgánicos volátiles (COVs, como la acetona, benceno, estireno, tolueno y tricloroetileno) (SEMARNAT, 2006).

1.1 GASES DE EFECTO INVERNADERO

Los GEI se refieren a cualquier constituyente gaseoso de la atmósfera que tiene la capacidad de absorber y emitir radiación infrarroja. Estos gases pueden clasificarse en aquellos generados de manera natural o aquellos emitidos como resultado de las actividades antropogénicas. Entre estos gases los principales son el CO_2 , el vapor de agua, el ozono (O_3), el óxido nitroso (N_2O), CH_4 y los clorofluorocarbonos (CFCs) (INEGEI, 2002; SEMARNAT, 2013).

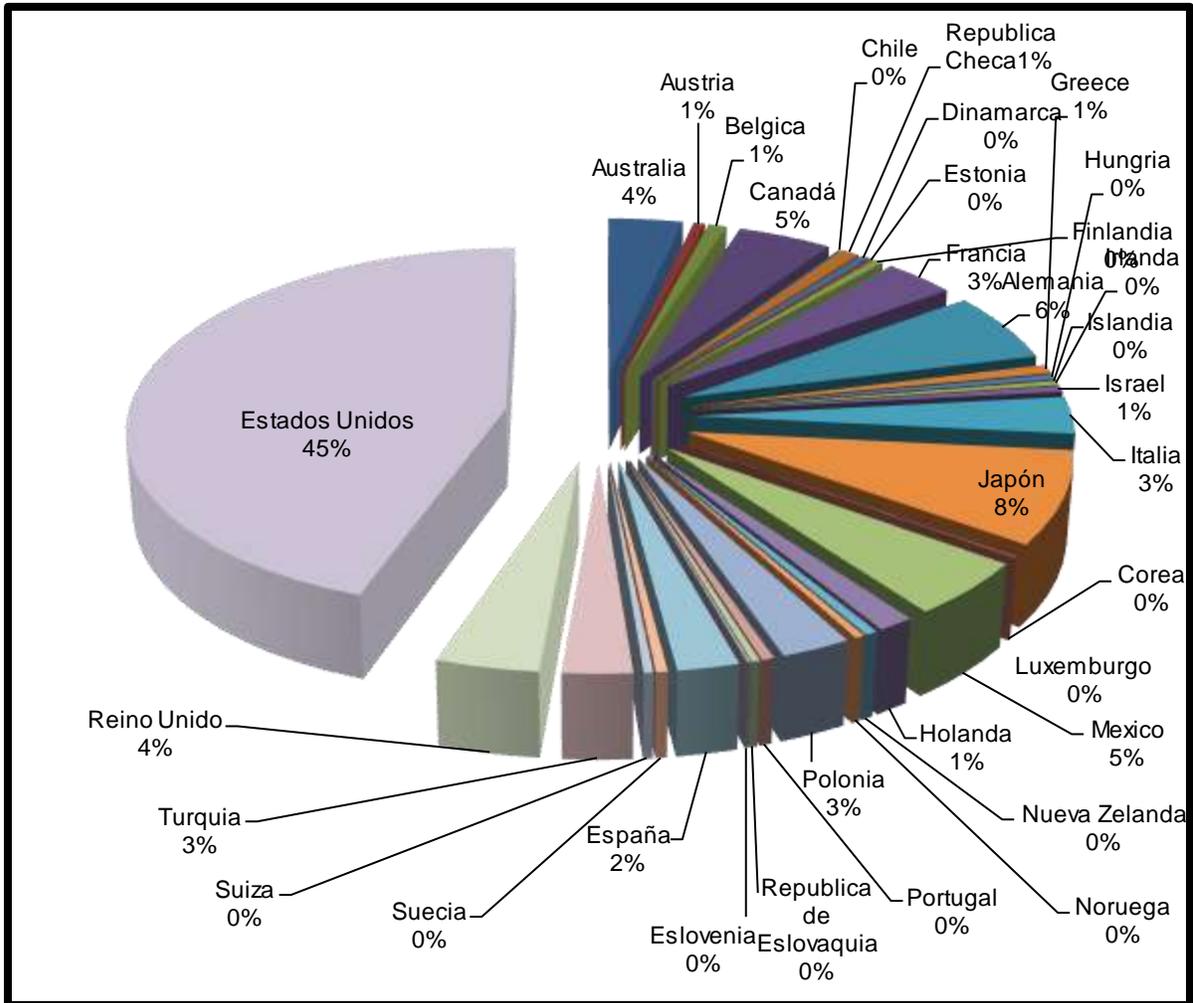
Las concentraciones atmosféricas de CO₂ y CH₄ en 2005 exceden con mucho el intervalo natural de valores de los últimos 650 000 años. Entre las posibles consecuencias de este calentamiento global están el aumento de la temperatura de los océanos, el deshielo de glaciares, la elevación del nivel del mar, el incremento en la frecuencia e intensidad de fenómenos climatológicos extremos, como sequías e inundaciones debido a una mayor evaporación de agua y superficies oceánicas más calientes, entre otros (IPCC, 2007).

El uso de combustibles fósiles y tecnologías industriales atrasadas, el cambio de uso del suelo y la destrucción de millones de hectáreas forestales están provocando un aumento en la concentración de los GEI en la atmósfera, generando una variación de la temperatura de 1 a 3°C. La mayor parte de este calentamiento observado en los últimos 50 años es atribuible a actividades antropogénicas (PEACC_BC, 2012).

1.1.1 Aportaciones mundiales

En cuanto a aportaciones mundiales de GEI, en el año 2010, se pueden observar en la figura 1.1 los países miembros de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE), los cuales aportaron en su conjunto 15 917 425,19 Gigagramos de CO₂ equivalente (Gg de CO₂e).

Estados Unidos con 6 802 224,51 Gg de CO₂e, es el principal emisor del grupo de la OCDE, representando el 45%, seguido por Japón con 1 257 981,87 Gg de CO₂e, que equivale al 8% y México, ocupa el quinto lugar con 748 252,25 Gg de CO₂e, que equivalen al 5% de la aportación de emisiones del grupo de la OCDE.



Fuente: OCDE, 2013.

Figura 1.1 Contribución porcentual de las emisiones de CO₂e en el año 2010.

De las aportaciones anteriormente mencionadas, los países de Latinoamérica (México, Colombia, Argentina, entre otros) suelen ocupar este tipo de emisiones para la obtención de Bonos de Carbono (BC). De acuerdo al INECC (2014), el término BC se ha dado como un nombre genérico a un conjunto de instrumentos que pueden generarse por diversas actividades de reducción de emisiones, dependiendo de la forma en que éstos fueron generados se dividen en:

- a) Certificados de Reducción de Emisiones (CER). Los países que inviertan en proyectos bajo el Mecanismo de Desarrollo Limpio, pueden obtener Certificados

de Reducción de Emisiones por un monto equivalente a la cantidad de CO₂e que se dejó de emitir a la atmósfera como resultado del proyecto. Para ello, el proyecto debió cumplir con los requisitos establecidos por el Consejo Ejecutivo del Mecanismo de Desarrollo Limpio.

- b) Montos Asignados Anualmente (AAU). Corresponde al monto total de emisiones de GEI que a un país se le permite emitir a la atmósfera durante el primer período de compromiso (2008-2012) del Protocolo de Kioto. Cada país divide y asigna su respectivo monto a empresas localizadas en su territorio a manera de límite de emisión por empresa.
- c) Unidades de Reducción de Emisiones (ERU). Corresponde a un monto específico de emisiones de GEI que dejaron de ser emitidas por la ejecución de un proyecto de Implementación Conjunta.
- d) Unidades de Remoción de Emisiones (RMU). Corresponde a créditos obtenidos por un país durante proyectos de captura de carbono. Estas unidades o créditos solamente pueden ser obtenidas por países del Anexo I del Protocolo de Kioto y pueden obtenerse también en proyectos de Implementación Conjunta. Las RMU solamente pueden ser usadas por los países dentro del período de compromiso durante el cual fueron generadas, y son para cumplir con sus compromisos de reducción de emisiones. Estos créditos no pueden ser considerados en períodos de compromiso posteriores.

Las transacciones de BC pueden ser desde una simple compra o venta de una cantidad específica de bonos, hasta una estructura de compra-venta con diversas opciones. Algunas de las opciones son las siguientes (INECC, 2014):

- a) Compras Spot. El precio del bono y la cantidad de bonos se acuerdan en la fecha del acuerdo de compra-venta pero la entrega y el pago del bono se realizan en una fecha futura cercana. Se puede considerar como si la compra-

venta ocurriera en el momento, aunque pasen unos días entre el pago y la entrega. Esto se hace para asegurar un precio conveniente para ambas partes y para reducir el riesgo de que el bono no se venda en el futuro.

- b) Contratos de entrega futura. Se acuerda la compra-venta de una cantidad específica de bonos al precio de mercado actual, pero el pago y la entrega se realizarán en fechas futuras, generalmente de acuerdo a un cierto calendario de entregas.

- c) Opciones. Las partes compran o venden la opción (el derecho a decidir) sobre si la venta se realizará o no en una fecha y a un precio pactados. De esta manera, el comprador tiene el derecho a comprar la cantidad de bonos ofrecida por el vendedor, pero no tiene la obligación de comprarlos una vez llegada la fecha acordada. Las condiciones de precio, cantidad y fecha de entrega de los bonos se acuerdan el día de elaboración del contrato, y también se acuerda una fecha que marca la fecha límite para que el comprador mantenga su derecho de compra. En este caso, el vendedor está a la expectativa y depende de la decisión del comprador, pero si la compra-venta se realiza, el comprador le pagará una cantidad adicional denominada premium.

Todas las operaciones de compra-venta en el comercio de BC están regidas por un contrato entre el comprador y el vendedor. No hay un valor oficial sobre el precio de una tonelada de CO₂ (tCO₂e) reducida o no emitida. Aunque algunas agencias multilaterales han establecido ciertos precios para los proyectos de reducción de emisiones financiados por ellas mismas. Por ejemplo, hasta 2005 el Banco Mundial empleaba un precio de \$5 dólares por tCO₂e no emitida, sin embargo el precio de la tonelada está sujeto a oferta y demanda de BC en el mercado. Dado que existen diferentes esquemas para el comercio de los BC y diferentes sitios del mundo donde se pueden comprar y vender, pueden existir

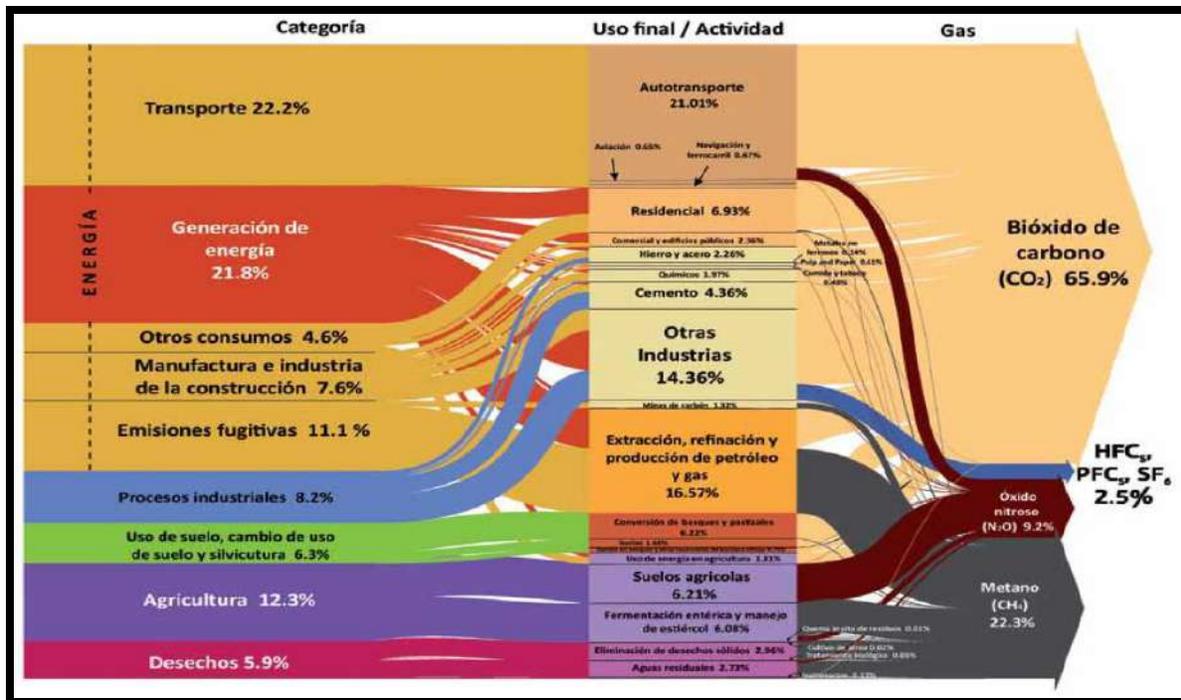
precios diferentes por cada tCO₂e. A continuación se enlistan dos ejemplos con datos a junio de 2005 (INECC, 2014):

- a) Chicago Climate Exchange: en operación desde diciembre del 2003; el precio ha fluctuado desde \$0.90 hasta los \$2.10 dólares por tCO₂e.
- b) European Climate Exchange Carbon: en operación desde abril del 2005; el precio ha fluctuado entre \$6.40 y \$19.70 euros por tCO₂e.

1.1.2 Aportaciones nacionales

Según datos del Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (INEGEI), las emisiones de GEI para el 2010 fueron de 748 252.20 Gg CO₂e y registran un incremento del 33.4% comparada con las emisiones de 1990, con una tasa de crecimiento media anual del 1.5%. Las contribuciones por categoría fueron las siguientes: Energía 67.3% (503 817.60 Gg), Agricultura 12.3% (92 184.40 Gg), Procesos industriales 8.2% (61 226.90 Gg), Uso de suelo, cambio de uso de suelo y silvicultura 6.3% (46 892.40 Gg) y Desechos 5.9% (44 130.80 Gg), como se muestra en la figura 1.2 (INEGEI, 2012).

En México se pretende implantar acciones tendientes a disminuir los efectos del cambio climático fomentando la eficiencia en la generación y uso de energía, incluyendo el transporte, las energías renovables y el uso de tecnologías de bajas emisiones en los procesos industriales, así como frenando la deforestación y reduciendo las emisiones de otros GEI (SEMARNAT, 2007).



Fuente: INEGI, 2012.

Figura 1.2 Emisiones de CO₂e por categoría y tipo de gas.

Así mismo, se reconoce al cambio climático como un problema global que requiere la acción de todos los países. Actualmente, se ubica a nivel mundial entre los 15 países principales emisores de GEI detrás de Estados Unidos, China, India, Japón, Brasil y varios países europeos. En ese sentido, se han establecido metas voluntarias de reducción de emisiones de GEI hacia el 2020, 2030 y 2050, mismas que se esperan alcanzar mediante acciones en eficiencia energética, como la sustitución de combustibles, uso de tecnologías bajas en carbono, modernización de infraestructura, servicios, captura de carbono, reducción de la deforestación, degradación de bosques y suelos, entre otras (PNUD, 2012). El 11 de diciembre de 2009 México se declara listo para asumir el compromiso de que, si se cuenta con el financiamiento y la transferencia de tecnologías necesarias, México tomará el compromiso de alcanzar una reducción, respecto de su tendencia de emisiones de GEI, de hasta 30 por ciento para el año 2020. Con este anuncio, México se

agregó al contexto mundial de metas de reducción de emisiones para el 2020 (INE, 2010).

Como resultado de la Décimo Sexta Conferencia de las Partes (COP16), celebrada en México en 2010, las partes formularon los llamados “Acuerdos de Cancún” que reconocen la necesidad de profundas reducciones en las emisiones globales de GEI para alcanzar la meta de 2°C. Considera aspectos de la mitigación como la medición, reporte y verificación, la reducción de emisiones de la deforestación, la degradación de los bosques en los países en desarrollo, así como el papel de la conservación, la gestión sustentable de los bosques y la mejora de los almacenes de carbono en los países en desarrollo (PNUD, 2012).

En el mismo sentido se señala en el Programa Especial del Cambio Climático (PECC) 2009-2012, que existe un gran potencial de reducción de emisiones, de manera que se establece una meta de reducción en la categoría de desechos de 5.5 millones de toneladas de CO₂e, lo que representa el 11% de la meta total de reducción del PECC al año 2012 (PECC, 2009). Sin embargo a inicios de 2012 solo se llegó al 1.05 millones de toneladas de CO₂e de reducción (INECC, 2012) incumpléndose la meta en cuanto a desechos.

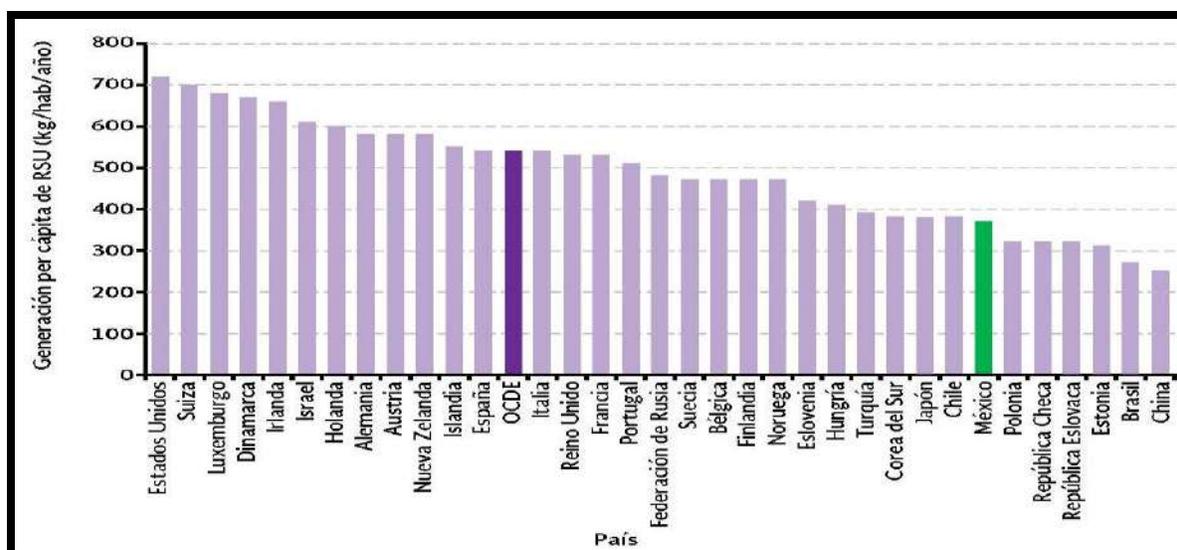
1.2 RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

En México la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) define a los residuos como aquellos materiales o productos cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentran en estado sólido o semisólido, líquidos o gases y que se contienen en recipientes o depósitos; pueden ser susceptibles de ser valorizados o requieren sujetarse a tratamiento o disposición final conforme a lo dispuesto en la misma Ley (LGPGIR, 2014). La

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) define a los RSU como los generados en las casas, resultado de la eliminación de los materiales que se utilizan en las actividades domésticas; son también los que provienen de establecimientos o la vía pública, o los que resultan de la limpieza de las vías o lugares públicos, como los domiciliarios. Su manejo y control es competencia de las autoridades municipales y delegacionales (SEMARNAT, 2013).

1.2.1 Generación de RSU

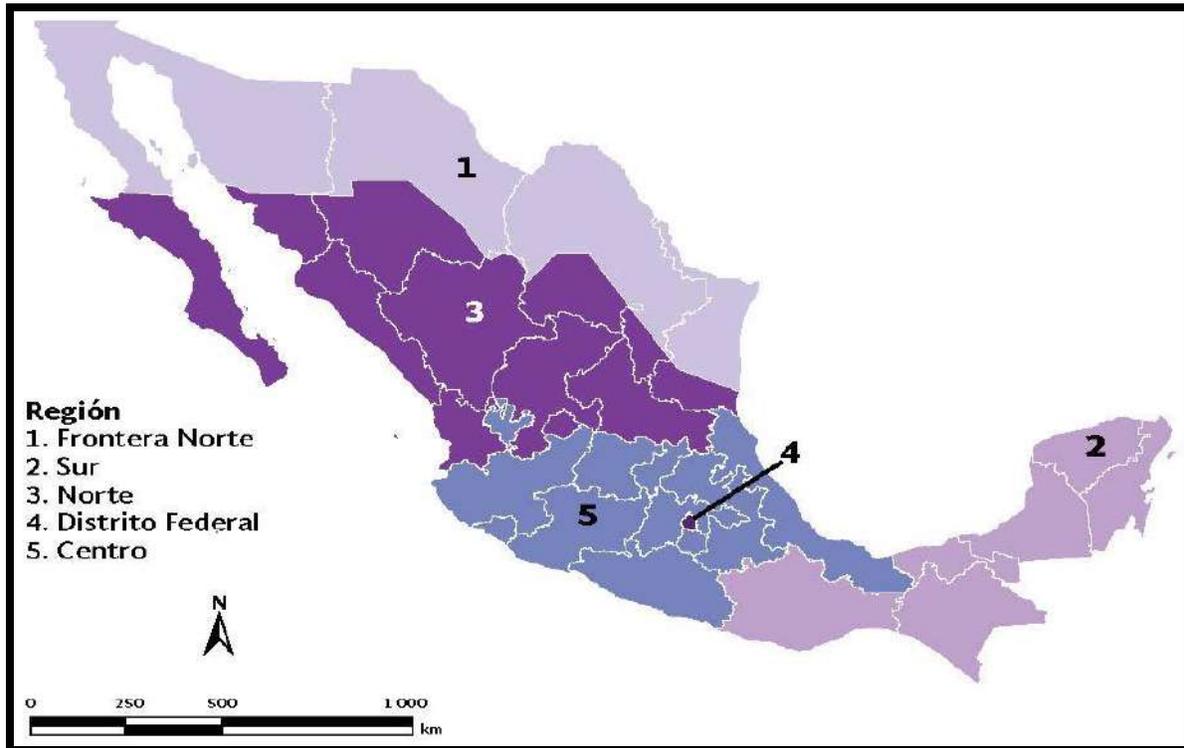
Considerando a los países de la OCDE en 2010, la generación de RSU per cápita nacional (370 kg/hab/año) resultó 31% menor al promedio de los países que la componen (540 kg/hab/año). En ese año, un ciudadano mexicano promedio generó 15% más RSU que un ciudadano polaco y menos del 68% del volumen producido por un habitante estadounidense promedio, como se presenta en la figura 1.3.



Fuente: OCDE, 2013.

Figura 1.3 Generación de residuos sólidos a nivel mundial.

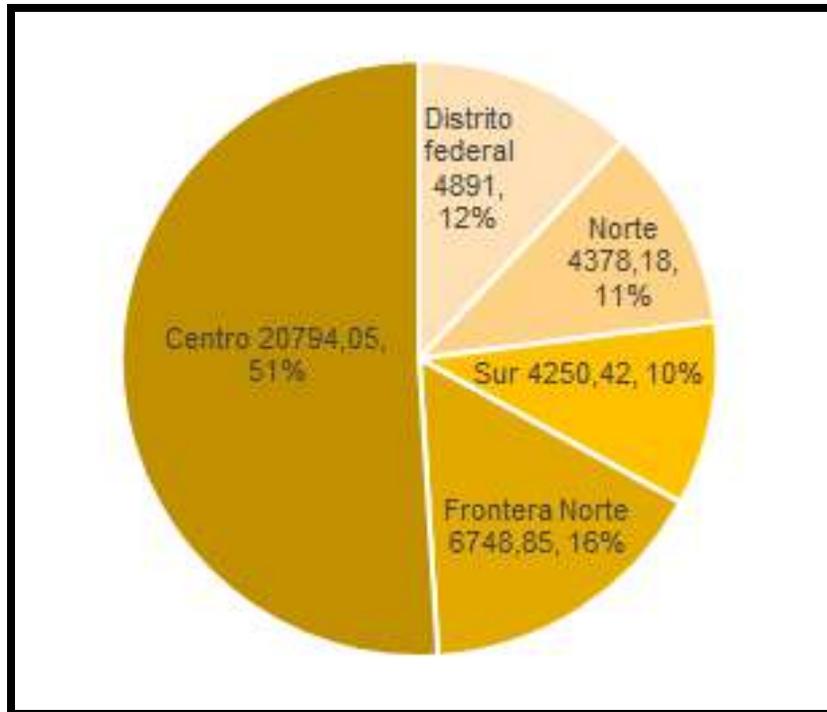
En el año 2011 se generaron en México alrededor de 41 millones de toneladas de RSU. La variación en la composición de los RSU depende de factores como el tipo de población, costumbres, hábitos, entre otros (Figura 1.4).



Fuente: SEMARNAT, 2013b.

Figura 1.4 Regiones geográficas de México conforme a generación de RSU.

Por entidad federativa, las que generaron los mayores volúmenes de RSU en 2011 fueron el Estado de México (16% del total nacional), Distrito Federal (12%), Jalisco (7%), Veracruz (5.5%) y Nuevo León (5%), mientras que las que registraron los menores volúmenes fueron Nayarit y Tlaxcala (cada una con 0.8%), Baja California Sur y Campeche (cada una con 0.6%) y Colima (0.5%; (SEMARNAT, 2013b). La figura 1.5 presenta la generación de RSU por región en el país.



Fuente: SEMARNAT, 2013b.

Figura 1.5 Generación de RSU por región (miles de toneladas).

1.2.2 Subproductos de la degradación

La composición de los RSU depende, entre otros factores, de los patrones de consumo de la población. Existe una correlación entre la composición de los RSU generados y las condiciones económicas de los países: aquéllos con menores ingresos generan menos y en sus componentes predomina la materia orgánica (MO), en contraste con los países con mayores ingresos (BID-OPS, 1997). El caso de México ilustra la transformación entre ambos tipos de economías: en la década de los 50, el porcentaje de MO en los RSU oscilaba entre 65 y 70% de su volumen, mientras que para 2012, esta cifra se redujo al 37.97%. En la fecha, 39.57% de los RSU generados eran potencialmente reciclables, en la tabla 1.1 se muestran los porcentajes de composición de RSU, destacando el papel y cartón, vidrio, plástico, metal y textiles.

Tabla 1.1 Composición de RSU

Categoría	Subproductos	Cantidad
Susceptibles de aprovechamiento 39.57%	Cartón	6.54%
	Papel	6.20%
	Material ferroso	2.09%
	Material no ferroso	0.60%
	Plástico rígido y de película	7.22%
	Envase de cartón encerrado	1.50%
	Fibras sintéticas	0.90%
	Poliestireno expandido	1.65%
	Hule	1.21%
	Lata	2.28%
	Vidrio de color	2.55%
	Vidrio transparente	4.03%
	Poliuretano	2.80%
Orgánicos 37.97%	Cuero	0.51%
	Fibra dura vegetal	0.67%
	Residuos alimenticios	25.57%
	Hueso	0.59%
	Residuos de jardinería	9.38%
	Madera	1.25%
Otros 22.46%	Residuo fino	3.76%
	Pañal desechable	6.52%
	Algodón	0.70%
	Trapo	3.57%
	Loza y cerámica	0.55%
	Material de construcción	1.46%
	Varios	5.90%
	Total	100.00%

Fuente: DBGIR, 2012.

Los RSU generan principalmente dos tipos de emisiones, las líquidas, mejor conocidas como lixiviados y las gaseosas, conocidas como biogás. Este último contiene GEI (CO_2 y CH_4 principalmente), los cuales contribuyen al calentamiento global (Luna et al., 2007). Los lixiviados son líquidos que se generan por la liberación del exceso de agua de los RSU y por la percolación de agua pluvial a

través de los estratos de éstos que se encuentran en fase de descomposición (Cruz *et al.*, 2001). Estos líquidos se caracterizan por contener concentraciones elevadas de contaminantes orgánicos e inorgánicos, incluyendo ácidos húmicos, nitrógeno amoniacal y metales pesados, así como sales inorgánicas y una gran variedad de microorganismos existentes en la biomasa de los RSU (López *et al.*, 2005; Wiszniowski *et al.*, 2006).

Por otra parte, el biogás tiene un poder calorífico medio de aproximadamente 4500 kcal/m³ pues contiene CH₄. El biogás representa la MO en proporciones que varían entre 10 y 40%, dependiendo de las formas y sistemas de control a los cuales esté sujeta su estabilización, ya sea en condiciones naturales o activadas por el hombre, puede ser aprovechado mediante la combustión en diferentes procesos como motores, lámparas de iluminación, quemadores domésticos e industriales, calderas y en sistemas de refrigeración, mediante tecnologías apropiadas que, además, aliviarían efectos ambientales adversos que produce cuando es descargado a la atmósfera sin una depuración adecuada (Hemández, 1996).

1.3 PROCESOS DE TRATAMIENTO PARA RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

En cuanto a tratamiento, los RSU se pueden incinerar o simplemente depositarlos en RESA sin tratamiento alguno, siendo estos últimos los más comunes para disposición final, donde la MO es degradada por los microorganismos que éstos contienen, generando GEI como el CH₄ y por su contenido de humedad o filtración de agua de lluvia en el RESA, se producen lixiviados (Nájera *et al.*, 2010).

En los RSU antes de su eliminación final requieren la aplicación de un pretratamiento, con el fin de facilitar su posterior procesamiento, estos incluyen trituración, cribado, compresión y otros procesos (Tchobanoglous et al., 1982). La degradación de los RSU se divide principalmente en química y física, la degradación química conduce a la disminución o eliminación, mientras que la degradación física modifica su estructura (SEMARNAT, 2013). Entre los tratamientos de eliminación se tiene el procesamiento térmico de los RSU, que se define como la conversión de los RSU en productos gaseosos, líquidos y sólidos fácilmente manejables para su disposición final, con la simultánea o subsiguiente emisión de energía en forma de calor. Los sistemas de procesamiento térmico pueden clasificarse respecto a sus requisitos de oxígeno, en incineración (combustión), gasificación y pirólisis. A continuación se muestran los principales procesos de tratamiento de los RSU según Tchobanoglous et al. (1994):

a) Incineración. La incineración es una tecnología ampliamente utilizada en países desarrollados de Europa (Alemania, Inglaterra, Francia, España, entre otros.), Estados Unidos, Canadá y Japón, siendo este último de los que mayor número de plantas tiene en operación. La incineración es el procesamiento térmico de los residuos mediante oxidación química con cantidades estequiométricas o en exceso de oxígeno; los productos finales incluyen gases calientes de combustión, nitrógeno, dióxido de carbono y vapor de agua (gas de chimenea) y rechazos no combustibles. La capacidad de incineración en todo el mundo en el año 2009 se ha situado en 350 millones de toneladas correspondiente a 2.180 instalaciones. Alrededor del 80% de esa capacidad se instaló en los últimos 10 años y la previsión para el 2014 es que la capacidad instalada alcance los 420 millones de toneladas (ECOPROG, 2012). Las mayores participaciones de RSU incinerados se observaron en Dinamarca (53%), Luxemburgo y Suecia (ambos 47%), Holanda (38%), Francia (36%), Alemania (35%) y Bélgica (34%). Por lo que respecta a México, a la fecha no funciona ninguna planta incineradora de RSU.

- b) Gasificación. Es el proceso de combustión parcial en donde un combustible se quema a propósito con una cantidad de aire menor al estequiométrico. Energéticamente es una técnica eficaz para reducir el volumen de los residuos sólidos con la recuperación de energía. La combustión parcial de material carbonoso da como resultado un combustible rico en gases con alto contenido de monóxido de carbono, hidrógeno y algunos hidrocarburos saturados, entre ellos el metano. El gas combustible puede quemarse en un motor de combustión interna, turbina de gas o caldera con cantidades adicionales de oxígeno.
- c) Pirólisis. Es el procesamiento térmico en ausencia de oxígeno. En ocasiones procesos de gasificación son llamados pirólisis. Ambos sistemas se utilizan para convertir los RSU en combustibles gaseosos, líquidos y sólidos. La diferencia principal consiste en que los sistemas de pirólisis utilizan una fuente de combustión externa para llevar a cabo las reacciones endotérmicas de pirólisis en un ambiente libre de oxígeno, mientras que la gasificación se realiza sin el aporte externo y utiliza oxígeno para la combustión parcial de los residuos. Tres son las fracciones que se obtienen como subproductos de la pirólisis: una corriente gaseosa (H_2 , CH_4 , CO principalmente), una fracción líquida (alquitrán o aceite conteniendo ácido acético acetona, metanol e hidrocarburos oxigenados complejos), además de coque inferior, que consiste de carbono y materia inerte presente en los RSU. En México no se ha aplicado esta tecnología.
- d) RESA. Es el sitio destinado para la disposición final de los RSU diseñado para minimizar la contaminación del aire, agua y suelo, así como los efectos negativos en la salud pública (Tchobanoglous *et al.*, 2005). De acuerdo con la NOM-083-SEMARNAT-2003 un RESA es una obra de infraestructura que involucra métodos y obras de ingeniería para la disposición final de los RSU y de manejo especial, con el fin de controlar, a través de la compactación e infraestructura adicional, los impactos ambientales. En 2011 se estimó que el

72% del volumen generado de RSU en el país se dispuso en RESA's (SEMARNAT, 2013b).

1.3.1 Relleno sanitario

Como se mencionó anteriormente, el RESA es una obra de infraestructura en relación con la disposición final de RSU, del cual se podrían proponer tres tipos para el confinamiento de los RSU (BVSDE, 2013):

- a) El RESA mecanizado es aquel diseñado para las grandes ciudades y poblaciones que generan más de 40 toneladas diarias. Por sus exigencias es un proyecto de ingeniería bastante complejo, que va más allá de operar con equipo pesado. Esto último está relacionado con la cantidad y el tipo de residuos, la planificación, la selección del sitio, la extensión del terreno, el diseño y la ejecución del relleno, y la infraestructura requerida, tanto para recibir los residuos como para el control de las operaciones, el monto y manejo de las inversiones y los gastos de operación y mantenimiento.
- b) El RESA semimecanizado se recomienda cuando la población genere o tenga que disponer entre 16 y 40 toneladas diarias de RSU, es conveniente usar maquinaria pesada como apoyo al trabajo manual, a fin de hacer una buena compactación de los RSU, estabilizar los terraplenes y dar mayor vida útil al relleno. En estos casos, el tractor agrícola adaptado con una hoja topadora o cuchilla y con un cucharón o rodillo para la compactación puede ser un equipo apropiado para operar este relleno.
- c) El RESA manual es una adaptación del concepto de relleno sanitario para las pequeñas poblaciones que por la cantidad y el tipo de residuos que producen (menos de 15 t/día), además de que por sus condiciones económicas, no están

en capacidad de adquirir el equipo pesado debido a sus altos costos de operación y mantenimiento.

Dentro de las obras de ingeniería requeridas para la realización de un RESA, se tiene entre sus principales componentes los sugeridos por Williams (2005); que también contempla la NOM-083-SEMARNAT-2003 (SEMARNAT, 2013b):

- a) La selección del sitio. No se deben ubicar los sitios dentro de áreas naturales protegidas, a excepción de los sitios que estén contemplados en el plan de manejo de éstas. No debe ubicarse en zonas de marismas, manglares, esteros, pantanos, humedales, estuarios, planicies aluviales, fluviales, recarga de acuíferos, arqueológicas; ni sobre cavernas, fracturas o fallas geológicas. La distancia de ubicación del sitio de disposición final, con respecto a cuerpos de agua superficiales con caudal continuo, lagos y lagunas, debe ser de 500 m como mínimo.
- b) La impermeabilización de las celdas. Es una restricción importante ya que garantiza la protección del agua subterránea y se puede lograr de forma natural o artificial (geomembranas). El valor mínimo del coeficiente de conductividad hidráulica de acuerdo a la NOM-083-SEMARNAT-2003 es de 1×10^{-7} cm/s, que equivale a que el agua se tarde en atravesar la barrera impermeable 31.7 años;
- c) La cobertura diaria de los RSU. Ésta ayuda al sellado por encima de los residuos, la cual debe de aplicarse diariamente para disminuir la creación de vectores (moscas, ratas, entre otros.), además de disminuir la infiltración de agua pluvial.
- d) El control de agua pluvial y lixiviado. Con el desarrollo de obras de captación se evita el ingreso de agua pluvial al RESA y la salida de agua contaminada fuera de este. En ocasiones se incluye una planta de tratamiento de lixiviados. Debe

construirse un sistema que garantice la captación de extracción de lixiviado generado en el sitio. El lixiviado se debe recircular en las celdas de residuos confinados en función a los requerimientos de humedad para la descomposición de los residuos, o bien ser tratado, o una combinación de ambas.

- e) El control de biogás. Una vez que la edad de los RSU propicie la generación de biogás y de no disponerse de sistemas para su aprovechamiento conveniente, se procederá a su quema ya sea a través de pozos individuales o mediante el establecimiento de una red con quemadores centrales. El control se lleva a cabo a través de obras que permiten el flujo de biogás de forma controlada; si no existe aprovechamiento de este se tiene que realizar la conversión a bióxido de carbono cuyo efecto invernadero es menor que el metano.

- f) La barrera de amortiguamiento. Es una distancia mínima de 10 m a la redonda del límite del predio de los rellenos, donde se debe dejar un espacio libre de residuos y acondicionado con diferentes obras que permitan limitar los impactos, esto es, que los contaminantes se queden dentro del RESA.

- g) Cobertura de RSU. Consiste en colocar a los RSU en capas delgadas compactadas que se cubren con tierra arcillosa para formar las celdas. En un tiempo de 2 a 3 meses se construyen nuevas celdas hasta alcanzar la capacidad máxima del RESA.

- h) Caminos de acceso. El terreno debe estar cerca de una vía principal, para que su acceso sea fácil y resulte más económico el transporte de los RSU y la construcción de las vías internas de penetración. Estas deben permitir el ingreso fácil, seguro y rápido a los vehículos recolectores hasta el frente de trabajo en todas las épocas del año.

- i) Operación. Los métodos de construcción son de área y trinchera. En algunos casos se utilizan dos métodos simultánea o secuencialmente.

- El relleno de área normalmente se emplea cuando se dispone de terrenos con depresiones y hondonadas naturales o artificiales. En este método, los RSU se depositan en la superficie, se compactan y se cubren con una capa de suelo compactado al término de las operaciones del día.
 - El método de trinchera es más práctico, ya que su operación es sencilla y la escasez de material de recubrimiento no produce problemas. En este método, se excava la trinchera, se esparcen y se compactan los residuos, después se cubre el suelo producto de la excavación de la trinchera y finalmente se compacta. Pueden excavarse varias trincheras y almacenar el material de cubierta o bien obtener el material diariamente. La profundidad de las trincheras depende del nivel de aguas freáticas y de las características del suelo (INE, 2001).
- j) Clausura. La clausura del RESA debe de entenderse como el sellado del área de un sitio de disposición final después de la suspensión definitiva de la recepción de RSU, debido al agotamiento de su vida útil, a sus efectos de contaminación al ambiente o bien a las molestias y daño a la sociedad. Por tanto esta acción no contempla ninguna acción de control ambiental, excepto la restricción de la entrada de residuos (NOM-083-SEMARNAT, 2003).
- k) Posclausura. Esta etapa está prácticamente orientada a la construcción de sistemas de control ambiental, e inicia una vez que los RSU han sido cubiertos en su totalidad. Las obras de control que se construyen durante esta etapa son sistemas de control de escurrimientos, sistemas de control de biogás y lixiviados, sistemas de monitoreo de aguas subterráneas, biogás, lixiviados, asentamientos diferenciales y estabilidad de taludes, colocación de suelo orgánico sobre cubierta del sitio de saneado, colocación de cubierta vegetal, colocación de una barrera vegetal, instalaciones para el mantenimiento y control (INE, 2001).

La capacidad del RESA se diseña según sea la cantidad en toneladas diarias que generen las poblaciones cercanas. Los residuos que entran en este proceso son RSU, industriales, comerciales, agrícolas, de construcción y demolición (NOM-083-SEMARNAT-2003). En la tabla 1.2 se listan las principales ventajas y desventajas del RESA.

Tabla 1.2 Ventajas y desventajas del RESA

Ventajas	Desventajas
Tecnología económica.	Existe un alto riesgo de posibles incendios por los gases que se generan (Biogás).
Generación de biogás aprovechable como fuente de energía.	Generación de lixiviados los cuales contaminan aguas subterráneas, ríos y suelos.
Una vez clausurado el RESA puede ser utilizado para otros fines como parques o viveros.	Tienen altos requerimientos de terrenos en cuanto al área y materiales de relleno.

Fuente: BVSDE, 2013.

1.3.2 Biorrelleno

Además de los RESA existe otra tecnología conocida como biorrelleno (bioRESA), el cual funciona para transformar rápidamente y degradar los residuos orgánicos. El aumento de la degradación de la MO y la estabilización se lleva a cabo a través de la adición de líquido y de aire para mejorar los procesos microbianos. El contenido de humedad es el factor más importante que promueve la descomposición acelerada, por lo que la tecnología del bioRESA se basa en el mantenimiento de contenido de humedad óptimo cerca de la capacidad de campo (aproximadamente 35 a 65%) y añade líquidos cuando es necesario para

mantener ese porcentaje. El contenido de humedad, combinada con la acción biológica aerobia o anaerobia de los microbios presentes en la naturaleza descomponen los residuos. Un efecto secundario del bioRESA es que produce biogás (Cruz et al., 2002). La descomposición y estabilización biológica de los residuos en un bioRESA requiere de un período de tiempo mucho más corto que un RESA tradicional y proporciona la disminución de los riesgos ambientales a largo plazo y los costos de pos clausura (Giraldo, 2001; Reinhart *et al.*, 2002).

Algunos estudios indican que el biorreactor aumenta la factibilidad para la recuperación rentable de biogás, que a su vez reduce las emisiones fugitivas. Esto presenta una oportunidad para su reutilización lucrativa de biogás en los proyectos de recuperación de energía. Actualmente, el uso de biogás (en los RESA tradicionales y RESA biorreactor) para aplicaciones de energía es sólo alrededor del 10 por ciento de su uso potencial (DuBois & Mercier, 2009). Existen tres tipos generales de diferentes configuraciones de biorrellenos (EPA, 2013):

- a) Aerobio. En un bioRESA aerobio, el lixiviado se elimina de la capa inferior, hacia tanques de almacenamiento y se recircula en el bioRESA de forma controlada. El aire se inyecta en los RSU con el uso de pozos verticales u horizontales, para promover la actividad aerobia y acelerar la estabilización de los RSU.
- b) Anaerobio. En un bioRESA anaerobio, se añade humedad a los RSU en forma de recirculación de lixiviados y otras fuentes para obtener los niveles de humedad óptimas. La biodegradación se produce en ausencia de oxígeno y se produce biogás, principalmente CH₄, el cual puede ser capturado para reducir al mínimo las emisiones de GEI y para proyectos de energía.
- c) Híbrido (aeróbico-anaeróbico). El bioRESA híbrido acelera la degradación de RSU mediante el empleo de un tratamiento aeróbico-anaeróbico secuencial que

degrade rápidamente la MO en las secciones superiores del vertedero y recoge el gas a partir de secciones más bajas. El funcionamiento como un híbrido da como resultado la aparición temprana de la metanogénesis en comparación con los vertederos aeróbicos.

Independientemente del tipo de bioRESA que se tenga en un lugar, para que las condiciones de humedad apropiadas se alcancen y mantenga, se pueden utilizar uno o varios de los siguientes cinco métodos de recirculación (Sunil *et al*, 2011):

- a) Pre-humectación. Este método humedece los residuos, es simple, eficiente y asegura la uniformidad, pero al mismo tiempo es incompatible con el cierre y causa conflictos en la compactación.
- b) Inyección vertical. Esta técnica utiliza tubos verticales o pozos para introducir lixiviados en la masa de residuos. Se facilita la recirculación de volúmenes relativamente grandes de lixiviado utilizando materiales de bajo costo y es compatible con el cierre. Sin embargo, crea problemas, debido a áreas de recarga limitados y la interferencia con la operación.
- c) Trincheras horizontales. Esta técnica consiste en dispositivos horizontales para introducción de lixiviados en las trincheras excavadas en los residuos. Tiene todas las ventajas de la inyección vertical, pero la contaminación biológica que limita el volumen y la subsidencia que afecta la integridad zanja es de principal preocupación.
- d) Estanques de superficie. Esto implica la eliminación de una o dos capas de los RSU, mientras que puede ser desfavorable en que puede recoger agua de lluvia, causar problemas de flotación de RSU, de olor y es incompatible con el cierre.

- e) Riego de rocío. promueve la evaporación y es flexible mientras que puede causar lixiviados de soplado y de nebulización, y es incompatible con el cierre.

Además de las ventajas y desventajas que se muestran en la tabla 1.3, varias consideraciones deben ser examinadas y comprendidas. Los biorrelenos generalmente son sistemas de ingeniería que tienen altos costos iniciales de capital, requieren seguimiento y control adicional durante su vida útil, pero se espera que implique menos control sobre la duración del período posterior a la clausura. Las cuestiones que deben cuidarse durante el diseño y la operación de un RESA biorreactor son el aumento de las emisiones de gases, aumento de los olores, la inestabilidad física de la masa de residuos debido al aumento de la humedad y la densidad, la inestabilidad de los sistemas de revestimiento, las filtraciones superficiales y los incendios (EPA, 2013).

Tabla 1.3 Ventajas y desventajas de bioRESA

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Se tiene una alta tasa de generación de metano. • El tiempo de estabilización de la materia orgánica se reduce de manera significativa. • Incrementa la vida útil y la capacidad del RESA. 	<ul style="list-style-type: none"> • La tecnología necesaria no ha sido desarrollada completamente. • Los costos de inversión y operación son muy altos.

Fuente: EPA, 2005.

1.4 ESTUDIOS DE GENERACIÓN DE BIOGÁS

El biogás se produce por procesos naturales o se puede generar controladamente, para controlarlo es necesario trabajar mediante un proceso llamado escalamiento.

El escalamiento es una herramienta importante ya que con ella se pueden reducir errores en diseños directos, debido a correlaciones inexactas o a la falta de información (Anaya *et al.*, 2008). Escalar un proceso, es convertirlo de su escala laboratorio a escala piloto, para finalmente llevarlo a su escala industrial o de campo. Por lo que el biogás puede ser controlado en los llamados digestores, que tienen como detonante común la circunstancia de que el proceso se desarrollará bajo condiciones técnicamente controladas.

1.4.1 Estudios a escala

Escalar un proceso o equipo es convertirlo de su escala de investigación (laboratorio o piloto) a escala industrial (campo). Por ejemplo; en un laboratorio de investigación se desarrolla un nuevo producto con valor comercial por medio de una reacción química usando equipo como frascos, matraces, mecheros, agitadores, etc. El ingeniero químico es el profesional capacitado para llevar este nuevo producto al mercado mediante el escalamiento; analizar las condiciones de reacción y los factores de influencia para definir los equipos necesarios (bombas, intercambiadores de calor, reactores, etc.) y proponer el proceso de producción en masa del producto (Anaya *et al.*, 2008).

En la escala laboratorio se obtienen la mayor cantidad de información con un mínimo de costo en el menor tiempo posible, siendo esta una de sus mayores ventajas (Prieto *et al.*, 1996). Se realiza en laboratorios de investigación, en esta etapa se investiga la formulación y desarrollo de productos nuevos. A continuación se describen algunos trabajos relacionados con el tema de escala laboratorio.

- a) Cossu *et al.* (2003), estableció las pruebas a escala laboratorio para investigar diferentes opciones para reducir las emisiones de los RESA a largo plazo y obtuvo el resultado de 0,22 L/min, para la velocidad de aireación.

- b) Ruo *et al.* (2005) realizó la recirculación de lixiviados con microorganismos eficaces (ME) demostrando que una combinación de ME y biorreactores mediante recirculación de lixiviados, podría ser una buena manera para aumentar la velocidad y la calidad de la producción de biogás, que puede ser usado para la generación de energía.
- c) Sinan *et al.* (2006) estudió el efecto de la recirculación de lixiviados en la degradación aeróbica y anaeróbica de RSU, determinada por cuatro biorreactores a escala laboratorio. Las opciones estudiadas y comparadas fueron la recirculación de lixiviados, aireación de vertedero y la aireación con recirculación de lixiviados. La diferencia principal se determina en la cantidad de lixiviados. La recirculación es más eficaz en la degradación anaerobia de los RSU, que de la degradación aeróbica. Recomiendan realizar más estudios para determinar las condiciones óptimas de recirculación de lixiviados y de aireación, también con los gastos de funcionamiento de la aireación y recirculación.
- d) Zhou *et al.* (2012) optimizó un biorreactor por lotes (ASBRL) para una mejor autorecirculación de lixiviados. Mediante la composición de RSU y variación de las características de lixiviados.

Por otro lado la escala piloto requiere de las partes específicas ensambladas que operan como un todo armónico, con el propósito de reproducir procesos productivos. En estos procesos intervienen fenómenos, simples o complejos, de interés para la ingeniería química, que permiten el análisis de las interacciones presentes en áreas de conocimiento y operaciones tales como la termodinámica, el flujo de fluidos, la transferencia de masa y energía, las reacciones químicas, la biotecnología, el control de procesos, entre otras. También facilita la posterior operación y aplicación a nivel industrial, sirve además para la confrontación de la teoría (modelos) con la práctica y la experimentación en las áreas del

conocimiento y operaciones antes mencionadas (Baasel, 1990). Algunos estudios realizados a esta escala son los siguientes:

- a) Ishigaki *et al.* (2003) utilizó una velocidad de aireación de 0,8 L/min en su reactor de 577 L de volumen de llenado, con 250 kg de residuos, con el fin de obtener información detallada sobre la estabilización aeróbica.

- b) Borglin *et al.* (2004), empleó reactores de 200 L con 30 kg de residuos sólidos para determinar las diferencias entre los tratamientos aeróbico y anaeróbico de RSU, con una tasa de aireación de 0,06 L/min.

- c) Sponza y Nuri (2004), observaron los efectos de la recirculación de lixiviado y la tasa de recirculación sobre el tratamiento anaeróbico de RSU en tres biorreactores anaeróbicos escala piloto tipo RESA. El cambio en el volumen de lixiviado recirculado desde 9 a 21 L durante el período de incubación experimental afectó a las concentraciones de CH₄ en los reactores, el aumento en las concentraciones de ácidos grasos volátiles (AGV) causó una disminución en las concentraciones de demanda química de oxígeno (DQO).

Por último la escala campo es la escala final en donde se lleva a cabo la implantación de un proyecto rentable. Para ello es necesario contar con estudios previos en la escala piloto y el costeo de equipos que pueden ser utilizados para el proceso. El concepto de escalamiento industrial en mayor grado es utilizado para caracterizar la evolución productiva e identificar los sectores o industrias que han mejorado su posición competitiva mediante la realización de las actividades más eficientes y de mejor manera, o cambiar hacia actividades o sectores de mayor valor (Gereffi, 2001). No siempre se realizan pruebas a esta escala por los grandes costos que conlleva realizarla. Entre los reportes a esta escala se tienen:

- a) Hernández *et al.* (2004) en su trabajo llamado “Seguimiento de la producción de biogás en un RESA clausurado”, menciona las cantidades generadas de biogás por m³ en el RESA “Prados de la Montaña”, el cual generaría alrededor de 1 mega watt (MW) de energía eléctrica. También señala las deficiencias en cuanto a normatividad en México.
- b) Morris *et al.* (2003) presentan los resultados con recirculación de lixiviados realizados a gran escala en las instalaciones municipales del RESA en Delaware, EE.UU. En este estudio compararon los criterios de estabilidad para la calidad de los lixiviados y la producción de gases, encontrando que las diferencias en la calidad del lixiviado no eran tan altas como se esperaba, probablemente debido a la eficiencia del sistema de recirculación de lixiviados o en la distribución de lixiviado a través del cuerpo de residuos en la celda de recirculación.
- c) Zhao *et al.*, (2008), observaron los efectos de la baja temperatura en la generación de biogás en una celda escala campo, en el norte de Oaks en Harrison, Michigan, EE.UU. Reportan que la temperatura llegó a ser el factor más importante que controla los procesos de descomposición biológica.
- d) Johann *et al.*, (2009), examinaron el flujo de agua y transporte de soluto en una celda a escala campo, comparando con reactores a escala laboratorio, obteniéndolo que el flujo de agua a escala campo es menos uniforme que en los reactores de laboratorio.

1.4.2 Estimación de generación de biogás

Es preciso aclarar que los RESA poseen dos fases en su vida útil: etapa de funcionamiento, cuando los RSU son depositados y degradados en estos sitios y etapa de clausura, cuando se alcanza la máxima capacidad de almacenamiento

de RSU (NOM-083-SEMARNAT, 2003). En su etapa de operación los RESA emiten una mayor cantidad de CH_4 con respecto a los clausurados, ésto se debe a que la degradación de la MO ocurre en su mayoría en los primeros años. La factibilidad de proyectos para el aprovechamiento del biogás en los RESA's depende de estimar, con una certidumbre razonable, tanto la producción diaria como la producción acumulativa de CH_4 en el largo plazo (Aguilar *et al*, 2011). Para calcular estas cantidades de CH_4 se utilizan métodos de modelación y simulación.

Un modelo de un sistema se define como un conjunto de ecuaciones que representan el sistema con precisión (Ogata, 2003). Entre más detalles abarque el modelo del proceso en forma explícita, mayor es la semejanza con un sistema real, también es más complejo y se posee más precisión, pero se requiere de mayor cantidad de información, por lo que no resultan económicamente adecuados, además de que no existen un gran número de ellos para el caso de los RESA. Para el correcto funcionamiento del modelo se deben considerar los siguientes elementos:

- a) Variables. Son parte fundamental para determinar cambios al modificar o incluir variaciones que puedan afectar el proceso (temperatura, presión, cantidad de RSU, entre otros).
- b) Parámetros. Se debe conocer la delimitación de los parámetros para determinar los alcances del modelo en comparación con el sistema real (constantes, valores preestablecidos, entre otros).
- c) Relaciones funcionales. Se determina si los resultados obtenidos o las funciones del proceso arrojan datos importantes o son aislados del sistema real (Relaciones entre variables y parámetros). Lo anterior da la pauta para

determinar el interés y el uso de la información del modelo. A continuación se definen algunos tipos de los modelos:

- Modelos Matemáticos. Se define como el empleo de un modelo de manera experimental o de ensayo traducido a un código matemático o estadístico.
- Modelos Empíricos. También llamados de correlación, se emplean al no poder utilizar un modelo teórico, se realizan ensayos sobre variables en el proceso para predecir su comportamiento.
- Modelos Físicos. Se realiza la fabricación a una menor escala de un sistema para simular la parte geométrica, de uso, mantenimiento, entre otros requerimientos. Los datos se obtienen de manera auxiliar con modelos como el matemático, empírico, meteorológico, o en conjunto.

Entre los modelos existentes para estimación de generación de biogás se describen a continuación los más importantes:

- a) Modelo EPA v.302 de 2005. El ajuste del modelo EPA es un ejercicio que debe soportarse en la práctica experimentalmente, y necesita la caracterización desagregada de los RSU, para precisar su humedad y el porcentaje de sus diferentes fracciones, con base en los criterios de: degradación rápida, como restos de comida, residuos verdes, animales muertos y lodos; degradación mediana, como papel; degradación baja, como madera y textiles, además de material inorgánico no biodegradable, como vidrio, metales (EPA, 2005).
- b) Landfill Gas Emission Model. Es una herramienta utilizada para estimar tasas de emisión de sitios de disposición de RSU. Su acrónimo es "LandGEM" es uno de los modelos que se basa en una ecuación de descomposición con cinética

de primer orden para la cuantificación las emisiones derivadas de la descomposición de RSU biodegradables. El modelo se utiliza para estimar las tasas de emisión total de gases de RESA como el CH₄, el CO₂, compuestos orgánicos volátiles, y otros contaminantes atmosféricos asociados (EPA, 2005).

- c) Modelo Microgen-mgm. Este modelo simula procesos biológicos y fisicoquímicos que tienen lugar dentro de un RESA, puede estimar la respectiva tasa de producción de CH₄. Microgen utiliza las ecuaciones de modelo basadas en el crecimiento microbiano, para describir la dinámica del ecosistema del RESA (Camargo *et al.*, 2009).
- d) Modelo de Scholl Canyon. Es un modelo de degradación de primer orden. Asume que se llega al máximo de la producción después de la fase inicial de estabilización, mientras se equilibran las condiciones anaerobias y las poblaciones de microorganismos dentro del RESA. Después la tasa de producción de biogás decrece debido a la disminución de la fracción orgánica (FO) de los RSU en el RESA. Este procedimiento se encuentra descrito por la ecuación (Tiago *et al.*, 2009):

$$Q_{CH_4i} = k(L_0)(m_i)e^{-kt_i} \quad 1.1$$

Dónde:

Q_{CH_4i} = metano producido en el año i desde la sección "i" del residuo

k = constante de generación de metano

L_0 = potencial de generación de metano

m_i = masa de residuo dispuesto en el año i

t_i = años después del cierre

- e) Modelo mexicano de biogás. El método utiliza una ecuación de degradación de primer orden (Ecuación 1.2), que asume que la generación de biogás llega a su máximo después de un periodo de tiempo ubicado antes de la generación de

CH₄ y que este período es de un año, contado desde la colocación de los RSU hasta la generación de biogás; además, que por cada unidad de RSU, después de un año de disposición de los RSU, la generación disminuye exponencialmente mientras se consume la FO de los RSU (Córdoba *et al.*, 2009):

$$Q_M = \sum_{i=1}^n 2kL_0M_i e^{-kti} \quad 1.2$$

Dónde:

Σ = La suma desde el año de apertura +1 (i=1) hasta el año de proyección (n)

Q_M = Generación máxima de biogás (m³/año)

k = Índice de generación de metano (años⁻¹)

L_0 = Generación potencial de metano (m³/ton)

M_i = Masa de residuos sólidos dispuestos en el año i (ton)

t_i = Edad de los residuos dispuestos en el año i (años)

Este modelo requiere responder una serie de 24 preguntas y algunas subpreguntas; dependiendo de las respuestas a éstas el Modelo selecciona los valores para k , L_0 , factor de ajuste por incendios y eficiencia de captura. También desarrolla estimaciones de los índices de disposición anual, estos índices pueden ser modificados si se cuenta con la información, de manera que la captura de datos como caracterización, cantidades de RSU por año, apertura y cierre del RESA, entre otros; no interfiriera con los resultados generados. En esta parte la información sobre la ubicación por zona geográfica es importante (Figura 1.6), debido a que este software considera las condiciones climatológicas para asignar los valores de k y L_0 . Además de la información geográfica, el Modelo toma en cuenta cuatro categorías de degradación para asignar valores de k y L_0 , lo cual se presenta en las tablas 1.4 y 1.5 respectivamente. Las categorías de degradación son residuos de degradación

muy rápida (RDMR), de degradación rápida (RDR), de degradación moderadamente lenta (RDML) y de degradación lenta (RDL).



Fuente: SCS Engineers , 2009.

Figura 1.6 Regiones climáticas de México

Tabla 1.4 Valores del índice de generación de CH₄ (*k*)

Categoría de residuos	Región 1 Sureste	Región 2 Oeste	Región 3 Centro/ Interior*	Región 4 Noreste	Región 5 Noroeste & Interior Norte
RDMR	0.30	0.22	0.16	0.15	0.10
RDR	0.13	0.10	0.07	0.07	0.05
RDML	0.05	0.04	0.03	0.03	0.02
RDL	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01

Fuente: SCS Engineers , 2009.

Tabla 1.5 Valores de la generación potencial de CH₄ (*L₀*)

Categoría de residuos	Región 1 Sureste	Región 2 Oeste	Región 3 Centro/ Interior*	Región 4 Noreste	Región 5 Noroeste & Interior Norte
RDMR	69	69	69	69	69
RDR	115	126	138	138	149
RDML	214	214	214	214	214
RDL	202	202	202	202	202

Fuente: SCS Engineers , 2009.

El Modelo aplica ecuaciones separadas para calcular la generación de cada uno de los cuatro grupos de residuos orgánicos agrupados de acuerdo a su índice de degradación:

- a) Residuos de degradación muy rápida. Consta de residuos alimenticios, otros orgánicos y 20% de los pañales.
- b) Residuos degradación moderadamente rápida. Son los residuos vegetales, poda de casas, parques municipales y papel higiénico.
- c) Residuos degradación moderadamente lenta. Principalmente papel, cartón y textiles.
- d) Residuos degradación muy lenta. Los subproductos como madera, caucho. piel, huesos y paja.

En cuanto a la eficiencia de captura de biogás se requiere ingresar los índices de disposición anual, índices de recuperación de biogás actuales y la línea base de recuperación de biogás. Si la información actual de la recuperación de biogás está disponible, también se podrá hacer ajustes a las estimaciones automatizadas de eficiencia de captura, para que las proyecciones de recuperación coincidan con los valores actuales de recuperación, si es que se cuenta con ellos.

Además el Modelo requiere la información de caracterización de los RSU específica del sitio para conocer el tipo de degradación que pueda tener. En caso de no contar con datos reales es posible utilizar información documental para que el modelo presente los resultados de generación de biogás en forma tabular y poder observarlos en forma gráfica.

La EPA reconoce que es difícil modelar la generación y recuperación de biogás en forma exacta debido a las limitaciones en la información disponible para alimentar cualquier modelo, sin embargo, con la construcción y operación de nuevos RESA, la disponibilidad de nueva información hará posible la calibración del modelo y el desarrollo de mejores valores de k y L_0 (EPA, 2013).

1.4.3 Simuladores de procesos

Por otra parte la simulación se define como una técnica numérica empleada para realizar experimentos con cierto tipo de modelos matemáticos que describen el comportamiento de un sistema en una computadora, durante períodos prolongados y estudia su comportamiento temporal, variando simultáneamente grupos de variables, tal como sucedería en la realidad. Incorporando los valores obtenidos en los sistemas de ecuaciones del modelo matemático se obtiene información acerca de la evolución del estado del sistema representado como si el fenómeno hubiese acontecido realmente. Así, una simulación en ordenador es un experimento, sólo que se realiza con un modelo del sistema real y no con la realidad propiamente dicha (Naylor, 1982).

El rápido crecimiento del mundo de las computadoras ha hecho que la simulación de procesos sea una valiosa herramienta de trabajo, hasta tal punto que hoy en día existen empresas dedicadas exclusivamente a confeccionar (simuladores) para simular cualquier proceso. El proceso de simulación incluye recolección de datos, asignación de números aleatorios, formulación del modelo de análisis. Se divide en cualitativa, cuantitativa, estado estacionario, dinámica y de eventos (Costa, 1998).

La simulación es la mejor alternativa de observación. Permite recopilar información pertinente acerca del comportamiento del sistema al paso del tiempo. La simulación no es una técnica de optimización, más bien se usa para estimar las mediciones del desempeño de un sistema de modelado (Taha, 2004). A continuación se describen algunos de los programas existentes para simular procesos ambientales y químicos:

- a) MODUELO. es un programa de simulación de RESA, que se compone principalmente de tres modelos: hidrológico, biodegradación y asentamientos. Incluye modelos simplificados, desarrollados a partir de otros encontrados en la literatura o bien, desarrollados específicamente para el programa. Una de las principales características de la herramienta es que representa el RESA en tres dimensiones, simula su funcionamiento y estrategias de operación a lo largo del tiempo. Desde 1998, hasta Noviembre de 2013, se han desarrollado cuatro versiones del programa, utilizándose esta última versión para las simulaciones. Se debe cuidar principalmente las condiciones climatológicas, hidrológicas, de biodegradación, asentamientos y la capacidad de recirculación de lixiviados. Conforme a las características que se le asignen, el software establece límites y emite resultados. (Gonzalorena *et al.*, 2011).

- b) CHEMCAD. Es un simulador de procesos de alto nivel aplicable a muchos procesos industriales, al igual que otros simuladores comerciales, incluye una serie de opciones termodinámicas para las muchas y distintas aplicaciones para las que está diseñado un simulador, es una herramienta informática que permite diseñar o modelar procesos químicos mediante la ayuda de un software, utilizado para simular procesos en estado estacionario y dinámico, por ejemplo, procesos químicos, farmacéuticos, alimenticios, entre otros. Posee herramientas que nos permite estimar propiedades físicas, equilibrios líquido-vapor y la simulación de muchos equipos de Ingeniería Química. Se requiere introducir información específica en cuanto a condiciones iniciales de

operación y sistema de unidades, balances de masa y energía, para que el dimensionamiento de equipo sea coherente (Valderrama *et al*, 2003).

- c) HYSYS. Aspen HYSYS es una herramienta de modelado de procesos para el diseño conceptual, la optimización, planificación empresarial, gestión de activos, y la supervisión del rendimiento de producción de petróleo y gas, procesamiento de gas, refinado de petróleo y las industrias de separación de aire, a diferencia de los simuladores anteriores es útil para los tipos de simulación tanto dinámica como en estado estable (Martínez, 2000).

1.5 EVALUACIÓN ECONÓMICA

La evaluación económica tiene por objetivo identificar las ventajas y desventajas asociadas a la inversión en un proyecto antes de la implementación del mismo (Czinkota, 2007). Para su realización Ulrich (2004), menciona que se necesitan las siguientes etapas:

- a) Concepción y definición. En la concepción y definición deben establecerse los objetivos y alcances del proyecto, con lo puede terminarse parcialmente y por adelantado una serie de discusiones. Se debe definir la filosofía del mismo, por ejemplo, ¿Qué tan precisos deben de ser los resultados?
- b) Desarrollo de diagrama de flujo. Después de haber concebido, definido y asignado el problema, la solución del mismo rara vez es obvia. Frecuentemente hay numerosas posibilidades, aun con estas incertidumbres, en general es posible determinar un diagrama de flujo de proceso, el cual es una representación gráfica de los pasos que seguimos para realizar un proceso; partiendo de una entrada y después de realizar una serie de acciones se llega a una salida. El diagrama de flujo presenta información clara, ordenada y concisa

de un proceso, está formado por una serie de símbolos unidos por flechas, cada símbolo representa un equipo y las flechas entre ellos representan el orden de realización de las operaciones unitarias. Al generar un diagrama de flujo se deben hacer suposiciones que pueden reducir la complejidad del problema y se identifican donde falta información. Si se efectúa y se termina adecuadamente, el diagrama de flujo contendrá los datos necesarios para el diseño de partes individuales de equipo.

- c) Diseño de equipo. Para los estimados del prediseño, el equipo debe ser especificado rápidamente y sin gran detalle. Las técnicas de precisión necesarias para estos estimados son similares a las empleadas en operaciones unitarias, pero todos los detalles, deben especificarse hasta el grado de poder ordenar el equipo a algún vendedor o poder fabricarlo.

En el caso de los sistemas de recirculación de lixiviados y extracción de biogás, se necesita para su aprovechamiento equipos para la captación (cabezas de pozos), conducción (tubería), succión (bombas succionadoras), limpieza (condensadores, purificadores, filtros), quemado de excedentes (quemadores de piso o elevado) y dosificación de biogás (eliminadores de humedad). Para el dimensionamiento de cada uno de ellos el punto de partida son los flujos de lixiviados y biogás generados. Una vez dimensionado cada uno de los equipos que conforman el proceso, se podrá realizar su costeo, con lo que de manera conjunta se estimara el costo de capital.

- d) Análisis económico. La mayor parte de los estudios de posibilidades conducen a la misma pregunta ¿Qué recuperación puede esperarse del dinero invertido? Los costos del proceso deben combinarse con los de materia prima, mano de obra, equipo, y otros costos para proporcionar un estimado económico. El valor del dinero en el tiempo, la inflación, los impuestos y otros factores influyen en las ganancias, estos factores deben tomarse en cuenta y evaluarse de manera que tengan cierto significado.

Es frecuente confundir la evaluación económica con el análisis o evaluación financiera. En este segundo caso se considera únicamente la vertiente monetaria de un proyecto con el objetivo de considerar su rentabilidad en términos de flujos de dinero. Mientras que la evaluación económica, integra en su análisis tanto los costos monetarios como los beneficios expresados en otras unidades, relacionadas con las mejoras en las condiciones de vida de un grupo, con lo que se puede hablar entonces de rentabilidad o beneficios de tipo social (Torrance, 1991).

El análisis económico involucra la estimación previa de costos, específicamente de los costos de inversión y operación. Por lo tanto es de suma importancia poder calcular con la mayor exactitud el costo que representaría la realización del proyecto. Sin embargo se debe de reconocer que los datos de experiencias semejantes constituyen un elemento útil para estimar los costos futuros (Corzo, 1977). A continuación se definen los costos de inversión y operación:

- a) Costo de inversión. El costo de un bien lo constituye el conjunto de esfuerzos y recursos que han sido invertidos con el fin de producirlo. La inversión está representada en tiempo, en esfuerzo o en sacrificio, a la vez que en recursos o en capital. El costo de inversión representa los factores técnicos que intervienen en la producción medible en dinero (UNAM, 2013). En el caso de un proceso, el costo de capital es la suma de los precios de equipos libre abordo (colocados en un lugar específico), materiales para instalación, mano de obra directa, flete , seguros, impuestos, gastos de construcción, ingeniería de contratista, imprevistos y honorarios, así como de instalaciones auxiliares, entre otros.
- b) Costo de operación. Son en los que incurre un sistema ya instalado o adquirido durante su vida útil, con objeto de realizar los procesos de producción e incluyen los necesarios para el mantenimiento del sistema. Dentro de los costos de operación más importantes se tienen los gastos técnicos y administrativos, alquileres y depreciaciones, obligaciones y seguros, materiales de consumo,

mano de obra, requerimientos de energía, capacitación y promoción, entre otros (Uriegas, 1987). Se deben de incluir todos los rubros que afectan en forma apreciable el costo, a un mediano nivel de precisión y todos referidos a un mismo año base. Existen varias formas (complejas y simples) de hacer un presupuesto de costos de operación, pero todas las formas se basan en el balance de masa y energía del proceso principalmente, que impactan los costos de materias primas, requerimientos de energía y mano de obra. Una de esas formas, que pertenece a las simples y que se caracteriza por tomar en cuenta los principales rubros, es la que consiste en proyectar los costos bases de operación a lo largo de los años de vida del proyecto, que en este caso será la vida útil proyectada de generación de biogás del RESA.

Como se mencionó anteriormente los datos de experiencias semejantes constituyen un elemento útil para estimar los costos futuros, es por eso que la Estimación Análoga (Top Down) es una herramienta que utiliza los valores de parámetros como el alcance, el costo, el presupuesto y la duración, o medidas de escala tales como el tamaño, el peso y la complejidad de un proyecto anterior similar, como base para estimar el mismo parámetro o medida para un proyecto actual (Miranda, 2004). Por lo general, la estimación de costos por analogía es menos costosa y requiere menos tiempo que las otras técnicas mencionadas por Ulrich (2004), pero también es menos precisa.

La estimación análoga es más confiable cuando el proyecto anterior es similar, no sólo en apariencia sino en los hechos. Puede aplicarse a todo un proyecto o a partes del mismo, y puede utilizarse en conjunto con otros métodos de estimación como la estimación paramétrica, la cual es un tipo de estimación que se usa cuando implementas proyectos que son similares unos a otros, proyectos con la misma tecnología, o proyectos en áreas funcionales similares (Sullivan *et al.*, 2004). Consiste en detectar variables clave del proyecto, indicadores, parámetros,

que son los principales determinantes del tamaño del proyecto esta utiliza una relación estadística entre los datos históricos y otras variables (por ejemplo los kW de un motogenerador) para calcular una estimación de parámetros de una actividad tales como costo, presupuesto y duración. Con esta técnica pueden lograrse niveles superiores de exactitud, dependiendo de la sofisticación y de los datos que se utilicen. (Snijders *et al.*, 2014).

En las tablas 1.6 y 1.7 se presentaran como ejemplos los costos presupuestarios y los principales factores a considerar para la estimación económica para plantas de energía con motor de combustión interna en algunos países a partir de biogás generado en RESA.

Tabla 1.6 Costos de inversión en Argentina

Detalle	Costo total estimado (USD*)
Movilización y gestión del proyecto	\$ 80 000
Construcción y obra en la planta (incl. tuberías)	\$ 80 000
Equipo de medición y registro de biogás	\$ 35 000
Genset de 820 kW que funciona con biogás	\$ 870 000
Subestación de la planta (interruptor principal, transformador elevador)	\$ 200 000
Interconexión eléctrica (1/2 km @ 13,2 kV)	\$ 150 000
Prueba de fuente	\$ 25 000
Ingeniería/Contingencias (~10% de otros costos)	\$ 216 000
Costo total estimado	\$ 1 656 000

Fuente: SCS Engineers, 2007. *USD: Dolar estadounidense.

Tabla 1.7 Costos de inversión en Colombia

Detalle	Costo total estimado (USD)
Movilización y gestión del proyecto	\$ 160 000
Construcción y obra en la planta (incl. tuberías)	\$ 120 000
Equipo de medición y registro de biogás	\$ 35 000
Genset de 1.600 kW que funciona con biogás	\$ 1920 000
Subestación de la planta (interruptor principal, transformador elevador)	\$ 275 000
Interconexión eléctrica (2 km)	\$ 250 000
Prueba de fuente	\$ 25 000
Ingeniería/Contingencias (~10% de otros costos)	\$ 420 000
Costo total estimado	\$ 3 205 000

Fuente: SCS Engineers, 2008.

En la tabla 1.8 se presenta un resumen de los costos presupuestarios de los últimos años, para plantas de energía con motor de combustión interna en México a partir de biogás generado en RESA.

Tabla 1.8 Costos de proyectos de inversión en México

Lugar	Año	Costo (Pesos)	Tipo	Capacidad (MW)
Saltillo ^a	2013	\$ 97 641 626	Realizado	2.12
Cancún ^b	2013	\$ 36 632 420	Realizado	0.633
Nogales ^c	2009	\$ 48 383 199	Análisis	2
Ensenada ^d	2007	\$ 25 124 600	Análisis	0.337
Nuevo Laredo ^e	2006	\$ 44 654 000	Análisis	1.7
Monterrey ^f	2003	\$ 228 000 000	Realizado	15.9

Fuente: ^aSCS Engineers, 2013; ^bIncremi, 2013; ^cCOCEF, 2009, ^dSCS Engineers, 2007; ^eSCS Engineers, 2006; ^fRMB, 2010.

En la tabla 1.9 se presentan solo los costos presupuestarios para planta de energía con motor de combustión interna del proyecto realizado en el RESA de Cancún a partir de biogás generado (no incluye sistema de recolección y combustión del biogás).

Tabla 1.9 Costo de proyecto Saltillo

Detalle	Costo total estimado (USD)
Movilización y gestión del proyecto	\$ 77 000
Construcción y obra en la planta (incl. tuberías)	\$ 150 000
Equipo de medición y registro de biogás	\$ 40 000
Motogenerador de 633 kW que funciona con biogás	\$ 759 600
Subestación de la planta (interruptor principal, transformador elevador)	\$ 150 000
Interconexión eléctrica	\$ 150 000
Prueba de fuente	\$ 30 000
Ingeniería/Contingencias (~10% de otros costos)	\$ 200 000
Costo total estimado	\$ 1 556 600

Fuente: SCS Engineers, 2013.

1.6 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad consiste en calcular los nuevos flujos al cambiar una variable (la inversión inicial, la duración, los ingresos, la tasa de crecimiento de los ingresos, los costes, entre otros). El objetivo del análisis de sensibilidad es identificar el nivel de significancia de las variables dentro del modelo, con el propósito general de identificar aquellas relativamente sensibles, que no pueden modificarse mucho sin cambiar la solución óptima, de manera que se estimen con mayor precisión y seleccionar entonces una solución que siga siendo buena sobre

los intervalos de valores probables. Para ciertos datos que no están clasificados como sensibles, también puede resultar de gran utilidad determinar su intervalo de valores para el que la solución óptima no cambie (González & Ángel, 2003).

Para la toma de decisiones entre alternativas de inversión de capital se pueden utilizar diferentes métodos de ingeniería económica entre los cuales se tiene (Morales, 2006):

a) Retorno de Inversión (RI). Se utiliza al momento de evaluar un proyecto de inversión y sirve para determinar la rentabilidad de una propuesta. Para que una inversión sea rentable, se debe esperar recibir más dinero que el invertido. En la ecuación 1.3 se muestra que si el RI es positivo, significa que la inversión es rentable, pero si es menor o igual que cero, significa que se está perdiendo dinero, por lo tanto la inversión no es rentable.

$$RI = (\text{Utilidad neta o Ganancia} / \text{Inversión}) \times 100 \quad 1.3$$

b) Valor Presente Neto (VPN). Es el valor equivalente al año cero de una serie de flujos de efectivo, se convierte en valor de ahora los gastos e ingresos futuros, tomando en cuenta el valor del dinero en el tiempo (Ecuación 1.4).

$$VPN = \text{Flujo de Efectivo} / (1 + \text{Tasa de Interés})^{\text{Periodo}} \quad 1.4$$

c) Rango Costo Beneficio (RCB). Se usa con frecuencia para evaluar un proyecto con relación a su costo. Toma los ingresos y egresos presentes netos (Ecuación 1.5), para determinar cuáles son los beneficios por cada dinero invertido en el proyecto, además es un indicador que mide el grado de desarrollo y bienestar que un proyecto puede generar. Si el resultado es mayor que 1, significa que los ingresos netos son superiores a los egresos netos. Si el

resultado es igual a 1, los beneficios igualan a los sacrificios sin generar riqueza alguna. Por tal razón sería indiferente ejecutar o no el proyecto (Charles *et al.*, 2007).

$$\text{RCB} = \text{Ingresos} / \text{Egresos}$$

1.5

2. PARTE EXPERIMENTAL

En el diagrama de bloques de la figura 2.1 se presenta la metodología del proyecto. Las actividades que comprende cada bloque se describen en los siguientes apartados.

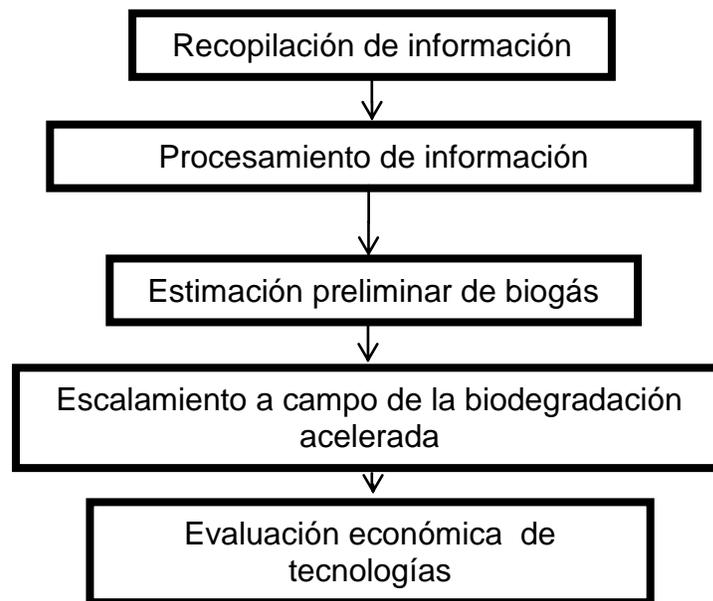


Figura 2.1 Diagrama de bloques de la parte experimental

2.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

La recopilación de información consistió en la búsqueda, recolección, selección, organización y comprensión de los datos requeridos, para lo cual fue importante además de realizar la búsqueda de información documental, dirigirse al registro de los hechos y mediante información de campo conocer y analizar los factores que afectaban la operación del RESA de Zinacantepec.

2.1.1 Información documental

La información documental se centró en recopilar artículos de trabajos realizados tanto a nivel nacional e internacional, a diferentes escalas (laboratorio, piloto y campo) sobre la factibilidad de la BA y la producción de energía eléctrica a partir de biogás, además de las normas aplicables, tecnologías relativas a los RESA, bioRESA e información cronológica del sitio, así como información geográfica y climatológica de la región.

2.1.2 Información de campo

La información de campo comprendió tanto las condiciones de operación del sitio, como la caracterización fisicoquímica de los RSU depositados, lixiviados y biogás generados. En cuanto a la operación del sitio se ubicaron los pozos de venteo y las celdas de depósito de los RSU mediante un sistema de posicionamiento global (GPS), se realizaron visitas periódicas para corroborar la cantidad dispuesta de los mismos. Así mismo se observó el proceso de compactación y colocación material de cobertura diaria. Para la caracterización físico-química de los RSU y lixiviados se realizaron muestreos en época de estiaje de acuerdo a las normas técnicas y métodos que se listan en las tablas 2.1 y 2.2.

Tabla 2.1 Normas y métodos para caracterización de RSU

PARÁMETRO	NORMA MEXICANA Y MÉTODO
Método del cuarteo	NMX-AA-015-1985 ^a
Peso específico	NMX-AA-019-1985 ^a
Caracterización de subproductos	NMXAA-022-1985 ^a

Fuente: ^a SEMARNAT, 2013; ^b APHA, 2005.

Tabla 2.2 Normas y métodos para caracterización de lixiviados

PARÁMETRO	NORMA MEXICANA Y MÉTODO
pH	NMX-AA-008-SCFI-2011 ^a
Conductividad Eléctrica	NMX-AA-093-SCFI-2000 ^a
Sólidos totales y sólidos volátiles (ST,SV)	NMX-AA-034-SCFI-2001 ^a
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Método dicromato ^b

Fuente: ^a SEMARNAT, 2013; ^b HACH, 1997.

Por último, se realizaron estudios de flujo y concentración de biogás, con un analizador de gases portátil marca GEM-2000, directamente en algunos de los pozos de venteo (Tabla B.5) para comparar con los resultados obtenidos de las simulaciones.

2.2 PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN

El procesamiento de la información comprendió el registro, selección, organización y comprensión de los datos obtenidos en el apartado 2.1, necesarios para la utilización del MMB y de MODUELO.

2.3 ESTIMACIÓN PRELIMINAR DE BIOGÁS

Una vez procesada y depurada la información se utilizó para alimentar al MMB, con el fin de obtener los datos preliminares de generación de biogás. Para el MMB se ingresaron los datos de RSU depositados por año, las condiciones de operación del RESA y la caracterización de dichos RSU. Mientras que para el MODUELO, además de los datos anteriores, se utilizaron las condiciones climatológicas del RESA obtenidas de tres estaciones meteorológicas cercanas al RESA, se elaboraron los

dibujos de las celdas en tres dimensiones (3D), prediciendo la formación de biogás con la operación de las celdas con y sin recirculación de lixiviados.

2.4 ESCALAMIENTO A CAMPO DE BIODEGRADACIÓN ACELERADA

Para el escalamiento a campo se requirió de información de operación del sitio como bioRESA, la cual se obtuvo con MODUELO. Estos datos comparados con los obtenidos en el MMB y lo recabado en las lecturas en campo, permitieron determinar distintos escenarios de biogás generado, necesarios para la selección del equipo a utilizar en la generación de energía eléctrica.

2.4.1 Simulación con MODUELO

Debido a que MODUELO permite simular la operación de un sitio con recirculación de lixiviados, fue posible conocer con mayor certidumbre la generación de biogás con las características del RESA de Zinacantepec. Se emplearon dos tipos de simulaciones, la primera con recirculación y la segunda sin recirculación de lixiviados, para observar cuál de los dos escenarios generaba una mayor cantidad de biogás.

2.4.2 Dimensionamiento y selección de equipo

Debido a que ya existen empresas encargadas en suministrar el equipo completo o realizarlo llave en mano, se realizaron los diagramas del proceso, tomando como base los trabajos realizados en la tabla 1.8 mostrada en fundamentos y principalmente debido a la similitud con los trabajos de Cancún y Saltillo (Incremi, 2013; SCS Engineers, 2013). Conforme a los resultados de las simulaciones con el MMB y MODUELO, se realizó una estimación análoga y paramétrica para la

selección de cada equipo, además se solicitaron cotizaciones por medio de las opciones del proyecto de utilización de biogás incluidas en este estudio, las cuales comprenden: (1) generación de energía *in situ* y (2) quema solamente. Para las dos opciones se consideraron la instalación de un sistema de recolección y el control de gas activo (GCCS), que incluye una antorcha para garantizar la combustión de todo el CH₄ extraído cuando no se está utilizando el biogás.

2.5 EVALUACIÓN ECONÓMICA

El análisis económico tendrá como finalidad analizar los estudios que permitan los mayores dividendos para la generación de energía eléctrica a partir del biogás generado en el RESA de Zinacantepec.

De las tecnologías existentes se evaluaron económicamente dos opciones, Opción 1 Generación eléctrica y Opción 2 Quema de biogás. Con el objeto de evaluar la Opción 1, se partió del supuesto de que las corrientes de ingresos incluían aquellos asociados con la venta y/o la compensación de electricidad, así como también los ingresos asociados a las reducciones de las emisiones de GEI, es decir, la venta de reducciones de emisiones generadas por el proyecto. En cuanto a la Opción 2, se contabilizaron los ingresos potenciales derivados de la reducción de emisiones de CH₄.

Se descartó el financiamiento debido a la complejidad y el tiempo que conlleva su realización. Se tomó en consideración el precio por tonelada de reducciones de emisiones de CO₂e a \$20 USD, para calcular los ingresos de ambas tecnologías, tomando el precio de los certificados de reducción de emisiones (CER) de enero de 2013 (INECC, 2013).

2.5.1 Determinación de costos de inversión

Para determinar los costos de inversión, se estimó el costo presupuestario (en USD del año 2013) para la construcción del sistema de recolección y combustión. Esos son los costos asociados al sistema de recolección de biogás propuesto, que incluye pozos de recolección de biogás, tuberías colectoras y laterales, manejo del condensado e instalación de una estación de succión y de combustión del biogás, tomando como referencia los trabajos realizados en Cancún y Saltillo en el 2013 (Incremi, 2013; SCS Engineers, 2013).

La evaluación económica de la Opción 1 y 2 tomó en consideración dos escenarios para el precio recibido de la reducción de emisiones: el Escenario 1, que calcula ingresos de \$20 USD por tonelada de CO₂e durante la duración del período del proyecto y, el Escenario 2 que no calcula ingresos de la reducción de emisiones. La evaluación económica de la Opción 1 y 2 abarcó un período de 14 años (2007-2021), con un año de construcción y 13 años de operación.

2.5.2 Determinación de costos de operación

Una vez obtenidos los costos de inversión y tomando como base los estudios en Cancún y Saltillo en 2013 (SCS Engineers, 2013; Incremi, 2013), se estimaron los costos de operación anuales para cada uno de los equipos durante el periodo de generación de biogás. Los gastos de operación y mantenimiento (O/M) del sistema de recolección de biogás y de expansión del sistema se incrementaron a una tasa anual del 2 % como lo recomienda SCS Engineers (2013). Esos costos incluyeron aquéllos asociados a la O/M del sistema de recolección existente, tales como mano de obra, repuestos y equipos de pruebas, mantenimiento de rutina y reparaciones del sistema y reemplazo limitado de los pozos y las tuberías existentes. También se

consideraron otros costos anuales vinculados con el proceso para obtener reducciones de emisiones, incluyendo los costos del monitoreo, verificación e inscripción de tales reducciones.

2.5.3 Análisis de sensibilidad

Habiendo definido el mercado de ventas de BC, con el análisis de sensibilidad se determinó la viabilidad económica de la implantación tecnológica de utilizar la BA. Para ello primero se procedió fijándose 14 años y utilizando los datos de MMB y MODUELO para observar las diferencias entre cada volumen.

Se consideró la venta de BC en un rango de precio de \$ 2.5 a \$20 USD por tCO_{2e}, estableciéndose cuatro escenarios: \$ 2.5, \$ 5, \$ 10 y \$ 20 por tCO_{2e}, para calcular y mejorar las estimaciones preliminares de flujos sobre el proyecto en cada caso de generación de biogás.

Con los resultados del proceso anteriormente mencionado y lo visto en el apartado de Fundamentos se realizó el RI, VPN y RCB, para obtener la viabilidad económica del proyecto.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se presentan los resultados, que conforme a la parte experimental descrita en el apartado dos, comprenden la recopilación de la información, su procesamiento, la estimación preliminar de biogás con MMB, las simulaciones realizadas con MODUELO y el análisis económico de la viabilidad del proyecto.

3.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

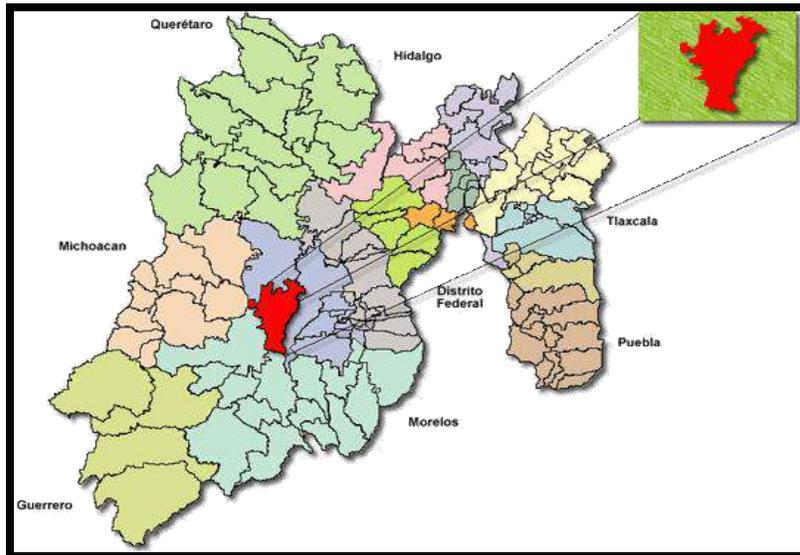
A continuación se presentan los resultados de la búsqueda, recolección, organización y selección de los datos que se requieren para la estimación preliminar de biogás del RESA de Zinacantepec.

3.1.1 Información documental

La información documental recabada comprende artículos, normas y métodos, el resumen ejecutivo de la empresa Mantenimientos y Servicios Ambientales S.A. de C.V de la celda saneada (Cs) y celda uno (C01), el manual y software del MMB, el manual del simulador y software de MODUELO e información de la región (Estaciones meteorológicas).

De acuerdo con información proporcionada por MASERA, el sitio empezó operar como tiradero a cielo abierto desde 1989. Debido a que en 2005 la SEMARNAT detectó problemas de contaminación ambiental en los terrenos e hidrología aledaños, los Ejidatarios del lugar signaron un convenio de asociación con la empresa MASERA, a fin sanear y operar el sitio como lo indica la NOM-083-SEMARNAT-2003 para beneficio de la comunidad (MASERA, 2006). La zona de influencia del RESA de

Zinacantepec está ubicada al occidente del Valle de Toluca, a los 19° 17' de latitud norte y a 99° 44' de longitud oeste del meridiano de Greenwich (Figura 3.1; Figura 3.2).



Fuente: GEM, 2013.

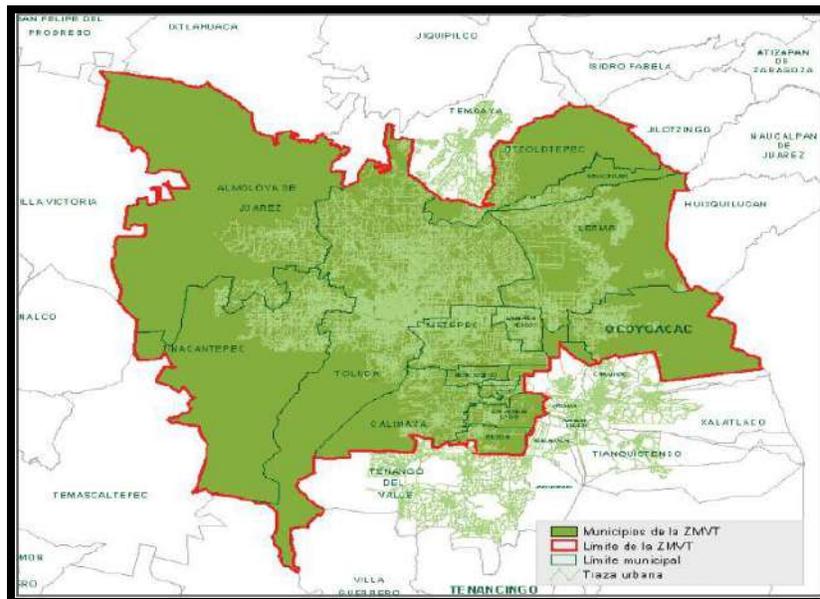
Figura 3.1 Localización del municipio de Zinacantepec



Fuente: GEM, 2013.

Figura 3.2 Municipios colindantes

Este sitio da servicio para la disposición de RSU de los Municipios de: Toluca, Amanalco de Becerra, Almoloya de Juárez, Zinacantepec, Lerma, San Mateo y Ocoyoacac (Figura 3.3).



Fuente: GEM, 2013.

Figura 3.3 Zona de cobertura del RESA de Zinacantepec

3.1.2 Información de campo

El estudio se llevó a cabo en el RESA de Zinacantepec, el cual se localiza en la margen derecha del kilómetro 11.50 de la carretera Estatal Toluca-Zitácuaro, a 5 km del área urbana de Zinacantepec (Figura 3.4). Cuenta con una extensión de 7 hectáreas. El sitio es propiedad del ejido “San Luis Mextepec” y ha venido operando por aproximadamente 25 años. Este RESA se encuentra en las coordenadas 19°19'36.73"N 99°46'21.05"O y a una altura promedio de 2 772 metros sobre el nivel del mar. La temperatura media anual oscila entre los 11°C y 16 °C, mientras que la época más calurosa se presenta en los meses mayo, junio y julio; con una temperatura máxima extrema de 38 °C. La temperatura mínima varía de -10 a 4 °C

durante la época invernal, debido a la cercanía con el Nevado de Toluca. La precipitación total anual supera los 1 225 mm, siendo los meses de mayores lluvias de junio a septiembre (MASERA, 2007).

El sitio cuenta con una Cs con una capacidad de 545 500 toneladas (t) de RSU, la cual recibió residuos desde 1989 y fue hasta 2007 cuando se le dio saneamiento (Figura 3.4), terminándose éste en 2008. Tiene dos celdas que operan conforme a la NOM-083-SEMARNAT-2003, la C01 con una capacidad de 250 000 t que inició operaciones en 2008 y se clausuró en 2009, y la C02 y para 290 000 t de capacidad que operó desde 2010 hasta 2012. Al término de este estudio se encontraba en operación la C03, para la que se tiene estimada una capacidad de 480 000 t (Figura 3.5) y su clausura en 2014 (MASERA, 2013). Durante el periodo de estudio, el sitio recibió un promedio de 250 t/d en la C03, en donde se observó que 50 pepenadores de RSU extraían los materiales reciclables. El sitio cuenta con dos Compactadores de RESA marca CAT, modelo 816F, Serie 2; dos retroexcavadoras cargadoras marca CAT y una excavadora hidráulica mediana marca CAT modelo 321D LCR.



Fuente: Google Earth, 2013.

Figura 3.4 Ubicación del RESA de Zinacantepec, fotografía en 2003



Fuente: Google Earth, 2013.

Figura 3.5 RESA de Zinacantepec, fotografía en 2013

A mediados del año 2013 se clausuró la C03, mientras que la celda cuatro (C04) ya contaba con las características de acuerdo a NOM-083-SEMARNAT-2003 para disponer RSU en ella (Figura A.1). De acuerdo con la información proporcionada por MASERA S.A. de C.V., la C01 cuenta con cuatro pozos de venteo de biogás (14-17) y las celdas Cs, C02 y C03 suman 20 pozos. Con el fin de corroborar la ubicación de los pozos mencionados, se hizo uso de un sistema de posicionamiento global (GPS) marca Garmin, modelo GPSmap® 60CSx. En la figura 3.6 se muestran los 24 pozos de venteo en una fotografía obtenida del Google Earth (2013) y la tabla A.2 resume las posiciones de cada uno de ellos. Con esta información se calcularon las distancias entre los pozos, obteniendo longitudes de 35 a 40 m, con lo que se ratificó que los pozos no rebasaban los 50 m recomendados por NOM-083-SEMARNAT-2003 (SEMARNAT, 2013).



Fuente: Google Earth, 2013.

Figura 3.6 Ubicación de pozos de venteo

En cuanto a la caracterización por componentes de los RSU se tiene la información recabada por MASERA S.A. de C.V., en las casas habitación de Zinacantepec en el año 2006 siguiendo la NMX-AA-61-1985, la cual especifica el método para determinar la generación de RSU en la fuente a partir de un muestreo estadístico aleatorio y es complementaria con la NMX-AA-015-1985. Para los fines de este trabajo, los resultados de la caracterización se consideran como la composición de los RSU en las Cs y C01, debido a que las celdas recibieron RSU similares (Tabla A.2).

La caracterización de los RSU de la C02 (Tabla A.3), la realizó Delgado-Hernández (2013) de acuerdo a la NMX-AA-022-1985 en febrero de 2012. Entre las diferencias detectadas se tiene que para la Cs y C01 se reportan 20 categorías de subproductos y para la C02 se reportan 27 categorías de subproductos, aunque solo se encontraron 25 categorías de subproductos, siendo cuero y otros los subproductos con valores de 0.

La operación de la C03 inicio en el año 2012 y a la fecha de su caracterización (primera semana del mes de marzo, Estiaje 2013) se habían depositado RSU en un 70% de su capacidad. Para la toma de muestra de los RSU se contó con el apoyo de la excavadora hidráulica mediana marca CAT modelo 321D LCR, con la cual se tomó una muestra de aproximadamente 1000 kg de la capa superficial compactada (Figura 3.7) y los depositó en un área apartada al frente de trabajo (Figura 3.8).

A estos residuos se les practicó el método del cuarteo de acuerdo a NMX-AA-015-1985 (Figura 3.9). Del cuarto B se tomaron residuos para llenar un tambo de 200 L y de acuerdo a la NMX-AA-019-1985 por duplicado, se les determinó el peso específico que fue de 95 kg (Figura 3.10).



Figura 3.7 Muestra de RSU C03



Figura 3.8 Muestra apartada



Figura 3.9 Método del cuarteo



Figura 3.10 Peso específico

En la tabla A.4 (Anexo A) se muestra la caracterización física de la C03 conforme a la NMXAA-022-1985. Entre las diferencias con respecto a la caracterización de la C02, en ésta destaca la existencia de Cuero y otros componentes, mientras que Varios y Finos disminuyeron sus porcentajes, lo cual posiblemente se deba a variaciones en patrones de consumo (INECC, 2014; SEMARNAT, 2013).

En la tabla 3.1 se muestran los resultados de los análisis de pH, temperatura, Conductividad eléctrica, DQO, SVT de lixiviados de las fosas 1 y 2, las cuales

colectan los lixiviados de todas las celdas. Como puede observarse en la Fosa 1 los lixiviados son básicos y en la Fosa 2 son neutros. Ambas fosas tienen una alta carga orgánica, sin embargo la Fosa 1 tiene lixiviados próximos a la etapa de maduración (Castrillón *et. al.*, 2010; Kjelsen *et. al.*, 2002); mientras que la Fosa 2 cuenta con lixiviados jóvenes. Lo anterior puede atribuirse a que si bien ambas fosas reciben lixiviados de las C01, C02 y C03, en la Fosa 1 también descarga la Cs, en la cual la cantidad de RSU contenidos son 545 500 t; mientras que C01, C02 y C03 suman 700 000 t.

Tabla 3.1 Análisis fisicoquímicos

	pH*	Temperatura*, °C	Conductividad eléctrica*, mS/cm	SVT, mg/L	DQO, mg O ₂ /L	DQO, Reportados
Fosa 1	8.55	17.00	1.75	3 483	3 850	3 650 ^{a)}
Fosa 2	6.75	17.00	1.95	9 866	43 283	3 000 ^{b)}

^{a)} Castrillón *et. al.*, 2010; ^{b)} Kjelsen *et. al.*, 2002.,*in situ.

3.2 PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN

La información proporcionada por MASERA S.A. de C.V., la obtenida en campo y la de investigación documental, se procesó de acuerdo a los requerimientos y arreglos del MMB y MODUELO como se describe en cada uno de los siguientes apartados.

3.2.1 Arreglo de información para el Modelo Mexicano

En esta parte se introdujo la ubicación por zona geográfica de cada una de las celdas, los índices de disposición anual (Tabla B.1), índices de recuperación de biogás actuales y la línea base de recuperación de biogás. También se ingresó la

caracterización de los RSU del sitio y los valores de k y L_0 , descritos en fundamentos. Debido a que los RSU de las cuatro celdas son en su mayoría de degradación rápida, los valores para cada una de ellas son similares para las estimaciones de biogás, mostrándose los resultados de cada una de las celdas en la tabla B.3 (Anexo B).

En el caso de la Cs y C01 se utilizó la información reportada en la tabla A.2 ajustando los subproductos a las 14 categorías como lo pide el MMB. Un ejemplo es la categoría de plástico, en donde se conjuntaron Plástico de película y Plástico rígido principalmente. Para la Cs se introdujeron los índices de disposición anual, índices de recuperación de biogás actuales y línea base de recuperación de biogás; la disposición estimada de RSU de la Cs fue de 545 500 t.

A diferencia de la Cs la C01 contiene menor cantidad de RSU (Tabla B.2), cubierta total de geomembrana y compactación diaria. La caracterización de la C01 como lo pide el modelo se observa que la categoría que ocupa mayor porcentaje es la de comida con un 56.70%, dando un total de orgánicos del 75% y un porcentaje de degradación rápida del 57.30% proporcionado por el MMB.

En cuanto a los datos de alimentación de la C02 se observó cierta semejanza con la C01 en cuanto a cuestiones de operación, compactación y geomembrana. La disposición inicial de RSU en la C02 fue de 140 000 t en el año 2010, año de apertura del sitio, mientras que en el año 2011, año de clausura, se depositaron en total 150 000 t de RSU. Para la caracterización que pide el modelo el porcentaje entre la categoría de orgánicos e inorgánicos es similar, siendo superior en los totales de inorgánicos (Tabla B.3).

Por último, para la C03 la disposición de RSU en el año 2012 fue de 162 600 t, para el año 2013 y 2014 la disposición de RSU se estimó siguiendo la misma línea tendencial de disposición proporcional por MASERA S.A. de C.V. La caracterización de los RSU muestra que los plásticos fue la categoría que más abarcó con un 21.50%, lo cual origina que el total de inorgánicos sea mayor, aunque el porcentaje de degradación sea rápida (Tabla B.3).

3.2.2 Arreglo de la información para MODUELO

La información aportada por la empresa a cargo del RESA y la recopilada en campo (Tabla B.3), se lista a continuación:

a) Terreno (Figura B.1):

- Cartografía digitalizada en Autocad de las celdas Cs, C01, C02 y C03.
- Descripción general con información sobre el proyecto de las celdas que cumplen de acuerdo a normatividad.
- Estudio geofísico del terreno.

b) Meteorología (Figura B.2):

- Datos mensuales de temperaturas, precipitación, evaporación, temperatura media, velocidad del viento, humedad relativa, insolación registrados de la estación agrometeorológica de Almoloya de Juárez, Estado de México desde 2008 a la fecha.
- Datos diarios de temperaturas, precipitación, en la estación meteorológica de Sn. Francisco Tlalcilcalpan, Estado de México desde 1939 hasta 2012 y la estación meteorológica de Tres Barrancas de Almoloya de Juárez, Estado de México desde 1980 hasta 2011 (SMN, 2013).

c) Residuos (Tabla B.1):

- Cantidad de RSU contenidos en la Cs.

- Historial de RSU anual que han sido ingresados al sitio desde 2007 hasta 2013.
- Estudios de caracterización de la Cs, C02 y C03.

MODUELO consta de varios modelos, los cuales requieren para ser alimentados por etapas. Para el desarrollo de éstos se establecieron los parámetros del terreno, cantidades y caracterizaciones en cuanto a RSU, además de las condiciones climatológicas para meteorología. En cuanto a las consideraciones sobre la información proporcionada por la empresa MASERA S.A. de C.V., por secrecía solo se muestra la información para las simulaciones. A continuación se describe la información utilizada, las fuentes y como se arregló en cada caso:

- a) Modelo para residuos. Como se mencionó anteriormente, dada la compleja historia de Cs, así como la caracterización en C01, se consideraron parámetros similares para ambas celdas. Para las C02 y C03, cada una de ellas contiene su propia caracterización (Anexo B).
- b) Modelo hidrológico y meteorológico. Debido a la falta de estudios hidrológicos de velocidad de infiltración mínima, velocidad de infiltración máxima, parámetro de Horton, profundidad de evaporación, punto de marchitez, máxima acumulación superficial, fracción de volumen afectado, factor de permeabilidad, humedad residual mínima del residuo e influencia de presión en humedad, necesarios para la alimentación del modelo hidrológico de MODUELO se hizo uso de datos meteorológicos y de caracterización, así como de fuentes bibliográficas (Tabla B.7).

Para crear el modelo meteorológico se triangularon las series de datos disponibles a partir de 1989 hasta 2013, debido a que solo las dos primeras estaciones meteorológicas reportan precipitación y temperatura diaria, los demás factores fueron estimados de la última estación meteorológica; obteniéndose datos de

1989 hasta 1998 de la estación meteorológica de San Francisco Tlalcilcalpan, datos de 1999 hasta 2007 de la estación Tres Barranca, por último y la más actualizada, la estación de Almoloya de Juárez abarcando los años 2008 a 2013. Los estimados a partir de 2014 hasta 2022 (año en que se decidió colocar como límite debido al tiempo que conlleva realizar cada simulación), se establecieron tomando como referencia los últimos 6 años de la última estación. Los datos que se estimaron fueron la humedad relativa media diaria en porcentaje, temperatura media diaria en °C, la velocidad media diaria del viento en km/h, la insolación (número de horas diarias de sol), la precipitación horaria correspondiente a cada una de las horas del día en mm, la precipitación diaria en mm, la temperatura máxima diaria en °C y la temperatura mínima diaria en °C. Como estos datos arrojaron más de 4 millones de variables se presenta solo una parte en la tabla B.8.

- c) Modelo morfológico. Este modelo del RESA se construyó mediante la colocación sucesiva de las capas que representan los distintos materiales/residuos según el historial de explotación que se desee simular (Figuras B.3, B.4 y B.5).

Para establecer los parámetros en cuanto al terreno se especificó la configuración física del material, así como el sistema de drenaje utilizado en el mismo. A partir de los planos de proyecto en Autocat (Figura B.1), se elaboraron los modelos de terreno, sobre el que se configuran las celdas de vertido con un tamaño de 7 x 8 x 2.8 m, dando un volumen de 156.8 m³, con una cobertura final de 0.2 m para las celdas abiertas y 0.5 m para las celdas clausuradas, también se crearon celdas sin cobertura para la Cs, debido a que en los años anteriores al 2007 se depositaban los RSU como tiradero a cielo abierto (Anexo B, Figuras B.3, B.4 y B.5).

Para el sistema de drenaje de la Cs se utilizaron las dimensiones marcadas en los planos proporcionados por la empresa, los cuales consistieron en una capa de geomembrana, grava y geomembrana-arcilla para evitar la filtración de agua pluvial. Mientras que para las demás celdas, se empleó un sistema de drenaje con

tubería PVC de 20 cm. A partir de los datos proporcionados por los registros anuales de entradas al RESA se obtuvieron las cantidades ingresadas para cada mes en las celdas a modelar. Esto sirvió para establecer las densidades de compactación de 0.72 t/m³ para la Cs y 0.85 t/m³ para C01, C02 y C03 respectivamente.

Construidos los modelos de residuos, meteorológico y morfológico, se procedió a la calibración sucesiva del modelo hidrológico y de biodegradación, ajustando los datos de simulación a los datos disponibles. La calibración hidrológica se realizó con el ajuste de los volúmenes evaporados (según las características de la capa superficial) mediante la variación de los parámetros de profundidad de evaporación y humedad límite de evaporación. Fijados los valores comentados y las características de los materiales (representados por los distintos tipos de celdas del programa) como se muestra en la tabla 3.2, se varió el valor de la permeabilidad del residuo hasta ajustar los volúmenes de lixiviado simulados y registrados entre cada simulación realizada.

Tabla 3.2 Valores empleados en el modelo hidrológico

Concepto	Cs	C01, C02 y C03	Unidad
Velocidad de infiltración mínima	11.43	2.59	mm
Velocidad de infiltración máxima	127	80	mm
Parámetro de Horton	4.14	4.14	h ⁻¹
Profundidad de evaporación	0.20	0.30	m
Punto de marchitez	100	100	%
Máxima acumulación superficial	0.10	0.05	m
Fracción de volumen afectado	50	25	%
Factor de permeabilidad	100	100	-
Humedad residual mínima del residuo	5	5	%
Influencia de presión en humedad	4536	4536	kg/m ²

Para la caracterización se utilizó la plantilla precargada en MODUELO, con la composición de los RSU por componentes a lo largo del tiempo, así como la fracción

de cada uno y la generación mensual global de éstos durante el período a definir. Para lo anterior dichos componentes se ajustaron a los tipos de como se muestra en la tabla 3.3. Para los fines de este trabajo, los resultados de la caracterización se consideraron como la composición de los RSU en las Cs y C01.

Tabla 3.3 Componentes de RSU

Número	Componentes	Cs y C01		C02		C03	
		kg	%	kg	%	kg	%
1	Cartón	7.35	5%	19	3%	3.76	3%
2	Goma y cuero	1.24	1%	7.5	1%	4.17	3%
3	Inerte	0.18	0%	34	6%	11.45	8%
4	Madera	1.62	1%	4	1%	0.92	1%
5	Materia orgánica	84.47	62%	284.5	48%	60.01	43%
6	Metal	2.68	2%	20	3%	1.68	1%
7	Pañal y celulosa	7.53	6%	46.5	8%	11.88	8%
8	Papel	8.84	6%	28	5%	6.93	5%
9	Plástico	12.75	9%	78.5	13%	27.34	20%
10	Poda y siega	0	0%	21.5	4%	1.96	1%
11	Tetrabrick	3.79	3%	9.5	2%	3.17	2%
12	Textil	2.33	2%	16.5	3%	5.07	4%
13	Vidrio	3.46	3%	23	4%	1.79	1%
	Total	136.30	100%	592.50	100%	140.14	100%

Los resultados de los periodos de generación de RSU, valores paramétricos como volúmenes globales (Precipitación, filtraciones, evaporación, generación y recirculación de lixiviados) y generación de CH₄. Desde el año de inicio de la Cs (1989) hasta el año 2020, año en que presentan las mismas tendencias de decaimiento para todas las celdas se muestran en la tabla B.9.

Los períodos de generación permitieron definir las distintas corrientes de RSU que han llegado al RESA a lo largo del tiempo. En la tabla 3.4 se pueden observar los resultados de los periodos de generación para cada una de las celdas, desde su

apertura hasta su clausura, siendo la Cs la de mayor contenido de RSU (545 500 t), contenido de humedad (46.01 %), rápida biodegradación (83 350 t) y RSU no biodegradables (166 576 t). Sin embargo, la C03 demostró tener un mayor poder calorífico (4564.33 kcal/kg) debido a su cantidad de plástico (Tabla B3), de manera que fue 9 % mayor que C01, 12 % más que C02 y 6% superior a la Cs.

Tabla 3.4 Periodos de generación

Celda	Apertura	Clausura	RSU (t)	Humedad (%)	Densidad (t/m ³)	Poder calorífico (kcal/kg)	Biodegradabilidad (t)		
							Rápida	Lenta	No bio- degradable
C01	2008	2009	250 000	36.71	0.85	4135.26	52.33	1.74	84.29
C02	2010	2011	290 000	32.15	0.85	3999.92	46.42	4.38	108.45
C03	2012	2013	280 000	28.04	0.85	4564.33	40.99	3.89	126.09
Cs	1989	2007	545 500	46.01	0.74	4275.01	83.35	3.79	166.57

3.3 ESTIMACIÓN PRELIMINAR DE BIOGÁS

Una vez procesada y adecuada la información documental y de campo, ésta se alimentó el MMB para realizar las estimaciones preliminares de biogás. En el Anexo C se muestra la tabla C.1 con las estimaciones de generación de biogás para el periodo 1989-2061. La proyección total de generación de biogás para el MMB se obtuvo de la suma de los valores por celda, con un índice de recuperación del 63%. En la figura 3.11 se muestran estos resultados gráficamente, con un máximo de 1000 m³ de biogás para el año 2015.

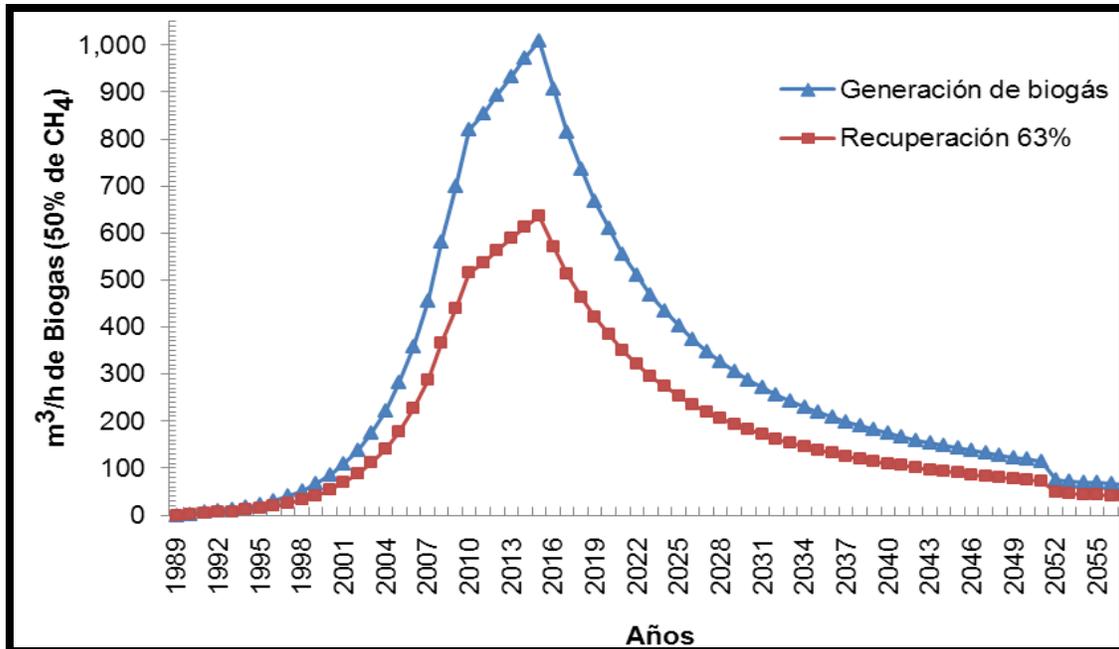


Figura 3.11 Estimación de generación de biogás con el MMB

Una de las principales restricciones para cálculos bajo diferentes escenarios que presenta el MMB es la introducción de datos, principalmente si no se conocen las cantidades por año de RSU. En el caso de la Cs se debió manipular la tasa de crecimiento de RSU depositados en la celda, hasta obtener la cantidad de RSU deseados, debido a que no se obtuvo información confiable sobre los datos anuales de 1989 hasta 2007.

Cabe resaltar que la Cs no cuenta con geomembrana en la base de la celda y según datos de información bibliográfica, el terreno tiene una permeabilidad de 1×10^{-7} cm/s, razón por la cual se presentan filtraciones para la Cs. La recirculación se consideró a partir del año 2007, año en que se le dio saneamiento, lo cual se puede apreciar en la figura C.1 (Anexo C), donde el incremento de CH_4 y la generación de CH_4 se puede apreciar entre la Cs_N y Cs_R, donde se incrementó un 14% la generación de CH_4 , concordando con lo que menciona Ruo *et al.* (2005) en el apartado 1.4.1, que mediante recirculación de lixiviados se puede aumentar la velocidad y la calidad

de la producción de biogás, el cual puede ser usado para la generación de energía. Las similitudes de generación en los años 1989 a 2006 se deben a que la Cs operaba como tiradero a cielo abierto y es hasta 2006 cuando se iniciaron las operaciones para su saneamiento, lo cual se puede observar en el incremento del año 2007.

3.4 ESCALAMIENTO A CAMPO DE LA BIODEGRADACIÓN ACELERADA

Para el diseño de un nuevo proyecto a campo, el escalamiento juega un papel muy importante, de manera que en este trabajo se utilizaron los valores totales de generación de biogás del MMB y del simulador MODUELO, empleándose distintos escenarios para comparar los beneficios entre un RESA tradicional y uno operado con recirculación de lixiviados.

Para la estimación de biogás con MODUELO se utilizaron los datos de caracterización de RSU y generación por periodos. Esta estimación preliminar de biogás fue para el periodo 1989-2020, conforme a las simulaciones de cada celda sin (_N) y con recirculación (_R). En la tabla B.9 se presentan los resultados para la Cs, destacando un incremento debido a la recirculación de un 17% con respecto a lixiviado recogido, 55% para NH_3 en lixiviado recogido, 8% en filtraciones laterales, 10% el aumento en NH_3 de filtraciones laterales y en filtraciones en el fondo con un 6% y 28% de NH_3 para filtraciones en el fondo.

3.4.1 Simulación con MODUELO

En cuanto a la C01, como se puede ver en la tabla C.2 (Anexo C), debido a la recirculación de lixiviados destacó un incremento de 97% en la evaporación superficial, 22% en el contenido de humedad, 95% el lixiviado recogido, 12% de DBO

y 78% del NH_3 en el lixiviado recogido. En cuanto las filtraciones laterales, sufrió un incremento de 0 a 72 006 m^3 , además de un 58% en DQO y 46% para DBO en las filtraciones laterales. Mientras que para la DQO en el lixiviado recogido, disminuyó 16%, todo lo anterior resultado de la recirculación de 2 195 346 m^3 de lixiviado. Además, el valor 0 en las filtraciones en el fondo demuestra que no hay filtraciones, debido a que cumple de acuerdo a normatividad y cuenta con una geomembrana para evitar las filtraciones en el fondo (SEMARNAT, 2009). En la figura C.2 se observa que la generación de CH_4 incrementó un 13% con la recirculación al compararlo con la no recirculación en la C01, observándose que la recirculación de lixiviado incrementa la generación de CH_4 tal y como lo menciona Giraldo (2001). La descomposición y estabilización biológica de los residuos en un biorrelleno puede ocurrir en un período de tiempo mucho más corto que un RESA tradicional, ya que proporciona una posible disminución de los riesgos ambientales a largo plazo y los costos de pos clausura (YOLO, 2005). Dicha disminución se observa después del año 2018, con un decaimiento de la generación de CH_4 , además si se dibuja una línea continua se puede garantizar una producción de CH_4 a 40 m^3/h en los años 2010 al 2015 que no puede ser apreciable en la C01_N.

Para la C02 se puede observar los resultados en la tabla C.3, destacando un incremento debido a la recirculación de un 93% en la evaporación superficial, el contenido de humedad aumento un 18%, el lixiviado recogido en un 94%, en el mismo lixiviado la DBO aumento 20% y NH_3 74%. Mientras que para filtraciones laterales, incrementó de 0 a 53 678 m^3 , esto debido a que es mayor la cantidad de humedad provocada por la recirculación de 1 391 002 m^3 de lixiviados, esta misma humedad incrementó la DQO, DBO y NH_3 de las filtraciones laterales. De igual manera, que en la C01, la C02 cumple con normatividad, evitándose las filtraciones en el fondo en ambos tipos de operación (NOM-083-SEMARNAT, 2003). En cuanto a filtraciones laterales, la C02_N tiene valor 0, porque gran parte de la celda está protegida con geomembrana, incrementando el volumen de lixiviado a recircular, mientras donde no existe geomembrana (sobre el nivel de terreno) se filtra por los

RSU. En la figura C.3, se puede apreciar que incrementó un 14% la generación de CH_4 con respecto a la C02_N , tal y como lo menciona Cruz *et al.* (2002), el contenido de humedad combinada con la acción biológica de los microbios presentes en la naturaleza descomponen los residuos. Otra de las diferencias entre las operaciones, es la producción promedio en los años 2013 a 2019, expandiéndose la curva de generación en el eje de las ordenadas; también se puede observar que después del año 2020 empieza a decaer la curva de generación de CH_4 de la C02_R , mientras que para la C02_N , aun presenta picos de crecimiento para ese mismo periodo.

Los resultados para la C03 se pueden observar en la tabla C.4, destacando un incremento de 50% para evaporación superficial, 13% en contenido de humedad, 90% en lixiviado recogido, así como un 69% de NH_3 para el mismo lixiviado recogido. Las filtraciones laterales incrementaron de 0 a un total de 17 393 m^3 , al igual que la C01 y C02 , la C03 presenta 0 de infiltración, debido a que cumple con normatividad. Las filtraciones laterales tiene valor 0 para la C03_N , a causa de que gran parte de la celda está protegida con geomembrana y donde no existe geomembrana (sobre el nivel de terreno) es filtrada entre la porosidad de los RSU (SEMARNAT, 2009). En cuanto a la generación de CH_4 , se puede apreciar en la figura C.4 el incremento de 18%, tal y como lo mencionan los autores descritos en las anteriores celdas. A diferencia de las figuras de C01 y C02 , la C03 presenta una ligera estabilización en C03_R , para los años 2017 a 2019. La proyección total de generación de biogás con un índice de recuperación del 63% se muestra en la figura 3.12, con un máximo de 476 m^3 de biogás sin recirculación (M_S_R) y de 383 m^3 de biogás con recirculación (M_C_R), ambas para el año 2013.

Estos resultados son similares a los obtenidos en campo (Tabla B.5), los cuales debido a factores como la hora de muestreo, el tipo de celda y la caracterización de los residuos, influyeron en las mediciones de biogás.

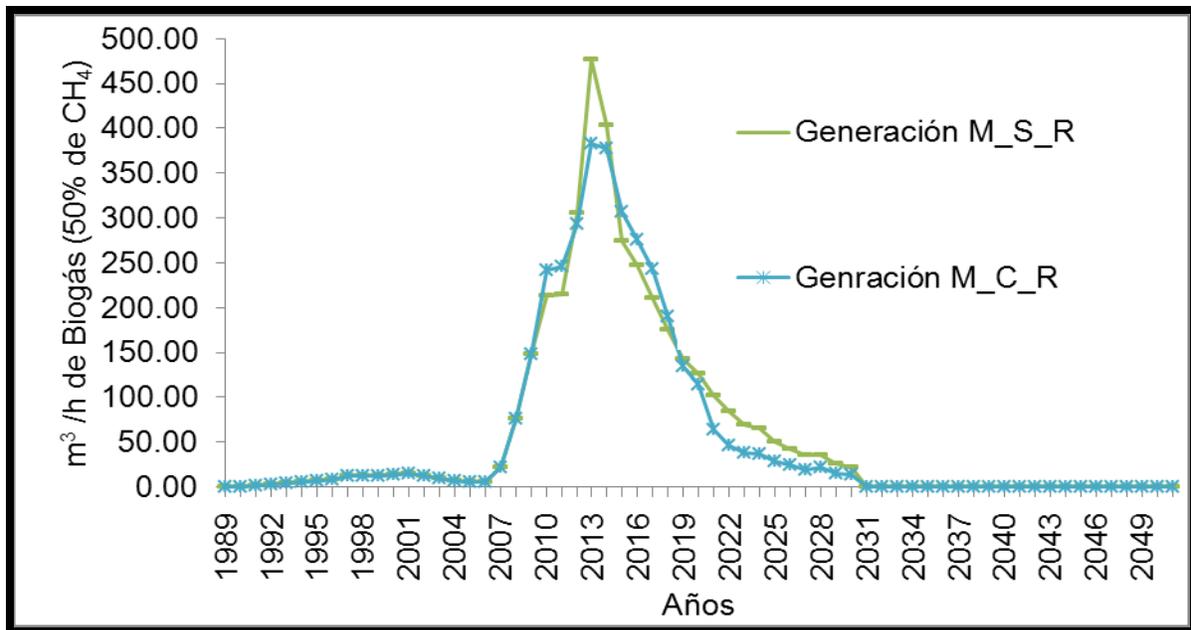


Figura 3.12 Simulación global de la generación de biogás con MODUELO

Aparentemente en la figura 3.12 los resultados de generación de biogás son similares, pero observando solo al CH_4 y a cada celda individualmente en su respectivo gráfico tanto recirculada y no recirculada, se aprecia que una celda operada de acuerdo a normatividad y aplicada la recirculación, genera más CH_4 que una Cs y sin recirculación (Figuras C.1-C.4), comprobándose que la recirculación acelera la biodegradación de los RSU, acortando el tiempo de estabilización del RESA. En la figura 3.13 se muestra la generación global de biogás con MODUELO (M_C_R y M_S_R) y MMB sin recirculación.

Con respecto a los lixiviados se observa en la figura 3.14 la DQO total con y sin recirculación, los valores de DQO son menores a 30 000 mg O_2/L y similar a la tabla 3.1. Lo anterior también se muestra en las tablas C.2, C.3 y C.4 para las celdas Cs, C01, C02 y C03 respectivamente. Considerando la forma de operación, que es por riego en la superficie de las celdas y de inyección en pozos, métodos que actualmente se están llevando a cabo en el RESA.

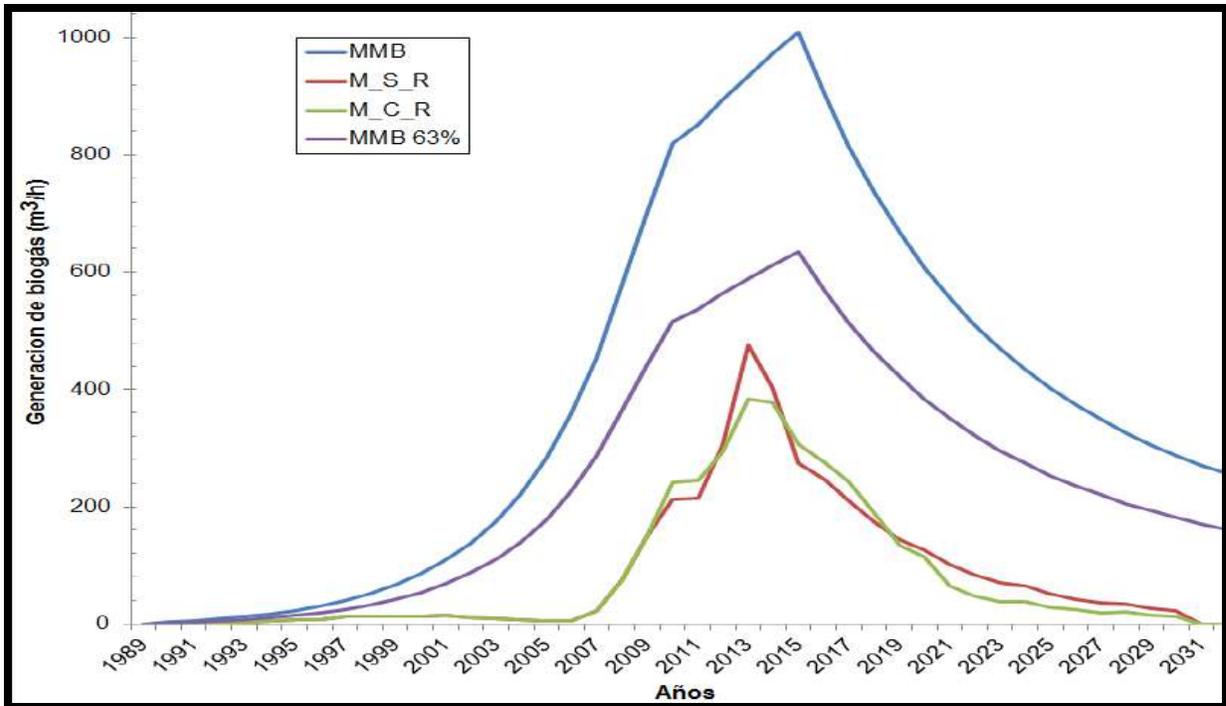


Figura 3.13 Simulación global de la generación de biogás

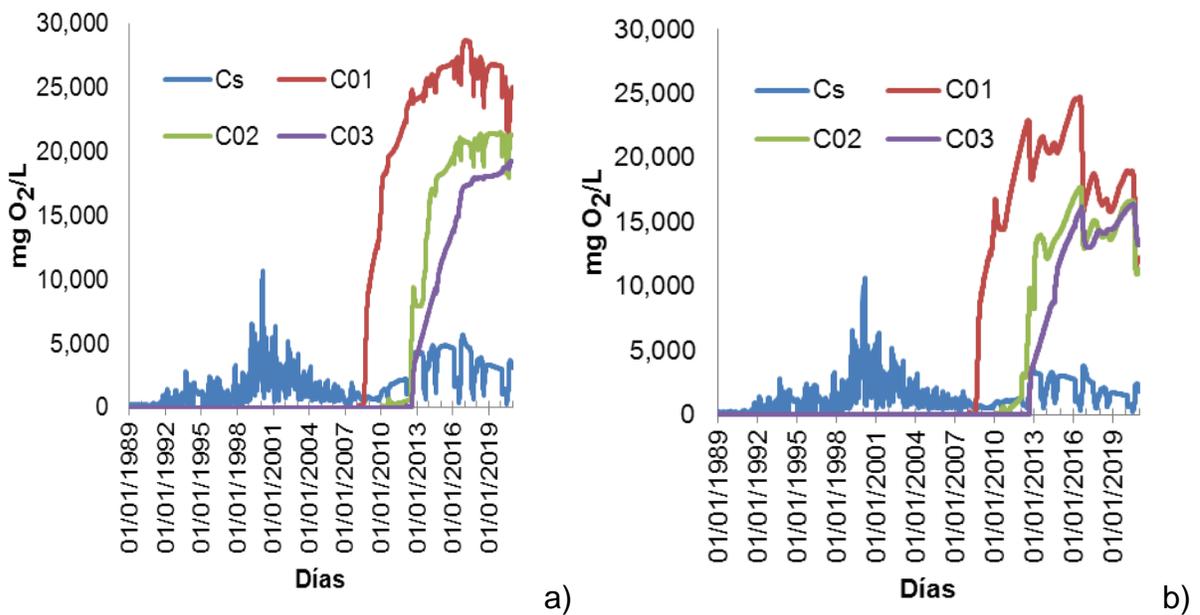


Figura 3.14 Dinámica de DQO en lixiviados: a) Sin recirculación y b) Con recirculación

3.4.2 Dimensionamiento y selección de equipo

De acuerdo con los resultados de estimación preliminar de biogás, el RESA de Zinacantepec podría llevar adelante un proyecto de generación de electricidad a partir de biogás en un escenario de generación media de 300 m³/h, siendo su equivalente de 663 kW de acuerdo a las tablas de especificaciones técnicas de Guascor (2014), escogido así, porque a un flujo menor de 200 m³/h no es viable y a un escenario alto, el periodo de recuperación es bajo, de acuerdo a los trabajos previos mostrados en la tabla 1.8, el cual se espera que comience en 2015 por un periodo de hasta 6 años (Figura E.1).

Como se describió en la Parte experimental, se requiere de un sistema de recolección (captación y conducción) de biogás, que tiene como finalidad controlar la migración de biogás (CH₄, CO₂ y gases traza) hacia la atmósfera, ya sea que el biogás se conduzca hacia los sistemas de aprovechamiento (generación de energía) o simplemente se le destruya (destrucción por flama en quemadores).

Conforme a la información recabada de MASERA (2006 y 2013) y basado en los trabajos de SCS Engineers (2013) e Incremi (2013), además de las características propias del RESA de Zinacantepec, el sistema se dividió en dos partes: el sistema de captación (extracción mediante pozos) y el sistema de conducción. Adicionalmente a estos sistemas puede existir un sistema de aprovechamiento y/o un sistema de destrucción:

- a) Sistema de captación. El elemento principal de este sistema son los “pozos de extracción”, que es donde se extrae activamente el biogás para posteriormente conducirlo (mediante el sistema de conducción) hacia el sistema de aprovechamiento y/o destrucción. Para este caso se eligió solamente un sistema de pozos verticales, que es la forma actual con la que cuenta el sitio y es la forma

más práctica de extracción, el cual está conformado de tubería de polietileno de alta densidad (HDPE) de 2",4" o 6" de diámetro. Los pozos son situados estratégicamente sobre la extensión del terreno, por lo general en las celdas clausuradas o bien en las que se desee extraer biogás. Para la correcta ubicación en la construcción de pozos es necesario poner énfasis en las condiciones del terreno del proyecto, observaciones en campo y objetivos del diseño del sistema de recolección de biogás. Para el área seleccionada se determinaron 35 pozos, que abarcan las áreas de todas las celdas del RESA, con un arreglo a cada 20 m (EPA, 2005), considerando el arreglo en condiciones ideales. Cabe señalar como se mencionó anteriormente, que la posición y ubicación de los pozos puede variar e inclusive el número de pozos, debido a las condiciones en campo que se pudieran presentar en la etapa de perforación y construcción de los pozos, sin olvidar el diseño de la red de recolección de biogás. Actualmente en México no se cuenta con criterios o regulaciones para el diseño de pozos de extracción de biogás, por lo que se consideraron los criterios de la EPA.

El diseño del sistema de captación para la implementación de un proyecto de destrucción y/o aprovechamiento del biogás generado en el RESA de Zinacantepec, contempla:

- La perforación de 35 pozos verticales, con diámetro de 11 pulgadas y 21 metros de profundidad desde la superficie del terreno, rellenos de grava limpia no carbonatada y con sello bentonítico.
- La construcción de 35 pozos verticales para la extracción de biogás, de tubería de HDPE con diámetro de 4", ranurada al 75% de la longitud total, con tapón capa en el extremo inferior y con una brida en el extremo superior, uniendo la tubería con roscas.
- 35 cabezales para la extracción del gas, conformación tipo "T" de HDPE, válvula de compuerta con puertos para medición de flujo, presión y composición del gas.

b) Sistema de conducción de biogás. Se le llama sistema de conducción a la red de tubería plástica por lo regular de HDPE (Tabla D.2) que interconecta a los pozos entre sí y conduce el biogás hacia el sistema de destrucción o aprovechamiento mediante bombas o sopladores (extracción). Es común encontrar en los sistemas de conducción de biogás en operación, que el sistema se divide en 2 secciones, una conformada por la interconexión de la mitad del total de pozos y la otra por la mitad de pozos restantes interconectados entre sí. Las dos secciones se conectan a una tubería principal que es donde se conduce el biogás, mediante extracción (bombas o sopladores), hacia el sistema de tratamiento (limpieza de humedad, H₂S y siloxanos) y posteriormente hacia la dosificación del sistema de destrucción (quemado) o si existe al sistema de aprovechamiento (generación de energía). Existen varios elementos que conforman al sistema de conducción, puede que en algunos casos existan todos o se prescindan de alguno. En la tabla 3.5 se describen los comúnmente encontrados:

Tabla 3.5 Elementos de un Sistema de Conducción de Biogás

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
Lateral	Tubería que conecta a un pozo con un sub- ramal.
Sub-ramal	Recibe a los laterales, conectando varios pozos entre sí. Se conecta hacia los ramales o tubería principal.
Tubería principal o ramal principal	Conecta a los sub-ramales del sistema entre sí. Es el último eslabón entre el sistema de conducción y la extracción (bomba).

Fuente: Martin & Fernández, 2000

Tabla 3.5 Elementos de un Sistema de Conducción de Biogás (continuación)

Trampa de Condensados	Elemento en donde se atrapa el vapor de agua con el que sale el biogás de la masa de residuos. Dicho elemento es muy importante debido a que mantiene la red libre de obstrucción al flujo de gas y por ende en condiciones óptimas de funcionamiento. Dichos elementos se sitúan en los puntos más bajos de la red de manera que, por el efecto de la fuerza de gravedad, se facilite la eliminación de los condensados.
-----------------------	---

Fuente: Martin & Fernández, 2000

Para el sistema de conducción de un proyecto de destrucción y/o aprovechamiento del biogás generado en el RESA de Zinacantepec se contemplaron los componentes que a continuación se describen, quedando la distribución como se muestra en la figura 3.15 y las opciones de distribución que se presentan en las figuras D.1 y D.2:

- 50 m. de tubería de poliuretano de alta densidad (HDPE) de 2", para laterales de 1.5 m. de longitud aproximadamente.
- 404 m. aprox. de tubería HDPE de 4" para sub-ramales.
- 2 590 m. aprox. de tubería HDPE de 8" y 350 m. de tubería HDPE de 10" para ramal principal.
- 4 trampas de condensado, situadas en puntos estratégicos de la red.

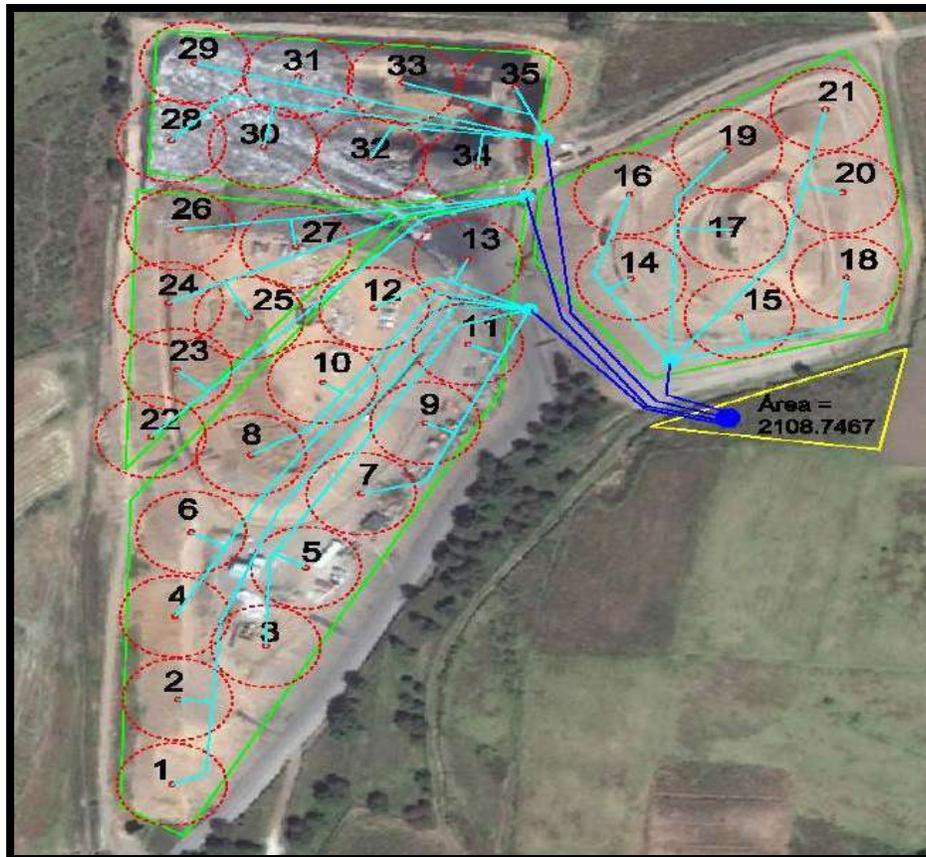


Figura 3.15 Red de extracción y conducción de biogás

Además se consideró la instalación de una estación de succión y dibujado en CHEMCAD (Figura D.3). El sistema de combustión tiene una antorcha cerrada de combustión, de modo que las emisiones del escape pueden probarse y cuantificarse, si corresponde para registrar la reducción de emisiones de GEI (no es posible evaluar los gases de escape sobre antorchas abiertas tipo candelabro).

Por cuestiones presupuestarias, se ha estimado que la construcción del sistema incluye la instalación de un equipo de succión y una capacidad de combustión del biogás de aproximadamente $1\,155\text{ m}^3/\text{h}$. Esa capacidad es suficiente para manejar el índice máximo de recuperación de biogás proyectado, según el escenario de alta recuperación, lo cual se ha estimado que sucederá en el año 2015 (Figura E.1).

3.5 EVALUACIÓN ECONÓMICA

Como se mencionó en la parte experimental, a partir del biogás disponible y de las condiciones específicas en el sitio, se efectuó un análisis de costos de una planta de generación de energía a partir de biogás dentro del sitio (Opción 1) para un flujo medio estable de 300 m³/h de biogás (Figura E.1) y con base a la estimación análoga (Tabla E.1) de los trabajos de Saltillo y Cancún (SCS Engineers, 2013; Incremi, 2013) se determinó el tamaño de un motor alternativo con una capacidad bruta de 633 kW (Guascor, 2014; Dresser-Rand, 2014), con el fin de que la cantidad de biogás fuera suficiente para permitir el funcionamiento de la planta durante 6 años, tomando en cuenta las proyecciones de recuperación de biogás de rango medio. Por cuestiones presupuestarias, se estimó que la construcción inicial se llevaría a cabo durante el año en 2014. La instalación comenzará a operar en enero de 2015 y necesitará alrededor de 380 m³/hora de biogás para operar a capacidad plena. Además se consideró que la planta de generación de energía a partir de biogás contará con un operador de planta calificado 40 horas por semana, con el apoyo del técnico responsable de la O/M del sistema de recolección de biogás. Esos técnicos serán los responsables de la operación diaria y del mantenimiento de rutina. Todas las actividades de mantenimiento menor y mayor significativas serán completadas por entidades externas (terceros) calificadas. Con el objeto de evaluar los aspectos económicos, se estimaron los costos de capital para desarrollar un proyecto para un sistema de recuperación y utilización o quemado de biogás (Opción 2) en el RESA de Zinacantepec. También se estimaron los costos anuales esperados para la operación y el mantenimiento del sistema de recolección de biogás.

3.5.1 Determinación de costos de inversión

Como se describió en fundamentos y en la parte experimental, los costos asociados al sistema de recolección de biogás propuesto y descrito anteriormente, incluyen pozos de recolección de biogás, tuberías colectoras y laterales, manejo del

condensado e instalación de una estación de succión y de combustión del biogás (SCS Engineers, 2013). La tabla 3.6 presenta un resumen de los costos descritos a continuación:

a) Sistema de recolección y succión. El costo presupuestario para la construcción del sistema de recolección y combustión de biogás fue de USD \$1 167 000, en base a los trabajos de Cancún y Saltillo (SCS Engineers, 2013; Incremi, 2013). Esos son los costos asociados al sistema de recolección de biogás propuesto y descrito anteriormente, que incluye pozos de recolección de biogás, tuberías colectoras y laterales, manejo del condensado e instalación de una estación de succión y de combustión del biogás.

El concepto del proyecto de planta de generación de energía de 633 kW (brutos) con motor de combustión interna que funciona con biogás y el costo de capital se basó en las siguientes presunciones (SCS Engineers, 2013):

- Los equipos generadores que funcionan con biogás pueden interconectarse a la red de distribución local a un nivel de kW relativamente bajo (a 35 kW o menos). La interconexión puede realizarse en la línea de distribución local (sin ningún reemplazo de envergadura de los cables existentes) o en una subestación cercana con acceso a estas tensiones más bajas.
- Todos los derechos de paso necesarios pueden obtenerse a un precio relativamente bajo.
- El biogás puede utilizarse directamente en los motores de combustión interna sin tratamiento alguno. Eso supone que existen niveles tolerables de siloxanos y de H₂S.

A partir de las proyecciones de recuperación de biogás de rango medio, se estima que la planta podría operar durante un período de 6 años, desde 2015 hasta 2021 (Anexo E.1).

Tabla 3.6 Costos de un Sistema de conducción de biogás

COMPONENTES	COSTO (USD)
Movilización y gestión del proyecto	\$ 66 000
Nuevos pozos de recolección de biogás (20 m de profundidad promedio)	\$ 132 000
Modificaciones a los pozos de venteo existentes	\$ 180 000
Equipos de bombeo de lixiviado (estimados como necesarios para el 25% de los pozos)	\$ 40 000
Tubería colectora principal de recolección de biogás (estimada en alrededor de 2 590 m con diámetro de 200 mm) y válvulas de los cabezales	\$ 132 000
Tubería latera (estimada alrededor de 404 m con diámetro de 110mm)	\$ 35 000
Manejo de condensado	\$ 48 000
Equipo de succión-combustión (antorcha cerrada de 1 155m)	\$ 355 000
Costos de ingeniería contingencia e iniciales (pre-operacionales)	\$ 152 000
Costo Total estimado	\$ 1 140 000

b) Sistema de generación eléctrica. El costo de capital inicial para la puesta en marcha de una planta de generación de energía de 633 kW (brutos) con motor de combustión interna que funciona con biogás fue de aproximadamente USD \$1 443 342. Este costo es adicional al del sistema de recolección y quema de biogás. El análisis no incluyó ningún costo relacionado con los impuestos locales a la importación ni el impuesto al valor agregado (IVA). La tabla 3.7 presenta un resumen de los costos de capital iniciales de la planta de generación de energía con motor de combustión interna que funciona con biogás.

Tabla 3.7 Costos para una planta de generación de energía

DETALLE	COSTO(USD)
Costo del Motor Generador	\$ 759 600
Costo de Ingeniería para la Instalación/Construcción (Total)	\$ 582 076
Costo del Sistema de Monitoreo para los Créditos de Carbono	\$ 35 000
Costo del Equipo para la Interconexión a la Red Eléctrica	\$ 66 666
Costo Total Estimado	\$ 1 443 342

3.5.2 Determinación de costos de operación

Con base a los estudios de la tabla 1.8 se fijó un costo presupuestario de O/M anual para el sistema de recolección de biogás de aproximadamente el 7% de los costos iniciales de construcción, con un incremento a una tasa anual del 2% por la inflación, lo cual asciende a alrededor de USD \$71 100 en 2014 (Tabla E.1) (primer año de operación. Esos costos incluyen aquellos asociados a la O/M del sistema de recolección existente, tales como mano de obra, repuestos y equipos de pruebas, mantenimiento de rutina y reparaciones del sistema y reemplazo limitado de los pozos y las tuberías existentes. Otros costos anuales incluyen aquellos vinculados con el proceso para obtener reducciones de emisiones, incluyendo los costos del monitoreo, verificación e inscripción de tales reducciones. Estos costos se estiman en USD \$30,000 antes de los ajustes por inflación (Tabla E.2).

Se consideró el costo presupuestario para la O/M anuales de la planta de generación de energía de alrededor de 2.25 centavos de USD por kilovatio-hora de generación de electricidad o de alrededor de USD \$115 000 por año (a partir de una capacidad de planta de 633 kW basados en los estudios de SCS Engineers). Esos costos incluyen aquellos asociados a la O/M de la planta de energía tales como mano de obra, repuestos y equipos de pruebas, mantenimiento y reparaciones de rutina, así como también reemplazo de equipos menores. Estos análisis se pueden observar en la tabla E.1.

En la tabla 3.8 se muestran los costos totales de los ingresos en un periodo de 14 años del uso de las opciones 1 y 2, con su respectivo escenario sin y con recirculación.

Tabla 3.8 Costos totales de ingresos

Costo	Opción	
	Sin recirculación	Con recirculación
Generación de energía eléctrica (1)	\$ 10 506 370.52	\$ 10 481 579.91
Quema de biogás (2)	\$ 4 081 725.15	\$ 4 056 934.54

3.5.3 Análisis de sensibilidad

Se presenta para cada tipo de generación de biogás los flujos considerando la venta de BC. En esta etapa se analizó el efecto que produce el cambio del precio del BC en la rentabilidad de los proyectos estudiados. Para ésto se definieron cuatro escenarios con los siguientes valores: \$ 2.5, \$ 5, \$ 10 y \$ 20 por tCO₂e.

Como puede apreciarse en la figura 3.16, la generación de energía eléctrica (E_E) es viable solo con un costo de USD\$10, mientras que para los BC (B_C) es viable a un precio de USD\$ 20, cabe aclarar que el valor de BC para USD \$2.5 se ha omitido, debido a que es un número negativo grande (>-16%).

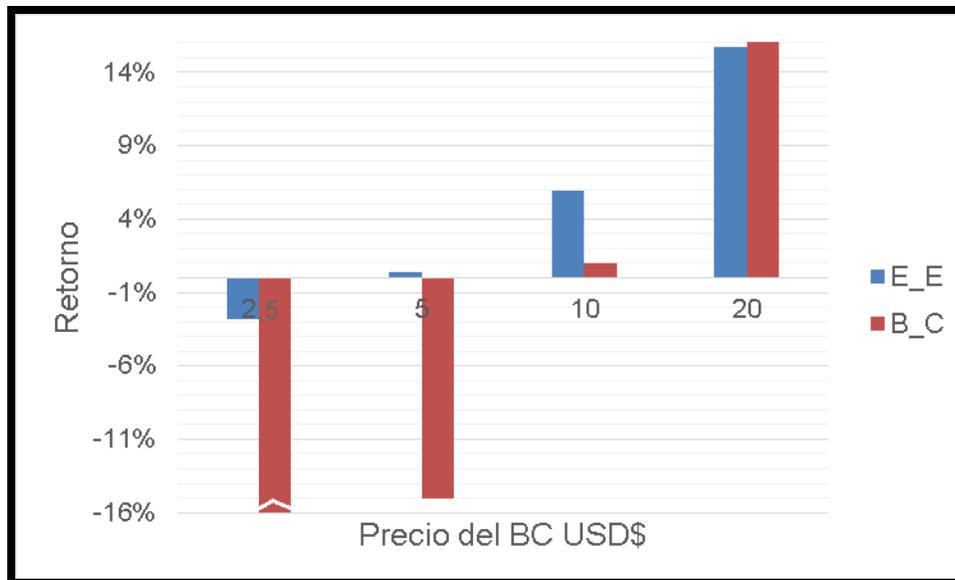


Figura 3.16 Analisis de sensibilidad con MMB

Por ultimo, para el caso con MODUELO con y sin recirculación, se observa una tendencia similar en la figura 3.17, teniendo como resultado que conviene trabajar con E_E y USD\$ 20 para ambos casos. Es importante señalar que solo se obtiene rentabilidad a USD\$ 20 para la E_E, mientras que para los BC, no se obtiene ninguna dentro de este rango.

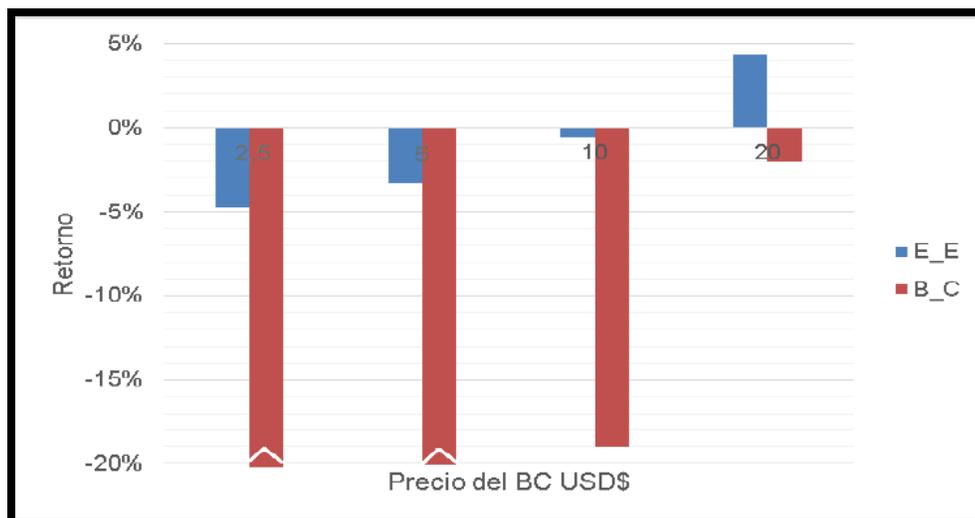


Figura 3.17 Analisis de sensibilidad con MODUELO

En la tabla 3.9 se muestra los valores de RI, VPN y RCB, de las opciones de BC y EE a un valor de BC de \$20, durante un periodo de 14 años, en las opciones 1 y 2 con sus respectivos escenarios sin y con recirculación de lixiviados.

Tabla 3.9 Indicadores de viabilidad del proyecto a \$20 USD/t CO₂ e

	BC			EE		
	MMB	M_S_R	M_C_R	MMB	M_S_R	M_C_R
RI	19%	-2%	-2%	16%	4%	4%
VPN	\$2 468 197	-\$201 773	-\$202 381	\$3 557 846	\$887 875	\$887 267
RCB	2.05	0.91	0.91	1.80	1.20	1.20

BC: bonos de carbono; EE: energía eléctrica; MMB: modelo mexicano de biogas; M_S_R: MODUELO sin recirculación; M_C_R: MODUELO con recirculación; RI: retorno de inversión; VPN: valor presente neto; RCB: rango costo beneficio.

Como se puede observar en las tablas F.1 y F.2 si se proyecta la inversión desde el inicio de operaciones (2007) del RESA y a \$20 USD el precio de BC; los valores de RI, VPN y RCB son superiores a lo establecido, corroborando que la generación de electricidad y venta de BC generan los mayores dividendos siendo viable este tipo de proyectos.

CONCLUSIONES

- De acuerdo a la caracterización realizada en estiaje (2013), existen diferencias entre celdas, destacando los componentes de degradación rápida, que tienen un 50% de diferencia entre la Cs y C03.
- El MMB proyectó más del 40% de generación de biogás que MODUELO, obteniendo con este último una mayor similitud en concentraciones de CH₄ con respecto a los datos recabados en campo, corroborando que MODUELO tiene menor incertidumbre que MMB, debido a que requiere mayor información.
- Los análisis de la evaluación económica demostraron que para obtener mayores ganancias, se deben de implementar las tecnologías al inicio de la operación del RESA, esto debido a que se aprovecha el biogás generado desde su inicio, razón por la cual en este trabajo se consideró desde 2007.
- La opción de generación eléctrica aunado con los BC (Opción 1), demostró la rentabilidad del proyecto con el análisis de sensibilidad a un costo de \$20 USD/t CO₂ e.
- Conforme a los indicadores de viabilidad, la realización del proyecto de generación de electricidad con el escenario de MMB es cuatro veces más atractivo que con MODUELO, sin embargo con este último los resultados son menos inciertos y corroboran que la recirculación de lixiviados es una opción viable, además de que incluye su tratamiento.

RECOMENDACIONES

- Establecer una estación meteorológica en el sitio con capacidad de obtención de datos de humedad relativa, insolación, velocidad del viento, temperatura media, temperatura máxima y mínima diaria, así como la precipitación pluvial por hora, para tener seguimiento de las condiciones climatológicas para futuras simulaciones con MODUELO.
- Generar muestreos semanales para una mejor caracterización de los RSU con el fin de acercar los valores a lo real.
- Rediseñar los pozos en los que se realizara la recirculación de lixiviados, debido a que actualmente se recircula en los mismos pozos de venteo.
- Revalorar los diseños de las celdas ya que no cumple lo teórico con lo recabado en campo.

FUENTES CONSULTADAS

- Aguilar-Virgen, Q., Taboada-González, P. A., Ojeda-Benítez, S. 2011. Modelo mexicano para la estimación de la generación de biogás. Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 15, No. 1, 2011, ISSN 1665- 529X. 38-39
- Anaya Durand Alejandro., Pedroza Flores Humberto. 2008. Escalamiento, el arte de la ingeniería química: Plantas piloto, el paso entre el huevo y la gallina. Tecnología y Ciencia Editorial. (IMIQ) 23(1): 31-39
- APHA. 2005. (American Public Health Association). Standard Methods for Water and Wastewater. American Water Works Association. Water Environment Federation Publication. Búsqueda en línea el 20 de Octubre de 2013. <http://www.standardmethods.org/store/ProductList.cfm>
- Autodesk. 2011. Inc Autodesk Exchange. Búsqueda en línea el 09 de Octubre de 2013. <http://exchange.autodesk.com/autocad/esp/onlineelp/ACD/2012/ESP/Pages/WS1a9193826455f5ff18cb41610ec0a2e719-796b.htm>
- Baasel, W. D. 1990. Preliminary Chemical Engineering Plant Design. Van Nostrand Reinhold, 2a Ed. 32-37
- BID-OPS. 1997. Diagnóstico de la Situación del Manejo de Residuos Sólidos Municipales en América Latina y el Caribe. Banco Interamericano de Desarrollo. 100
- Borglin S.E., T.C. Hazen., C.M. Oldenburg. 2004. Comparison of aerobic and anaerobic biotreatment of municipal solid waste, J. Air Waste Manage. Assoc. 54n. 815–82
- BVSDE. 2013. (Biblioteca virtual de desarrollo sostenible). Relleno sanitario. Búsqueda en línea el 09 de Octubre de 2013 <http://www.bvsde.paho.org/sde/ops-sde/bvsde.shtml>
- Camargo, Y. Vélez, A. 2009. Emisiones de biogás producidas en rellenos sanitarios. III Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos de Ingeniería de Residuos Barranquilla. 1-2

- Castrillón L., Nava F., Ulmanu M., Anger I., Marañón E. 2010. Physico-chemical and biological treatment of MSW landfill leachate. *Waste Management*. V 30, n 2. 228-235
- Charles T. Horngren, George Foster, Srikant M. Datar. 2007. *Contabilidad de costos: un enfoque gerencial*. 236
- Conde Cecilia. 2007. México y el cambio climático global. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARANT). Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). ISBN: 978-968-817-868-3. 17
- Córdoba V., Blanco G., Santalla E. 2009. Modelado de la generación de biogás en rellenos sanitarios. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 13*. ISSN 0329-5184. 69
- Corzo Miguel Ángel. 1986. *Introducción a la ingeniería de proyectos*. Editorial Limusa. 43-47
- Costa López José. 1998. *Curso de química técnica: Introducción a los procesos, las operaciones unitarias y los fenómenos de transporte en la ingeniería química*. Reverte. ISBN 8429171266, 9788429171266. 380
- COCEF, 2009. (Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza). *Estudio de Factibilidad para el Aprovechamiento de Metano en el Relleno Sanitario Municipal y Taller Regional de Promoción de la Iniciativa de Metano para Mercados en Nogales*. 2-10
- Cossu R., Rossetti D. 2003. Pilot scale experiences with sustainable landfilling based on the PAF conceptual model, in: *Proceedings of the Ninth International Waste Management and Landfill Symposium, Cagliari, Italy*. 6–10
- Cruz R., Orta M., Sánchez J. 2001. Estimación de la generación de lixiviados en rellenos sanitarios mediante un balance de agua en Querétaro, México: *Memorias del AMCRESPAC*. 2
- Cruz R., Orta M., Sánchez J., Rojas M. 2002. *Cuantificación de Efectos Ambientales de un Tiradero a Cielo Abierto, Caso de Estudio*” XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. 1-2

- Czinkota Hoffman. 2007. Principios de Marketing, Y Sus Mejores Prácticas. Cengage Learning Editores. ISBN 9706864903, 9789706864901. 292
- DBGIR, 2012. Diagnostico básico para la gestión integral de los residuos. Resumen ejecutivo. SEMARNAT. INECC. 71
- Delgado Hernández María Claudia. 2013. Tratamiento de lixiviados mediante su recirculación en residuos sólidos urbanos. Instituto Tecnológico de Toluca. México. 23
- Dresser-Rand. 2014. Cotización motogenerador de biogás. <http://www.directindustry.com/prod/dresser-rand-guascor-engines-gensets/biogas-generator-sets-23116-434708.html>
- DuBois E., Mercier A. 2009. ENERGY RECOVERY. Nova Science Publishers, Inc. ISBN 978-1-61728-402-1. 76-77
- LGPGIR. 2014. Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR). México. 2003 (8 de octubre). Última reforma 19 de Marzo de 2014. Búsqueda en línea el 20 d Marzo de 2014. http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/lgpgir/LGPGIR_ref07_19mar14.pdf
- ECOPROG. 2012. Study Waste to Energy 2010-2011. Krefelder Str. 18. 50670 Cologne. Germany. IBAN: DE96 3705 0198 1900 209287. VAT ID: DE814576618. 833-834
- EPA. 2005. (Environmental protection agency). MSW Landfill Criteria Technical Manual. Búsqueda en línea el 1 Abril de 2013. <http://www.epa.gov/osw/nonhaz/municipal/landfill/techman>
- EPA. 2013. (Environmental protection agency). MSW. Landfill Criteria Technical Manual. Búsqueda en línea el 1 de Abril de 2013. <http://www.epa.gov/osw/nonhaz/municipal/landfill/techman>
- GEM. 2012. (Gobierno del Estado de México). Programa de protección civil para basureros. 31-37
- GEM. 2013 (Gobierno del Estado de México). Búsqueda en línea el 1 de Mayo de 2013. <http://portal2.edomex.gob.mx/edomex/inicio/index.htm>

- Gereffi Gary. 2001. Las cadenas productivas como marco analítico para la globalización. Problemas del desarrollo, Vol. 32, núm. 125.
- GIA. 2012. (Grupo de Ingeniería Ambiental). Manual del usuario MODUELO 4.0 Grupo de Ingeniería Ambiental. Universidad de Cantabria. 19, 52, 73-77
- Giraldo E. 2001. Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios: avances recientes. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de Los Andes. 44, 45, 50
- González Ariza, Ángel León. 2003. Manual práctico de investigación de operaciones 1, 3ra edición barranquilla: ediciones Uninorte. 151
- Gonzalorenna Vallejos Ricardo J., López Martínez Ana, Lobo García de Cortázar Amaya. 2011. Simulación de una celda-vertedero aislada usando MODUELO 4.0. Hacia la sustentabilidad: Los residuos sólidos como fuente de energía y materia prima. ISBN 978-607-607-015-4. 403-408
- Google Earth. 2013. Foto de satélite de Zinacantepec. Búsqueda en línea el 3 de Mayo de 2013. <http://earth.google.com>.
- Guascor, 2014. Motogenerador de biogás. Búsqueda en línea el 17 de Febrero de 2014. http://www.dresser-rand.com/literature/guascor/85250_SFGLD360.pdf
- HACH. 1997. Manual de Análisis de Agua. Búsqueda en línea el 10 de Abril de 2013. <http://www.hach.com/quick.search-quick.search.jsa?keywords=an%C3%A1lisis+de+agua>.
- Hernández A Luis Alfredo. 1996. Tecnologías para el aprovechamiento del gas producido por la digestión anaeróbica de la materia orgánica. Agronomía Colombiana, Volumen XIII, No. 1. 76-90
- Hernández Cano Graciela, Duran Domínguez de Bazúa María del Carmen. 2004. Seguimiento de la producción de biogás en un relleno sanitario clausurado. Technol. Ciencia Ed. (IMIQ) 19(1). 14-20
- Himmelblau David M. 1997. Principios básicos y cálculos en ingeniería química. Editado por Roberto Luis Escalona García. Pearson Educación. Capítulo 3 Balance de materia. 141
- Incremi. 2013. Estudio de factibilidad para el aprovechamiento de del metano en el relleno sanitario de municipal de Saltillo, Coahuila. 7-17

- INE. 2001. Instituto Nacional de Ecología. Guía para la gestión integral de los residuos sólidos municipales. ISBN 968817498X, 9789688174982. 73
- INECC. 2010. (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). Potencial de mitigación de gases de efecto invernadero en México al 2020 en el contexto de la cooperación internacional. Instituto Nacional de Ecología. 10-12
- INECC. 2012. (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). Quinta Comunicación Nacional de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Programas para mitigar el cambio climático. 30-32
- INECC. 2013. (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). Cambio Climático en México. El Mercado de "Bonos de Carbono". Búsqueda en línea el 10 de Abril de 2013. http://cambioclimatico.inecc.gob.mx/sectprivcc/mercadobonos_carbono.html
- INEGEI. 2002. Inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero (INEGEI) 1990-2002. SEMARNAT (Secretaría del medio ambiente y recursos naturales). INE (Instituto nacional de ecología). México. DF. XXXII. Cap. Residuos. 30
- INEGEI. 2012. Inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero. SEMARNAT (Secretaría del medio ambiente y recursos naturales). INE (Instituto nacional de ecología). México. D.F. 31
- IPCC. 2007. Panel Intergubernamental de Cambio Climático. Resumen Técnico. In Cambio Climático 2007: Mitigación. Contribución del Grupo de Trabajo III al Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático. B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave, L. A. Meyer (eds), Cambridge University Press, Cambridge, UK y NY. 6
- Ishigaki W. T., Sugano A. N., Tadeta M. I., Fujita M. 2003. Application of bioventing to waste landfill for improving waste settlement and leachate quality a lab scale model study, J. SolidWaste Technol. Manage. 230–238.
- Johann Fellner, Gernot Döberl, Gerhard Allgaier, Paul H. Brunner. 2009. Comparing field investigations with laboratory models to predict landfill leachate emissions. Waste Management 29. 1844–1851

- Kjeldsen P., M. A. Barlaz, A. P. Rooker, A. Baun, A. Ledin and T. H. Christensen. 2002. Present and long-term composition of MSW landfill leachate: A review. *Critical reviews in environmental science and technology*. 297-336
- LGPGIR. 2014 Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Búsqueda en línea el 10 de Abril de 2013. http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/lgpgir/LGPGIR_ref07_19mar14.pdf
- López J., Peralta P., 2005. Use of advanced oxidation processes to improve the biodegradability of mature landfill leachates. *Journal of Hazardous Materials*. B123. 181-186.
- Luna Y., Vilches E., Vale L., Querol J., Fernández X., 2007. Use of zeolitised cal fly ash for landfill leachate treatment: A pilot plant study. *Waste Management*. 27. 1877-1883.
- Marquez Benavides L. 2004. Study of the effect of soil inclusion on the anaerobic degradation of municipal solid waste. University of Strathclyde in Glasgow, United Kingdom: PhD Thesis. Department of Bioscience. 5-7
- Martin González Santiago, Fernández Fernández Santiago. 2000. Gestion del biogas en vertederos controlados de residuos sólidos urbano. Servicio de publicaciones del principado de Asturias. España. 215
- Martínez Sifuentes Victor Hugo. 2000. Simulación de Procesos en Ingeniería Química. Plaza y Valdes. ISBN 9688567558, 9789688567555. 37
- MASERA. 2006. (Mantenimientos y Servicios Ambientales S.A. de C.V). Proyecto ejecutivo para el saneamiento y construcción de dos celdas de disposición final de residuos sólidos urbanos, en el municipio de Zinacantepec, Edo. Mex. Toluca, México. 12-40
- MASERA. 2013. (Mantenimientos y Servicios Ambientales S.A. de C.V). Informe de capacidad de almacenamiento en celdas de confinamiento [Informe]. Toluca. México. 1-2
- Miranda. 2004. El desafío de la gerencia de proyectos: alcance-tiempo-presupuesto-calidad. Bogotá. MM editores.127

- Morales Sosa Hugo Andrés. 2006. Ingeniería Vial I. Santo domingo. ISBN 99934-25-67-2. 45-46
- Morris J.W.F., Vasuki N.C., Baker J.A., Pendleton C.H.. 2003. Findings from long-term monitoring studies at MSW landfill facilities with leachate recirculation. Waste Management 23. 653–666
- Nájera Aguilar Hugo Alejandro, Gómez Ramos J. Manuel, García Lara Carlos, Gutiérrez Hdez Rubén., Rojas Valencia Ma. Neftalí. 2010. Manejo de biogás y lixiviados en rellenos sanitarios del centro de México, un panorama general. LACANDONIA, año 4, vol. 4, no. 2. 117-131
- Naylor, T.H., 1982. Experimentos de simulación en computadoras con modelos de sistemas económicos. Editorial Limusa. México. 510
- Nitayapat N. 2003. Assessment of the toxicity of chlorophenols to the anaerobic microorganisms of landfilled refuse University of Strathclyde in Glasgow Department of Bioscience. 162
- NOM-083-SEMARNAT. 2003. Norma Oficial Mexicana Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. 16
- OCDE. 2013. Las emisiones de gases de efecto invernadero, OCDE Estadísticas del medio ambiente (base de datos). Búsqueda en línea el 1 Abril de 2013. <http://oe.cd/disclaimer>
- Ogata Katsuhiko. 2003. Ingeniería de Control Moderna. Pearson Educación. Capítulo 3. 53
- PACC_BC. 2012. Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático de Baja California. SEMARNAT (Secretaría del medio ambiente y recursos naturales). INE (Instituto nacional de ecología). GBC (Gobierno de Baja California). 3
- PDN. 2007. Plan de Desarrollo Nacional 2007-2012. Gobierno Federal Eje Temático Sustentabilidad Ambiental, Rubro 4.7 Residuos Sólidos y Peligrosos, D.O.F. 31 de Mayo de 2007. 81

- PECC. 2009. Programa especial del cambio climático. Diario oficial de la nación. Poder ejecutivo federal. Búsqueda en línea el 9 de Marzo de 2014. http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5107404&fecha=28/08/2009
- PEACC_BC. 2012. Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático de Baja California. SEMARNAT. INE. Gobierno de Baja California. México. 1
- Peña Miralles Juan, Coli Aliaga C., Ginestar Peiró Damián, Sánchez Juan Elena. 1999. Fundamentos Matemáticos de la Ingeniería: Cálculo. Ed. Univ. Politéc. Valencia. Capítulo 4 Interpolación. 78
- PNUD. 2012. Programa de las naciones unidas para el desarrollo. Consultoría para la integración y análisis de la información relacionada con políticas y medidas de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), implementadas en el periodo 2009-2012 a nivel nacional, estatal y local en los sectores agropecuario y forestal. 2
- Prieto G., Prieto O., Gay C. R. 1996. Diseño estadístico experimental aplicado en la primera etapa del escalamiento de un proceso químico. Información tecnológica. Vol. 7 No. 5. 67
- RMB. 2010. La Bioenergía en México: Estudio de caso. Cuaderno temático No. 1. Red Mexicana de Bioenergía A. C. 93-94
- Reinhart D. R., McCreanor P. T., y Townsend T. G. 2002. The bioreactor landfill: Its status and future. Waste Management & Research, Vol. 20. 172–186
- Ruo He, Dong-sheng Shen, Jun-qin Wang, Yong-hua He, Yin-mei Zhu. 2005. Biological degradation of MSW in a methanogenic reactor using treated leachate recirculation. Process Biochemistry 40. 3660–3666
- Sanchez Yañes Juan Manuel., Baltierra Trejo Eduardo., Márquez Benavides Liliana. 2012. El efecto de los gases de relleno sanitario en el crecimiento vegetal Journal of the Selva Andina Research society. 55-56.
- SCS Engineers. 2008. Estudio de Prefactibilidad para la Recuperación y la Utilización del Biogás en el Relleno Sanitario Loma de Los Cocos Cartagena de Indias, Colombia. Elaborado por Alex Stege y Jim Michelsen Director del Proyecto: José Luis Dávila 11260 Roger Bacon Drive Reston, Virginia 20190. 3-7

- SCS Engineers. 2009. Manual del Usuario Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0 Phoenix, AZ 85008: Landfill Methane Outreach Program. Agencia para la Protección del Ambiente (U.S. EPA). 5-27
- SCS Engineers. 2006. Report of the pump test and pre-feasibility study for landfill gas recovery and utilization at the Nuevo Laredo landfill Nuevo Laredo, Mexico: PA Consulting. 6-8
- SCS Engineers. 2007. informe de la prueba de extracción y estudio de prefactibilidad para recuperación y utilización de biogás en el relleno sanitario de ensenada Ensenada, México. Alex Stege y Jim Michelsen. 6-7
- SCS Engineers. 2013. Estudio de Prefactibilidad Utilización de Biogás de Relleno Sanitario Relleno Sanitario 1113. Alex Stege y Jim Michelsen. 30
- SEMARNAT. 2006. Bases para Legislar la Prevención y Gestión Integral de Residuos. 13-14
- SEMARNAT. 2007. Secretaria del medio ambiente y recursos naturales. Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2007-2012, PNMARN. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 170
- SEMARNAT. 2009. Secretaria del medio ambiente y recursos naturales. Estudio de evaluación de tecnologías alternativas o complementarias para el tratamiento o disposición final de los residuos sólidos urbanos. 289
- SEMARNAT. 2013. Secretaria del medio ambiente y recursos naturales. Residuos sólidos urbanos y de manejo especial. Búsqueda en línea el 11 de Marzo de 2013. <http://www.semarnat.gob.mx/temas/residuos/solidos/Paginas/solidos.aspx>
- SEMARNAT. 2013a. Secretaria del medio ambiente y recursos naturales (SEMARNAT). Efecto invernadero Búsqueda en línea el 26 de Febrero de 2014. http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_R_AIRE02_01&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce
- SEMARNAT. 2013b. Semarnat. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave y de Desempeño Ambiental. Edición 2012. 328

- Sinan Bilgili M. *, Demir Ahmet, Ozkaya Bestamin. 2006. Influence of leachate recirculation on aerobic and anaerobic decomposition of solid wastes. *Journal of Hazardous Materials* Volume 143, Issues 1–2. 177–183
- SMN. 2013 Sistema Meteorológico Nacional. Búsqueda en línea el 5 de Noviembre de 2013. http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=75
- Snijders Paul, Wuttke Thomas, Zandhuis Anton. 2014. El Compañero de Bolsillo de la Guía del PMBOK. una breve introducción a la guía de los fundamentos para la dirección de proyectos. Van Haren Publishing, Zalrbommel. ISBN: 978-90-8753-752-4. 6.5
- Sponza Delia Teresa., Nuri Agdag Osman. 2004. Impact of leachate recirculation and recirculation volume on stabilization of municipal solid wastes in simulated anaerobic bioreactors. *Process Biochemistry* 39. 2157–2165
- Sunil Kumar, Chart Chiemchaisri y Ackmez Mudhoo. 2011. Bioreactor landfill technology in municipal solid waste treatment: An overview. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2011; 31(1): 77–97. Informa Healthcare USA, Inc. ISSN 0738-8551. 80
- Taha Hamdy A.. 2004. Investigación de Operaciones. Edition 7 Pearson Educación. ISBN 9702604982, 9789702604983. 639
- Tchobanoglous George., Theissen Hilary., Eliassen Rolf. 1982. Desechos sólidos. Principios de ingeniería y administración. Venezuela: Ambiente y los recursos renovables. 67
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S.A 1994. Gestión Integral de Residuos Sólidos, traducción y revisión técnica Juan Ignacio Tejero Monzon, José Luis Guil Diaz, Marcel Szanto Narea. McGraw-Hill, Madrid. 22-28
- Tchobanoglous G, Kreith F. 2005. Handbook of solid waste management. New York: Mc Graw Hill. Cap. 14.
- Tiago Luis Gomes, Gino Roberto Gehlingel. 2009. Relleno sanitario en el caturrita maría santa, una actualización sobre el potencial de la digestión anaerobia. *TECNO-LÓGICA*, Santa Cruz do Sul, v. 13, n. 2. 75-85

- Torrance George W. 1991. Métodos para la evaluación económica de los programas de atención de la salud. Ed. Díaz de Santos. 161-169
- Ulrich Gael D. 2004. Diseño y economía de los procesos de ingeniería química. Mc Graw Hill interamericana de México S.A. de C.V. - Vols. ISBN 970-10-0087-0. 242-243
- UNAM. 2013. Universidad Nacional Autónoma de México). Contabilidad de costos. Búsqueda en línea el 4 de Mayo de 2013. www.economia.unam.mx/sua/site/materia/sem1/costos/..../Costos.doc?
- Uriegas Torres Carlos. 1987. Análisis económico de sistemas en la ingeniería. Limusa. 52, 189 y 523
- Valderrama J.O., Véliz C.R. 2003. Simulación de ciclos de vapor con cogeneración usando una ecuación de estado. Información Tecnológica—Vol. 14, No. 4. ISSN 0718-0764. 29
- Velasco E y Bernabe R. M. 2004. Emisiones biogénicas: las emisiones de compuestos orgánicos volátiles no metano de la vegetación y óxido nítrico del suelo. Instituto Nacional de Ecología. Capítulo segundo. 57
- Williams P.T. 2005. Waste Treatment and Disposal. 2nd Edition. John Wiley & Sons, Chichester. Búsqueda en línea el 3 de Marzo de 2014. http://books.google.com.mx/books?id=JJBeTviuPeQC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Wiszniewski J., D. Robert., J. Gorska, K. Miksch., J. Weber, 2006. Landfill leachate treatment methods: A review. Environ Chem Lett. 51-61
- Zhang H., He P., Shao L. 2012. Methane Emissions from MSW Landfill with Sandy Soil Covers under Leachate Recirculation and Subsurface Irrigation. Atmospheric Environment, Vol. 42, No. 22. 5579-5588.
- Zhao Xianda, Reem Musleh, Seth Maher, Milind V. Khire, Thomas C. Voice, Syed A. Hashsham. 2008. Start-up performance of a full-scale bioreactor landfill cell under cold-climate conditions. Waste Management 28. 2623–2634
- Zhou Xiao., Sang Shu., Cao Li. 2012. La degradación de los residuos sólidos urbanos y vertederos características de los recursos de gas en el auto-

recirculación secuenciación por lotes biorreactor vertedero. Springer. 3551–3557.

ANEXOS

Anexo A. Recopilación de información.

A.1 Ubicación RESA de Zinacantepec

Como se puede apreciar en la figura 3.4, el sitio operaba como tiradero a cielo abierto y a cargo del ayuntamiento municipal de Zinacantepec, observándose lo que actualmente es la celda saneada. Es entonces que en 2006, los ejidatarios de los terrenos donde se localiza el sitio, optan por contratar a la empresa MASERA para sanear el sitio y convertirlo en un RESA, en la figura A.1 se puede apreciar el saneamiento de la celda, la celda 01, celda 02 y están depositando RSU en la celda 03. En la figura A. 2, se observa que empiezan con trabajos para crear lo que actualmente es la celda 04.

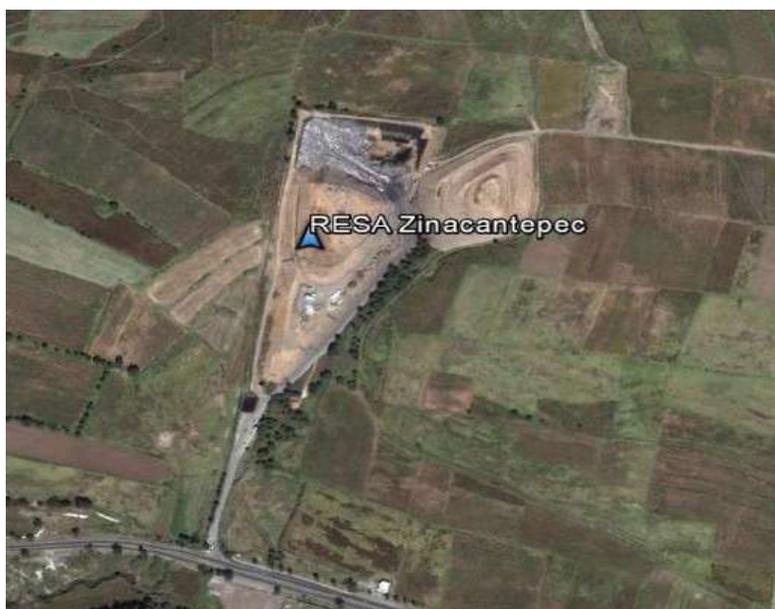


Figura A.1 RESA en el año 2011

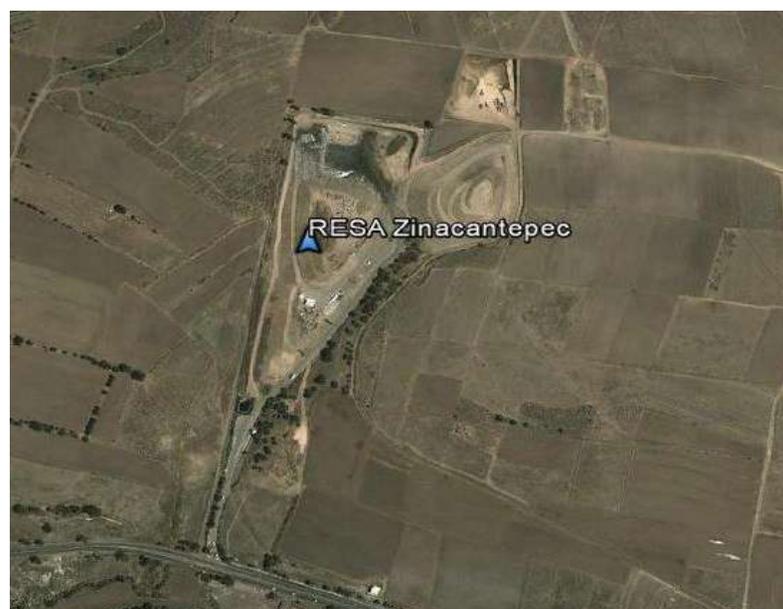


Figura A.2 RESA en el año 2012

A.2 Pozos de venteo

Tabla A.1 Coordenadas y alturas sobre el nivel del mar de los pozos de venteo

Pozo	Ubicación	ASNМ*
1	N19 19.707 W99 46.293	2778 m
2	N19 19.694 W99 46.309	2774 m
3	N19 19.684 W99 46.330	2781 m
4	N19 19.669 W99 46.343	2781 m
5	N19 19.651 W99 46.358	2779 m
6	N19 19.633 W99 46.371	2771 m
7	N19 19.615 W99 46.384	2763 m
8	N19 19.594 W99 46.388	2759 m
9	N19 19.575 W99 46.396	2752 m
10	N19 19.652 W99 46.317	2772 m
11	N19 19.630 W99 46.341	2772 m
12	N19 19.607 W99 46.359	2770 m
13	N19 19.575 W99 46.374	2760 m
14	N19 19.685 W99 46.277	2781 m
15	N19 19.677 W99 46.251	2786 m
16	N19 19.706 W99 46.267	2780 m
17	N19 19.697 W99 46.250	2786 m
18	N19 19.657 W99 46.377	2769 m
19	N19 19.686 W99 46.366	2778 m
20	N19 19.711 W99 46.355	2781 m
21	N19 19.730 W99 46.349	2783 m
22	N19 19.723 W99 46.318	2782 m
23	N19 19.719 W99 46.335	2783 m
24	N19 19.704 W99 46.343	2780 m

* ASNМ: Altura Sobre el Nivel del Mar.

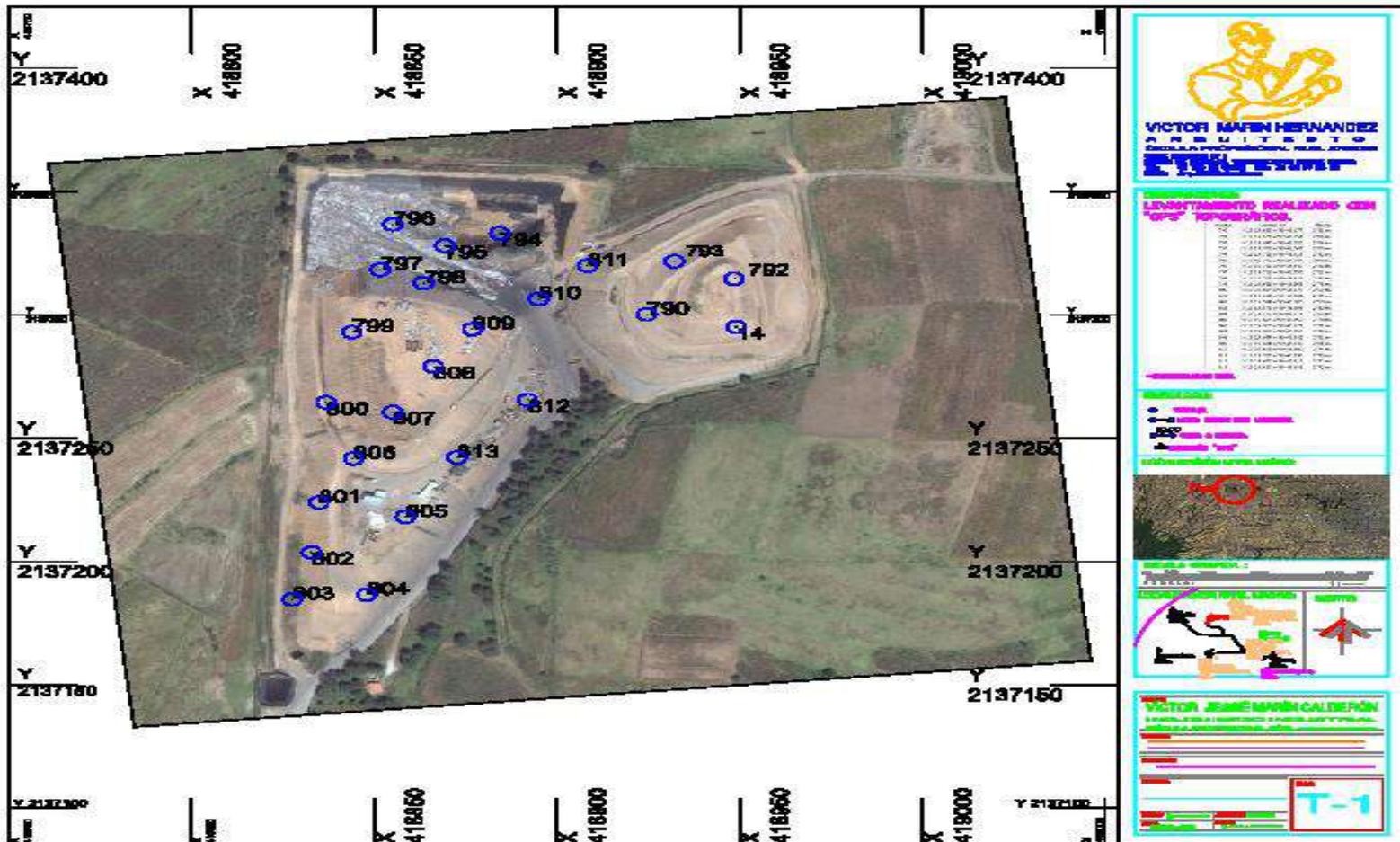


Figura A.3 Geolocalización de pozos de venteo

A.3 Caracterización de RSU

Tabla A.2 Caracterización de RSU en Cs y C01.

	Subproductos	% Total
1	Papel	6.49%
2	Cartón	5.40%
3	Cuero	0.75%
4	Envases de cartón encerado	2.78%
5	Hueso	0.74%
6	Hule	0.17%
7	Aluminio	0.61%
8	Losa o cerámica	0.03%
9	Madera	1.19%
10	Material de construcción	0.11%
11	Material ferroso	1.36%
12	Pañal desechable y toallas sanitarias	5.53%
13	Bolsas de polietileno	3.58%
14	Pet	2.59%
15	Plásticos	3.19%
16	Materia orgánica	56.72%
17	Vidrio	2.55%
18	Telas y trapo	1.71%
19	Suelo	2.55%
20	Otros	1.97%
	Totales	100.00%

Fuente: MASERA, 2006.

Tabla A.3 Caracterización de RSU de la C02

	Categorías de subproductos	Peso (kg)	%
1	Unicel	3	0.51%
2	Material de fundición	10	1.69%
3	Fibra vegetal	10.5	1.77%
4	Hule	7.5	1.27%
5	Plástico de película	50.5	8.52%
6	Metal no ferroso	1.5	0.25%
7	Metal ferroso/Latas	8	1.35%
8	Cerámicos	5	0.84%
9	Material de construcción	26	4.39%
10	Tetra pack	9.5	1.60%
11	Plástico rígido	28	4.73%
12	Higiénicos	17	2.87%
13	Pañales	29.5	4.98%
14	Vidrio	23	3.88%
15	Tela	16.5	2.78%
16	Papel	28	4.73%
17	Residuos jardinería	11	1.86%
18	Huesos	2	0.34%
19	Madera	4	0.68%
20	Cartón	19	3.21%
21	Medicamentos	3	0.51%
22	Material eléctrico	0.5	0.08%
23	Varios	127.5	21.52%
24	Finos	130	21.94%
25	Alimentos	22	3.71%
26	Cuero	0	0.00%
27	Otros	0	0.00%
	Total	592.5	100.00

Fuente: Delgado-Hernandez, 2013.

Tabla A.4 Caracterización de RSU en C03

	Categorías de subproductos	Peso (kg)	%
1	Unicel	0.61	0.44%
2	Material de Fundición	2.06	1.47%
3	Fibra vegetal	1.465	1.05%
4	Hule	1.92	1.37%
5	Plástico de película	19.66	14.03%
6	Metal no ferroso	0.32	0.23%
7	Metal ferroso/Latas	1.113	0.79%
8	Cerámicos	1.34	0.96%
9	Material de Construcción	7.445	5.31%
10	Tetra pack	3.17	2.26%
11	Plástico rígido	7.68	5.48%
12	Higiénicos	0-00	0.00%
13	Pañales	11.881	8.48%
14	Vidrio	1.793	1.28%
15	Tela	5.07	3.62%
16	Papel	6.931	4.95%
17	Residuos jardinería	0.495	0.35%
18	Huesos	1	0.71%
19	Madera	0.923	0.66%
20	Cartón	3.761	2.68%
21	Medicamentos	0.116	0.08%
22	Material eléctrico	0.252	0.18%
23	Varios	27.005	19.27%
24	Finos	18.085	12.90%
25	Alimentos	13.4	9.56%
26	Cuero	2.25	1.61%
27	Otros	0.4	0.29%
	Total	140.145	100%

Anexo B. Procesamiento de la información.

B.1 Arreglo de información de RSU

En la tabla B.1, se puede observar el arreglo de los datos proporcionados por la empresa MASERA S.A. de C.V., desde su saneamiento en 2006, hasta su estimado en 2014. Con los RSU acumulados, su ubicación, así como inicio y final de cada una de las celdas.

Tabla B.1 Índice de disposición

Año	RSU en Tn.	RSU Acumulados	Ubicación	t/Celda	Inicio	Final
2006	430 000	430 000	Cs		1989	2006
2007	115 500	545 500	Cs	545 500	2007	2008
2008	120 000	665 500	C01			
2009	130 000	795 500	C01	250 000	2008	2009
2010	140 000	935 500	C02			
2011	150 000	1 085 500	C02	290 000	2010	2011
2012	160 000	1 245 500	C03			
2013	160 000	1 405 500	C03			
2014	160 000	1 565 500	C03	480 000*	2012	2014*

*Estimado

B.2 Arreglo de información para el MMB

Tabla B.2 Valores de alimentación MMB

	Celdas			
	Cs	C01	C02	C03
3 Estado: México				
4 Región: Centro/interior				
5 ¿Existen datos de caracterización de residuos específicos al relleno sanitario en cuestión?	Si	Si	Si	Si
6 Año de apertura del sitio:	1989	2008	2010	2012
7 Disposición anual del año más reciente (t):	115.500	130.000	150.000	164.250
8 Año de disposición (arriba):	2007	2009	2011	2013
9 Año de clausura o año de clausura proyectado:	2007	2009	2011	2014
10 Incremento anual estimado de la disposición:	26,7%	1,0%	1,0%	0,0%
11 Profundidad promedio del relleno sanitario:	12	12	12	12
12 Prácticas de diseño y manejo del relleno sanitario:	2	2	2	2
13a ¿Ha habido algún incendio en el relleno sanitario?	No	No	No	No
13b Si la respuesta de 13a es "Si", indique el área del impacto en % del total:	0%	0%	0%	0%
13c Si la respuesta de 13a es "Si", indique la severidad del impacto del incendio:	1	1	1	1
14 Año de arranque del sistema de captura (actual/estimado):	2013	2013	2013	2013
15 Porcentaje del área con residuos con sistema de captura:	60%	60%	60%	60%
16 Porcentaje del área con residuos con cubierta final:	100%	100%	100%	100%
17 Porcentaje del área con residuos con cubierta intermedia:	50%	60%	60%	60%
18 Porcentaje del área con residuos con cubierta diaria:	0%	80%	80%	80%
19 Porcentaje del área con residuos sin cobertura:	-50%	-140%	-140%	-140%
20 Porcentaje del área de residuos con recubrimiento inferior de arcilla/geomembrana:	100%	100%	100%	100%
21 ¿Se compactan los residuos regularmente?	Si	Si	Si	Si
22 ¿La disposición de residuos se hace en un área específica?	Si	Si	Si	Si
23a Existen afloramientos/bortes de lixiviado en la superficie del relleno sanitario?	No	No	No	No
23b Si la respuesta de 23a es "Si", ¿esto ocurre solo después de llover?	No	No	No	No
24 Eficiencia de captura estimada:	63%	77%	77%	77%

Tabla B.3 Caracterización de celdas

Categoría de Residuo	Cs*	C01*	C02**	C03
Comida	56.7%	56.7%	3.7%	9.6%
Papel y Cartón	14.1%	14.1%	9.2%	9.4%
Poda (jardines)	0%	0%	3.6%	1.4%
Madera	1.2%	1.2%	0.7%	0.7%
Caucho, Piel, Huesos y Paja	1.5%	1.5%	0.3%	2.3%
Textiles	1.7%	1.7%	2.8%	3.6%
Papel Higiénico	2.8%	2.8%	3.9%	4.2%
Otros Orgánicos	0%	0%	21.9%	12.9%
Pañales (asume 20% orgánico / 80% inorgánico)	2.8%	2.8%	3.9%	4.2%
Metales	2.2%	2.2%	1.8%	1.3%
Construcción y Demolición	0.1%	0.1%	6.1%	6.8%
Vidrio y Cerámica	2.6%	2.6%	4.7%	2.2%
Plásticos	9.8%	9.8%	15.2%	21.5%
Otros Inorgánicos	4.5%	4.5%	22.1%	19.8%
Porcentaje de degradación muy rápida	57.3%	57.3%	26.4%	23.3%
Porcentaje de degradación moderadamente rápida	2.8%	2.8%	7.6%	5.6%
Porcentaje de degradación moderadamente lenta	15.8%	15.8%	12.0%	13.1%
Porcentaje de degradación muy lenta	2.7%	2.7%	1.0%	3.0%
Total Orgánicos	78.5%	78.5%	47.0%	45.0%
Total Inorgánicos	21.5%	21.5%	53.0%	55.0%

*MASERA, 2006; **Delgado-Hernández, 2013.

B.3 Arreglo de información para MODUELO

En la tabla B.3 se muestran las variables para alimentar a MODUELO, en este caso solo se muestra como ejemplo los datos de las CS, debido a la gran cantidad de espacio que se necesitaria.

Tabla B.4 Caracterización de celdas

		Cs_a	Cs_b	
Modelo morfológico de diseño				
Parámetros de discretización		Tiradero	Basic	
1	Mínimo de espesor	10	10	m
2	Tamaño en X de la celda	7	7	m
3	Tamaño en Y de la celda	8	8	m
4	Espesor de la capa	2.8	2.8	m
5	Radio de selección	1	1	-
Tamaño del modelo				
6	Numero de celdas en X	33	17	-
7	Numero de celdas en Y	39	20	-
8	Numero de celdas en Z	13	11	-
Origen de coordenadas				
9	Coordenadas de celdas en el eje X	-4 191.50	-4208.58	-
10	Coordenadas de celdas en el eje Y	3 985.46	3 943.67	-
11	Coordenada de celdas en el eje Z	245.5	266.5	-
Tamaño del terreno				
12	Tamaño en X	57	110	m
13	Tamaño en Y	357	140	m
14	Tamaño en Z	36.4	25	m
Terreno				
15	Conductancia hidráulica equivalente	0.0000001	0	s ⁻¹
16	Nivel freático externo	0	0	m
Modelo hidrológico				
Modelo de infiltración superficial				
17	Velocidad de infiltración mínima	11.43	2.59	mm
18	Velocidad de infiltración máxima	127	80	mm
19	Parámetro de Horton	4.14	4.14	h ⁻¹
Modelo de evapotranspiración				
20	Profundidad de evaporación	0.2	0.3	m
21	Punto de marchitez	100	100	%

Modelo de escorrentía superficial				
22	Máxima acumulación superficial	0.1	0.05	m
Modelo de flujo preferencial				
23	Fracción de volumen afectado	50	25	%
24	Factor de permeabilidad	100	100	-
Modelo humedad residual				
25	Humedad residual mínima del residuo	5	5	%
26	Influencia de presión en humedad	4 536	4 536	Kg/m ₂
Modelo biodegradación				
27	Tiempo de activación de la hidrólisis rápida	0	0	d
28	Tiempo de activación de la hidrólisis lenta	365	0	d
29	Tiempo de activación de la metanogénesis	365	0	d
30	Constante de hidrólisis rápida	0.0025	0.0025	d ⁻¹
31	Constante de hidrólisis lenta	0.00013	0.00013	d ⁻¹
32	Constante de acetogénesis	0.03	0.03	d ⁻¹
33	Constante de metanogénesis acetofílica	0.19	0.19	d ⁻¹
Constante de metanogénesis hidrogenofílica				
34	Fracción de carbono transformada en compuestos intermedios de la hidrólisis	0.76	0.76	-
35	Fracción de carbono transformada en acetato en la hidrólisis	0.2	0.2	-
36	Fracción de carbono transformada en acetato en la acetogénesis	0.68	0.68	-
Modelo de Temperatura				
Modelo de asentamientos				
37	Coefficiente de compactación	0.16	0.16	-
38	Coefficiente de pérdida de masa convertida en asientos	0.25	0.25	-
Características de las celdas				
Características de residuos				
39	Humedad residual inicial	20	16	%
40	Capacidad de campo inicial	32	29	%
41	Humedad inicial de saturación	60	48	%
42	Conductividad hidráulica vertical inicial	0.0001	0.00002	m/s
43	Conductividad hidráulica horizontal inicial	0.0005	0.0001	m/s
Características de cobertura				
44	cobertura	0	0.2	m
45	Humedad inicial	27	27	%
46	Densidad inicial	1 300	1 300	Kg/m ₃
47	Humedad residual inicial	26	26	%
48	Capacidad de campo inicial	27	27	%

49	Humedad de saturación inicial	30	30	%
50	Permeabilidad vertical inicial	0.000002	0.000002	m/s
	Sistema de recolección de lixiviados*			
51	Pendiente de drenaje	0.02	0.2	-
52	Numero de celdas servidas por el dren	Doble	1	-
53	Pendiente de las capas hacia el dren	0.02	0.2	-
54	Conductancia hidráulica equivalente bajo el dren	0	0	s ⁻¹
	espesor de grava	0.05		m
	conductancia dren de grava	0.001		m/s
	Condición para la recirculación			
55	Escorrentía menor que...	5	5	m ³ /d
56	Lixiviado menor que...	10	10	m ³ /d
Modelo de generación de residuos				
	Composición			
57	Composición elemental del componente	Tchobanog lous	Tchobano glous	%
	Biodegradabilidad			
58	Biodegradabilidad	rápida	rápida	-
59	Fracción biodegradable	56	56	%
	Periodos de generación			
60	Generación por componentes y mensual	Si	Si	-
	Generación global mensual			
61	Composición	si	si	%
62	Biodegradabilidad	no	no	%
63	Generación mensual global	no	no	-
64	Factor de accesibilidad	0.5	0.5	-
65	Factor de arrastre	0.1	0.1	-
66	Contenido global de humedad	no	no	%
67	Densidad global	0.72	0.85	Tn/m ³
	Generación por componentes y población			
68	Composición por componentes	100	100	%
	Modelo Meteorológico	V/M	V/M	
	Modelo Almacenamiento de lixiviados			
69	Capacidad de almacenamiento	?	120	m3
70	Superficie horizontal	?	?	m2
71	Tasa de evaporación media	?	?	m3/d
72	Tasa de sedimentación	?	?	d-1
73	Fracción sedimentable	?	?	%
74	Tasa de degradación a 10°C	?	?	d-1
75	Coefficiente de Arrhenius	?	?	-

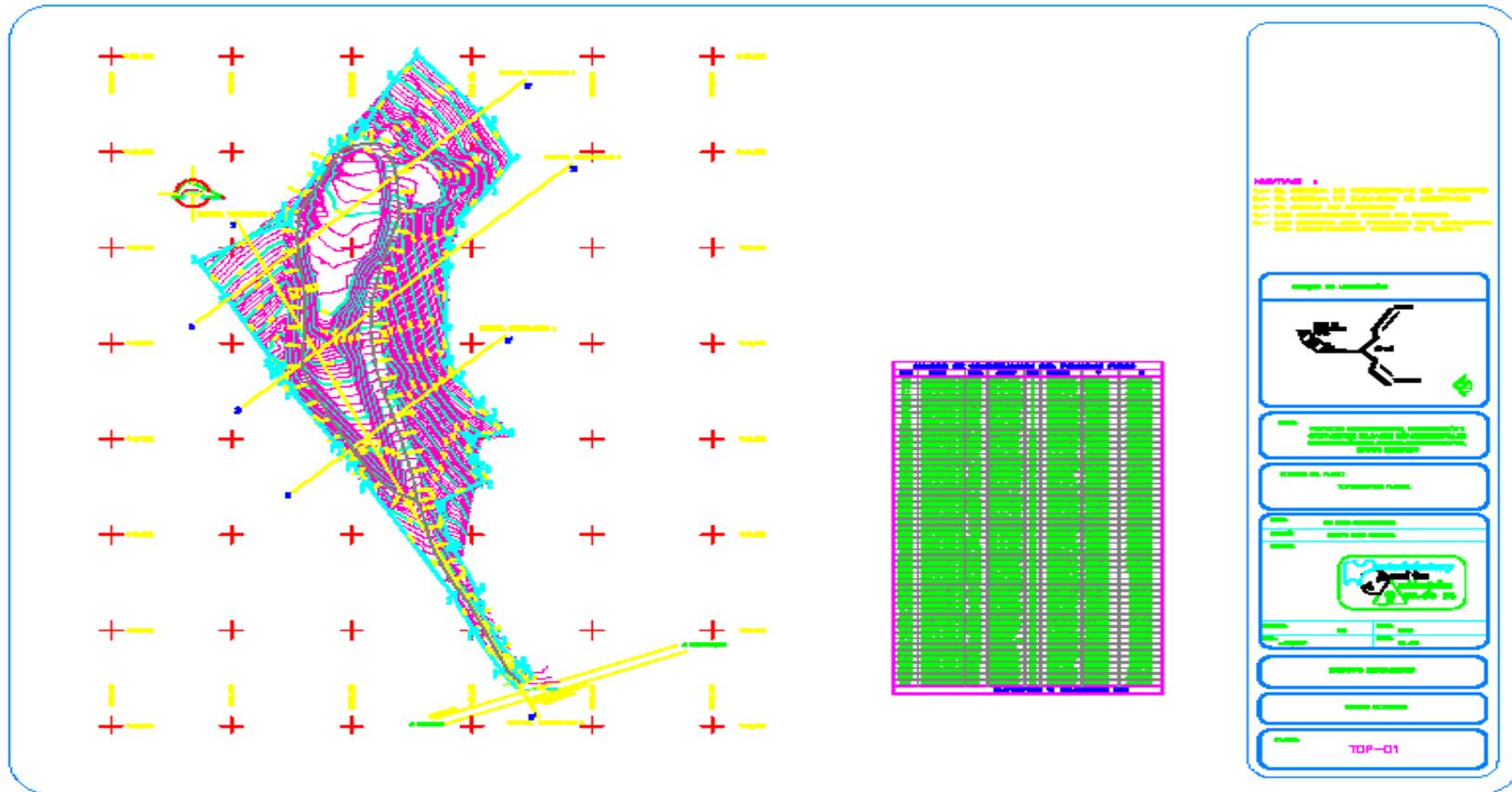


Figura B.1 Curvas de nivel del RESA

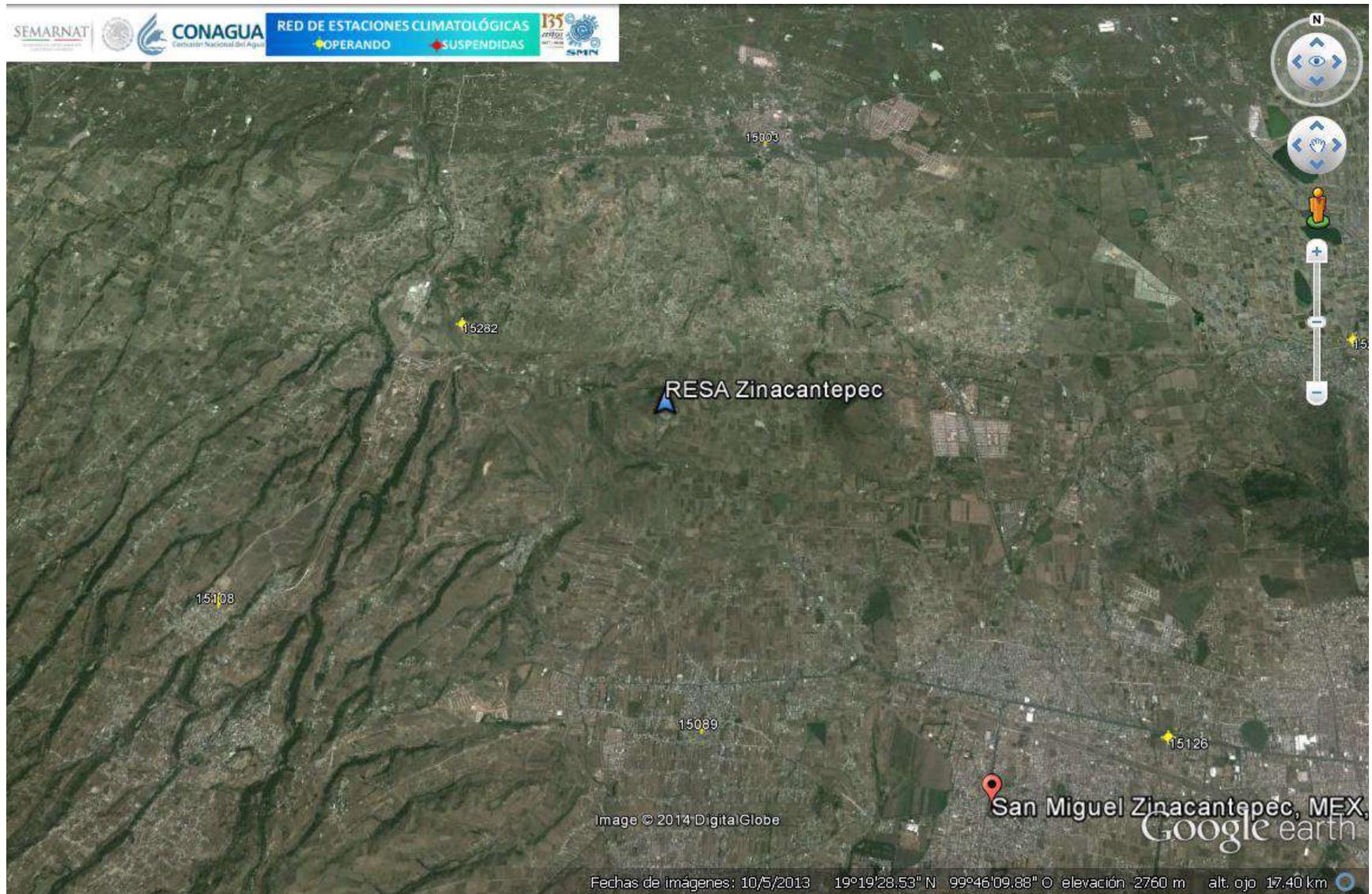


Figura B.2 Estaciones meteorológicas cerca del RESA

Tabla B.5 Muestreo en campo

Pozo/Celda	Metano (CH ₄)	Bioxido de carbono (CO ₂)	Flujo	Temperatura	Poder calorífico
	% mol B.S.	% mol B.S.	m ³ /h	°C	BTU
6/Cs	37.20	24.75	3.30	26.20	12.30
13/Cs	34.25	20.15	ND	24.00	ND
14/C1	53.10	52.70	6.45	41.80	37.96
17/C1	24.85	25.65	2.18	44.60	2.53
10/C2	57.35	56.95	5.95	24.70	25.50
11/C2	39.55	39.15	3.40	23.80	1.87
18/C3	13.10	6.25	2.05	27.41	1.50
22/C3	12.23	11.80	1.37	29.85	1.05

ND, No detectado

Tabla B.6 Caracterización de celdas

Parámetro	Cs	C01, C02 y C03	Unidad	Comentario
Velocidad de infiltración mínima	11.43	2.59	mm	Velocidad de infiltración de agua al final del aguacero; suelo arenoso y arcilloso
Velocidad de infiltración máxima	127	80	mm	Velocidad de infiltración de agua al inicio del aguacero
Parámetro de Horton	4.14	4.14	h ⁻¹	Tasa de disminución de la filtración a lo largo del tiempo
Profundidad de evaporación	0.2	0.3	m	Profundidad máxima
Punto de marchitez	100	100	%	Mínimo contenido de humedad en el que puede quedar la celda por efecto de la evapotranspiración
Máxima acumulación superficial	0.1	0.05	m	Altura máxima de almacenamiento de agua en superficie antes de que se produzca la escorrentía
Fracción de volumen afectado	50	25	%	Porcentaje del volumen de la celda que se encuentra con canales preferenciales
Factor de permeabilidad	100	100	-	Es la relación entre la conductividad hidráulica en la zona de flujo preferencial y la conductividad hidráulica
Humedad residual mínima del residuo	5	5	%	Humedad residual mínima que alcanzaría el residuos cuando la presión sobre el mismo es infinita
Influencia de presión en humedad	4536	4536	kg/m ²	Expresa la variación de la humedad residual del residuo con sobrepresión



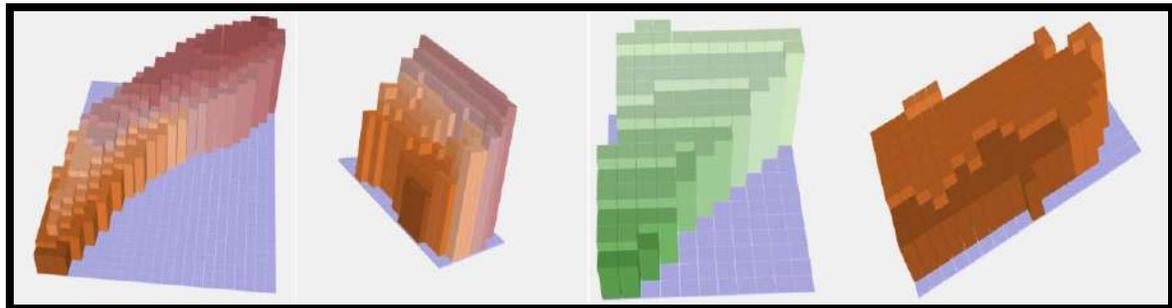
a) Cs

b) C01

d) C02

e) C03

Figura B.3 Planos de proyecto en Autocat



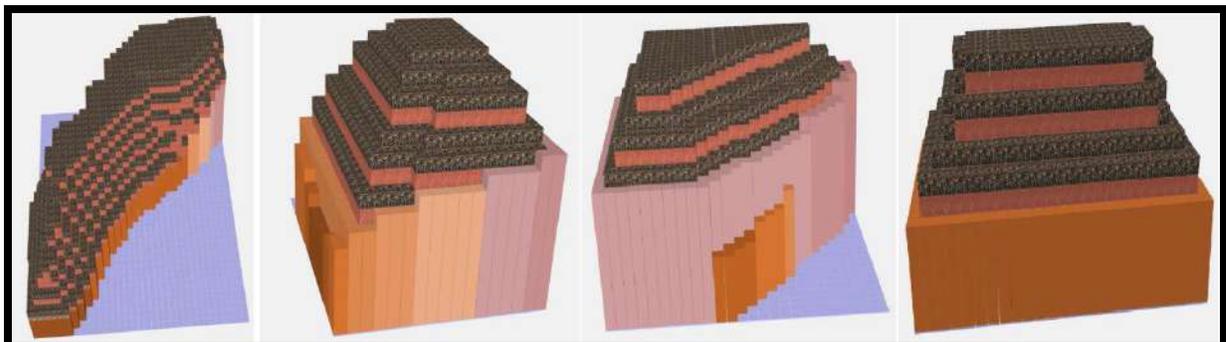
a) Cs

b) C01

d) C02

e) C03

Figura B.4 Modelo de terreno con celdas de vertido de RSU



a) Cs

b) C01

d) C02

e) C03

Figura B.5 Modelo morfológico con celdas de residuos

Tabla B.8 Resultados de simulación para Cs

	Cs_N	Cs_R	Unidad
Precipitación	786 750	786 750	m ³
Volumen evaporado	36 723	36 723	m ³
Evaporación superficial	2 521	2 529	m ³
Evaporado en la subsuperficie	345 219	345 212	m ³
Infiltración	684 833	684 935	m ³
Contenido de humedad	615 072 253	616 289 902	m ³
CH ₄	17.6	20.47	m ³ /h
Lixiviado recogido	214 307	259 724	m ³
DQO (max)	10 652	10 652	mg O ₂ /L
DBO (max)	1 618	1 618	mg O ₂ /L
NH ₃ (max)	115	258	m ³
Filtraciones laterales	27 241	29 593	m ³
DQO (max)	17 289	17 289	mg O ₂ /L
DBO (max)	5 125	5 125	mg O ₂ /L
NH ₃ (max)	27	30	kg
Filtraciones por el fondo	257 107	272 242	m ³
DQO (max)	12 089	12 089	mg O ₂ /L
DBO (max)	5 165	5 165	mg O ₂ /L
NH ₃ (max)	119	166	kg
Lixiviado recirculado	0	62 856	m ³

Cs_N: Celda saneada sin recirculación

Cs_R: Celda saneada con recirculación

Anexo C. Estimación preliminar de biogás.

C.1 Modelo Mexicano de Biogás (MMB)

Tabla C.1 Estimaciones de biogás

Año	Disposición (Mg/año)	Disposición Acumulada (Mg)	Generación de Biogás			Eficiencia del Sistema de Captura (%)	Recuperación de Biogás Estimada			Capacidad Máxima de la Planta de Electricidad* (MW)	Reducción de Emisión Estimadas**	
			(m ³ /h)	(pies ³ /min)	(mmBtu/h)		(m ³ /h)	(pies ³ /min)	(mmBtu/h)		(t CH ₄ /yr)	(t CO ₂ eq/yr)
1989	1 600	1,600	0	0	0.00	63%	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0
1990	2 000	3,600	3	1	0.04	63%	1.6	0.9	0.0	0.0	0	0
1991	2 500	6,100	5	3	0.09	63%	3.3	2.0	0.1	0.0	0	0
1992	3 200	9,300	9	5	0.15	63%	5.4	3.2	0.1	0.0	0	0
1993	4 100	13,400	13	7	0.22	63%	7.9	4.6	0.1	0.0	0	0
1994	5 200	18,600	17	10	0.31	63%	10.9	6.4	0.2	0.0	0	0
1995	6 600	25,200	23	14	0.42	63%	14.7	8.7	0.3	0.0	0	0
1996	8 400	33,600	31	18	0.55	63%	19.4	11.4	0.3	0.0	0	0
1997	10 600	44,200	40	24	0.72	63%	25.4	14.9	0.5	0.0	0	0
1998	13 400	57,600	52	31	0.93	63%	32.7	19.3	0.6	0.1	0	0
1999	17 000	74,600	67	39	1.19	63%	42.0	24.7	0.8	0.1	0	0
2000	21 500	96,100	85	50	1.52	63%	53.7	31.6	1.0	0.1	0	0
2001	27 200	123,300	109	64	1.94	63%	68.4	40.3	1.2	0.1	0	0
2002	34 500	157,800	138	81	2.47	63%	87.0	51.2	1.6	0.1	0	0
2003	43 700	201,500	176	103	3.14	63%	110.6	65.1	2.0	0.2	0	0
2004	55 400	256,900	223	131	3.98	63%	140.4	82.6	2.5	0.2	0	0
2005	70 200	327,100	283	166	5.05	63%	178.2	104.9	3.2	0.3	0	0
2006	88 900	416,000	359	211	6.41	63%	226.1	133.1	4.0	0.4	0	0

Año	Disposición (Mg/año)	Disposición Acumulada (Mg)	Generación de Biogás			Eficiencia del Sistema de Captura (%)	Recuperación de Biogás Estimada			Capacidad Máxima de la Planta de Electricidad* (MW)	Reducción de Emisión Estimadas**	
			(m ³ /h)	(pies ³ /min)	(mmBtu/h)		(m ³ /h)	(pies ³ /min)	(mmBtu/h)		(t CH ₄ /yr)	(t CO ₂ eq/yr)
2007	115 500	531 500	455	268	8.13	63%	286.6	168.7	5.1	0.5	0	0
2008	120 000	651 500	581	342	10.39	63%	366.2	215.5	6.5	0.6	0	0
2009	130 000	781 500	700	412	12.50	63%	440.7	259.4	7.9	0.7	0	0
2010	140 000	921 500	820	482	14.65	63%	516.3	303.9	9.2	0.9	0	0
2011	150 000	1 071 500	853	502	15.24	63%	537.2	316.2	9.6	0.9	0	0
2012	164 300	1 235 800	894	526	15.98	63%	563.3	331.5	10.1	0.9	0	0
2013	164 250	1 400 050	934	550	16.69	63%	588.3	346.3	10.5	1.0	0	0
2014	164 300	1 564 350	972	572	17.37	63%	612.5	360.5	10.9	1.0	0	0
2015	0	1 564 350	1,009	594	18.04	63%	635.9	374.3	11.4	1.1	1 994	41 882
2016	0	1 564 350	906	533	16.18	63%	570.6	335.8	10.2	0.9	1 789	37 577
2017	0	1 564 350	816	480	14.57	63%	513.8	302.4	9.2	0.9	1 611	33 836
2018	0	1 564 350	737	434	13.17	63%	464.3	273.3	8.3	0.8	1 456	30 579
2019	0	1 564 350	669	393	11.95	63%	421.2	247.9	7.5	0.7	1 321	27 738
2020	0	1 564 350	609	358	10.88	63%	383.5	225.7	6.9	0.6	1 203	25 253
2021	0	1 564 350	556	327	9.94	63%	350.4	206.2	6.3	0.6	1 099	23 076
2022	0	1 564 350	510	300	9.11	63%	321.4	189.1	5.7	0.5	1 008	21 164
2023	0	1 564 350	469	276	8.39	63%	295.8	174.1	5.3	0.5	928	19 479
2024	0	1 564 350	434	255	7.75	63%	273.2	160.8	4.9	0.5	857	17 990
2025	0	1 564 350	402	237	7.18	63%	253.2	149.0	4.5	0.4	794	16 672
2026	0	1 564 350	374	220	6.68	63%	235.4	138.5	4.2	0.4	738	15 500
2027	0	1 564 350	348	205	6.23	63%	219.5	129.2	3.9	0.4	688	14 456
2028	0	1 564 350	326	192	5.82	63%	205.3	120.8	3.7	0.3	644	13 522
2029	0	1 564 350	306	180	5.46	63%	192.6	113.4	3.4	0.3	604	12 683

C.2 MODUELO

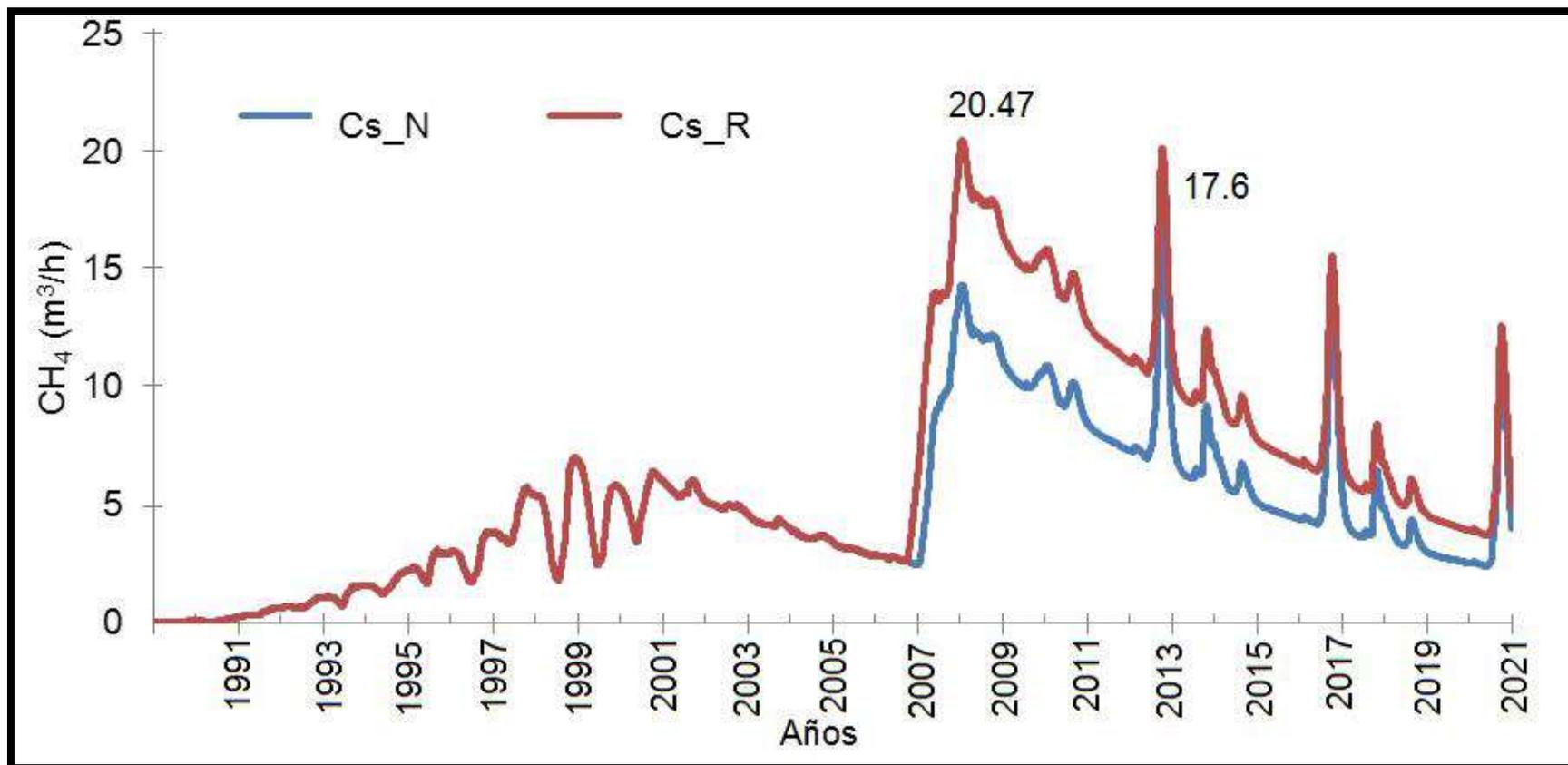
Figura C.1 Generación de CH₄ simulada con MODUELO en Cs con y sin recirculación de lixiviados

Tabla C.2 Comparativa C01

	C01_Normal	C01_Recirculado	Unidad
Precipitación	197 414	197 414	m ³
Volumen evaporado	8 887	8 887	m ³
Evaporación superficial	428	13 437	m ³
Evaporado en la subsuperficie	67 019	64 252	m ³
Infiltración	161 290	164 038	m ³
Contenido de humedad	393 753 024	506 827 380	m ³
CH ₄	92.13	105.33	m ³ /h
Lixiviado recogido	109 877	2 155 196	m ³
DQO (máx.)	28 668	24 756	mg O ₂ /L
DBO (máx.)	4 439	5 052	mg O ₂ /L
NH ₃ (máx.)	661	3 038	kg
Filtraciones laterales	0.1	72 006	m ³
DQO (máx.)	11 243	26 812	mg O ₂ /L
DBO (máx.)	2 890	5 336	mg O ₂ /L
NH ₃ (máx.)	0	137	kg
Filtraciones por el fondo	0	0	m ³
Lixiviado recirculado	0	2 195 346	m ³

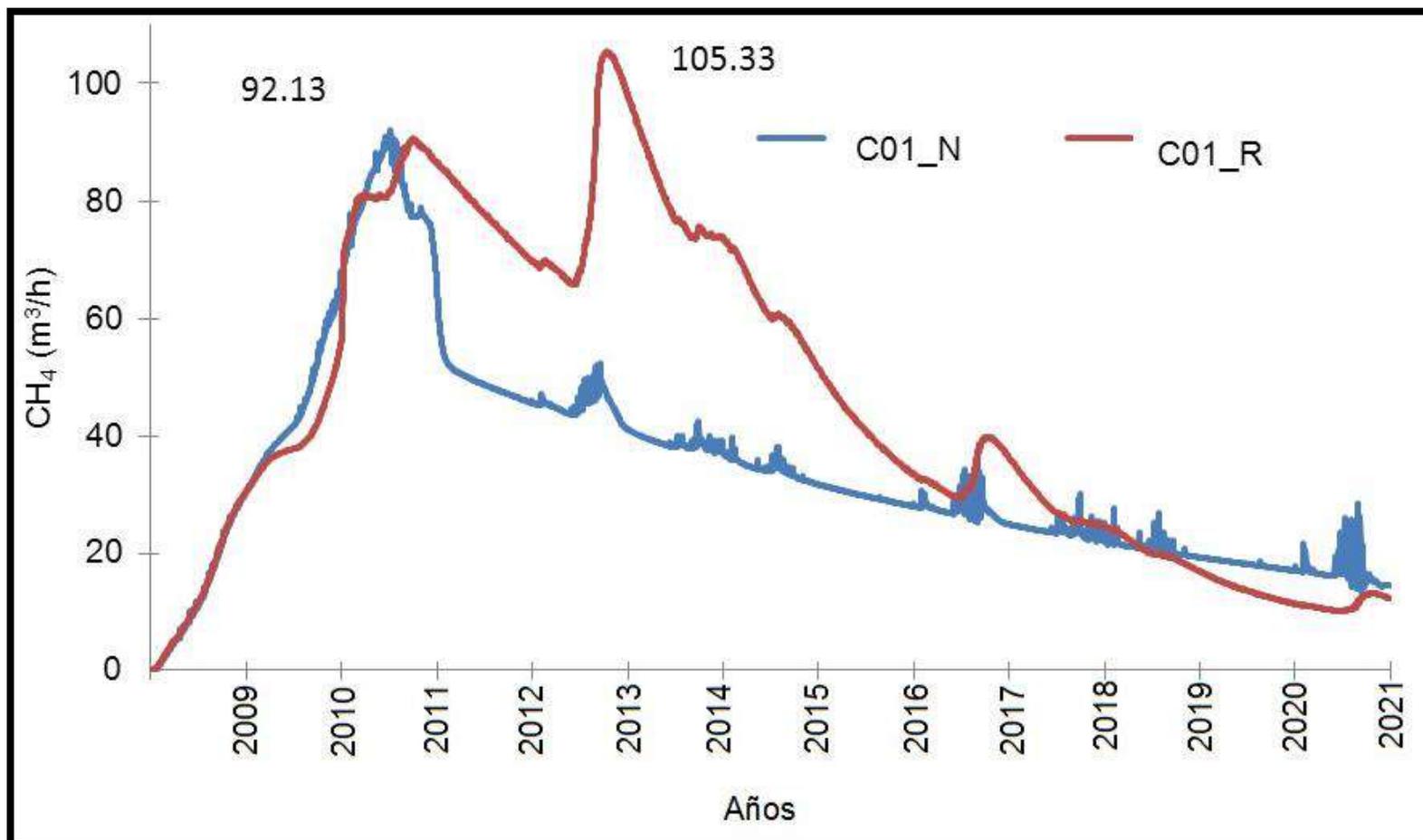


Figura C.2 Generación de CH₄ simulada con MODUELO en C01 con y sin recirculación de lixiviados

Tabla C.3 Comparativa C02

	C02_N	C02_R	Unidad
Precipitación	222 858	222 858	m ³
Volumen evaporado	9 677	9 677	m ³
Evaporación superficial	532	7 247	m ³
Evaporado en la subsuperficie	81 000	79 954	m ³
Infiltración	177 752	176 376	m ³
Contenido de humedad	407 666 941	498 188 626	m ³
CH ₄	76.32	89.13	m ³ /h
Lixiviado recogido	87 321	1 347 184	m ³
DQO (máx.)	21 445	17 708	mg O ₂ /L
DBO (máx.)	2 786	3 503	mg O ₂ /L
NH ₃ (máx.)	589	2 229	kg
Filtraciones laterales	0	53 678	m ³
DQO (máx.)	0	18 882	mg O ₂ /L
DBO (máx.)	0	4 014	mg O ₂ /L
NH ₃ (máx.)	0	100	kg
Filtraciones por el fondo	0	0	m ³
Lixiviado recirculado	0	1 391 002	m ³

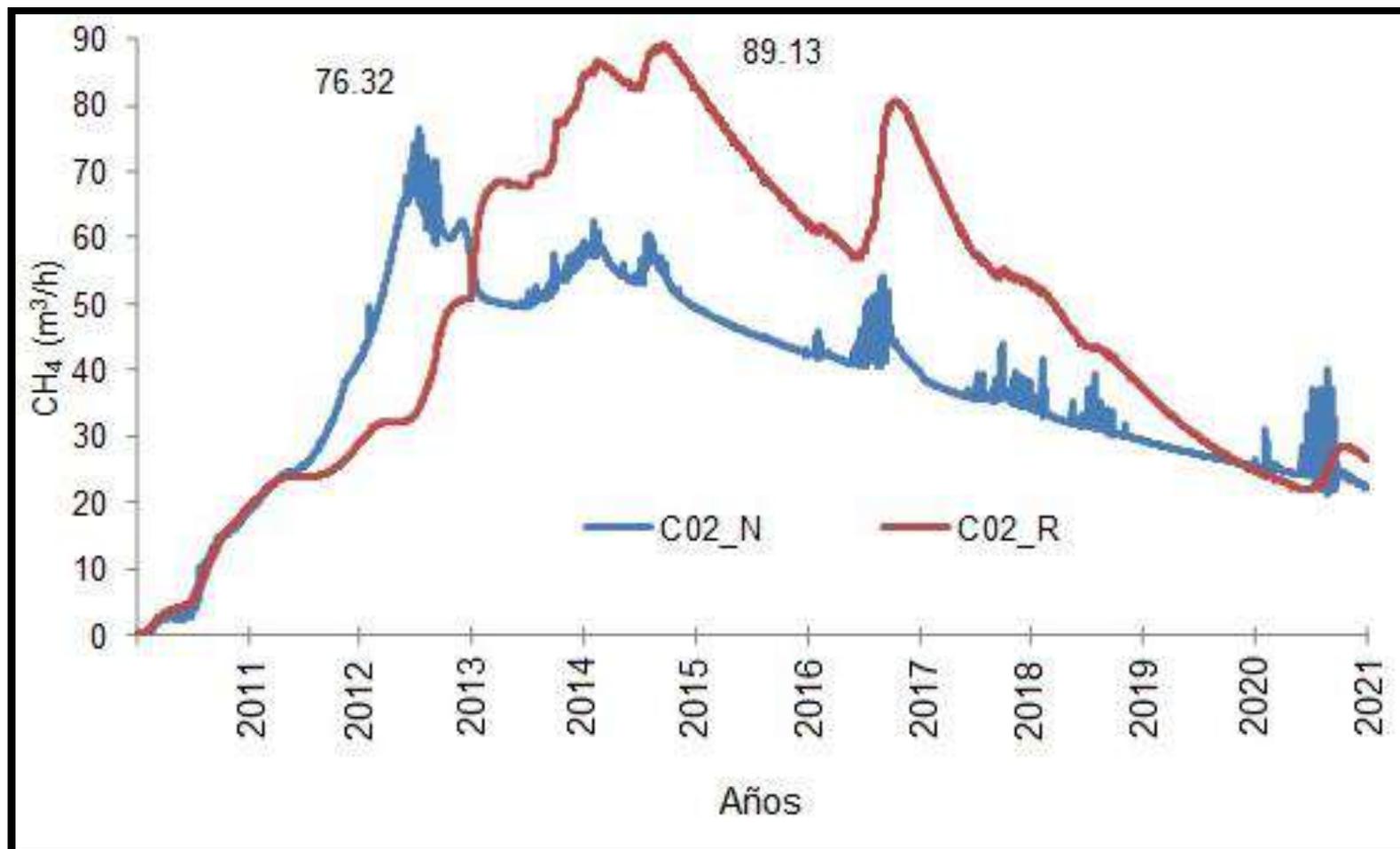


Figura C.3 Generación de CH₄ simulada con MODUELO en C02 con y sin recirculación de lixiviados

Tabla C.4 Comparativa C03

	C03_N	C03_R	Unidad
Precipitación	156 720	156 720	m ³
Volumen evaporado	6 392	6 392	m ³
Evaporación superficial	398	792	m ³
Evaporado en la subsuperficie	50 755	50 631	m ³
Infiltración	129 139	129 384	m ³
Contenido de humedad	339 123 207	389 305 689	m ³
CH ₄	52.5	64.25	m ³ /h
Lixiviado recogido	50 165	527 490	m ³
DQO (máx.)	19 201	16 423	mg O ₂ /L
DBO (máx.)	2 238	2 245	mg O ₂ /L
NH ₃ (máx.)	401	1 300	kg
Filtraciones laterales	0.0	17 393	m ³
DQO (máx.)	0	16 331	mg O ₂ /L
DBO (máx.)	0	2 312	mg O ₂ /L
NH ₃ (máx.)	0	67	kg
Filtraciones por el fondo	0	0	m ³
Lixiviado recirculado	0	541 165	m ³

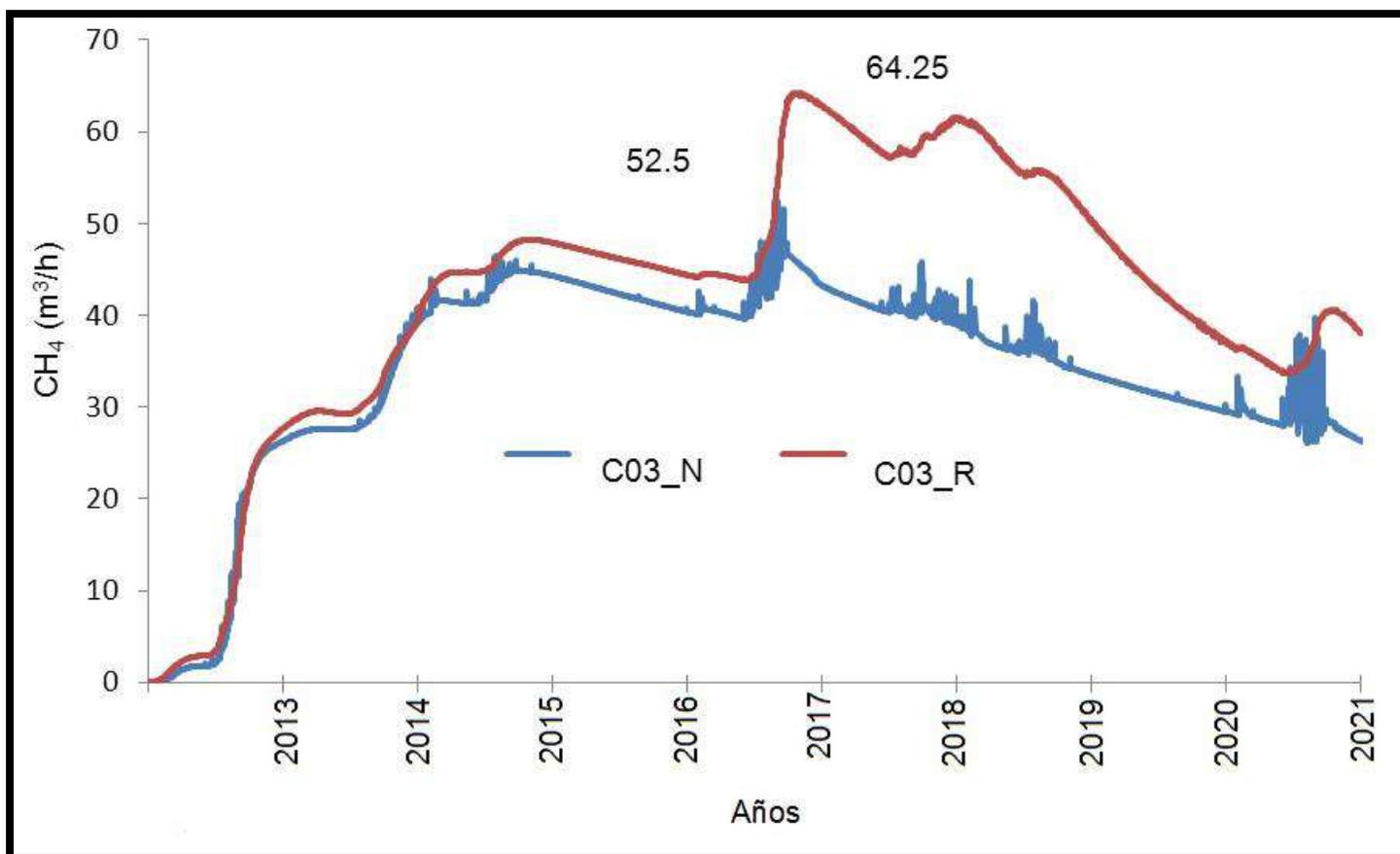


Figura C.4 Generación de CH₄ simulada con MODUELO en C03 con y sin recirculación de lixiviados

Anexo D. Escalamiento a campo de la biodegradación acelerada

D.1 Dimensionamiento y selección de equipo

Tabla D.1 Volumen de biogás generado MMB y MODUELO Sin y Con recirculación de lixiviados (M_S_R y M_C_R)

Año	MMB		M_S_R		M_C_R		Eficiencia del Sistema de Captura (%)
	Generación	Recuperación	Generación	Recuperación	Generación	Recuperación	
	(m ³ /h)						
1989	0.00	0.00	0.09	0.06	0.09	0.06	63%
1990	2.50	1.58	0.30	0.19	0.30	0.19	63%
1991	5.31	3.35	1.25	0.79	1.25	0.79	63%
1992	8.56	5.39	2.32	1.46	2.32	1.46	63%
1993	12.51	7.88	3.57	2.25	3.57	2.25	63%
1994	17.38	10.95	4.84	3.05	4.84	3.05	63%
1995	23.38	14.73	7.20	4.54	7.20	4.54	63%
1996	30.86	19.44	7.89	4.97	7.89	4.97	63%
1997	40.25	25.36	12.69	7.99	12.69	7.99	63%
1998	51.96	32.73	12.17	7.67	12.17	7.67	63%
1999	66.65	41.99	12.56	7.92	12.56	7.92	63%
2000	85.21	53.68	13.34	8.41	13.34	8.41	63%
2001	108.60	68.42	14.30	9.01	14.30	9.01	63%
2002	138.11	87.01	11.67	7.35	11.67	7.35	63%
2003	175.52	110.58	9.33	5.88	9.33	5.88	63%
2004	222.86	140.40	7.51	4.73	7.51	4.73	63%
2005	282.85	178.19	5.94	3.74	5.94	3.74	63%
2006	358.83	226.06	4.95	3.12	4.95	3.12	63%
2007	454.99	286.64	21.95	13.83	21.95	13.83	63%

Año	MMB		M_S_R		M_C_R		Eficiencia del Sistema de Captura (%)
	Generación	Recuperación	Generación	Recuperación	Generación	Recuperación	
	(m ³ /h)						
2008	581.28	366.21	76.14	47.97	76.14	47.97	63%
2009	699.54	440.71	148.48	93.54	148.48	93.54	63%
2010	819.58	516.34	213.18	134.30	241.76	152.31	63%
2011	852.64	537.16	214.14	134.91	246.05	155.01	63%
2012	894.13	563.30	305.65	192.56	293.37	184.82	63%
2013	933.87	588.34	476.12	299.95	383.23	241.43	63%
2014	972.27	612.53	402.85	253.79	377.80	238.01	63%
2015	1009.43	635.94	274.89	173.18	307.49	193.72	63%
2016	905.68	570.58	246.93	155.57	276.04	173.90	63%
2017	815.51	513.77	210.58	132.67	242.95	153.06	63%
2018	737.01	464.32	174.68	110.05	190.40	119.95	63%
2019	668.53	421.17	142.70	89.90	133.94	84.38	63%
2020	608.66	383.45	126.69	79.81	113.87	71.74	63%
2021	556.18	350.40	101.45	63.91	64.05	40.35	63%
2022	510.08	321.35	84.79	53.42	46.74	29.44	63%
2023	469.48	295.77	69.66	43.89	38.13	24.02	63%
2024	433.61	273.17	64.58	40.69	37.31	23.50	63%
2025	401.83	253.15	50.66	31.91	28.30	17.83	63%
2026	373.59	235.36	42.64	26.86	23.91	15.07	63%
2027	348.41	219.50	35.03	22.07	19.55	12.32	63%
2028	325.90	205.32	34.95	22.02	21.51	13.55	63%
2029	305.69	192.59	26.31	16.58	15.27	9.62	63%
2030	287.50	181.12	22.32	14.06	13.04	8.21	63%
2031	271.06	170.77	0	0.00	0	0.00	63%
2032	256.15	161.37	0	0.00	0	0.00	63%

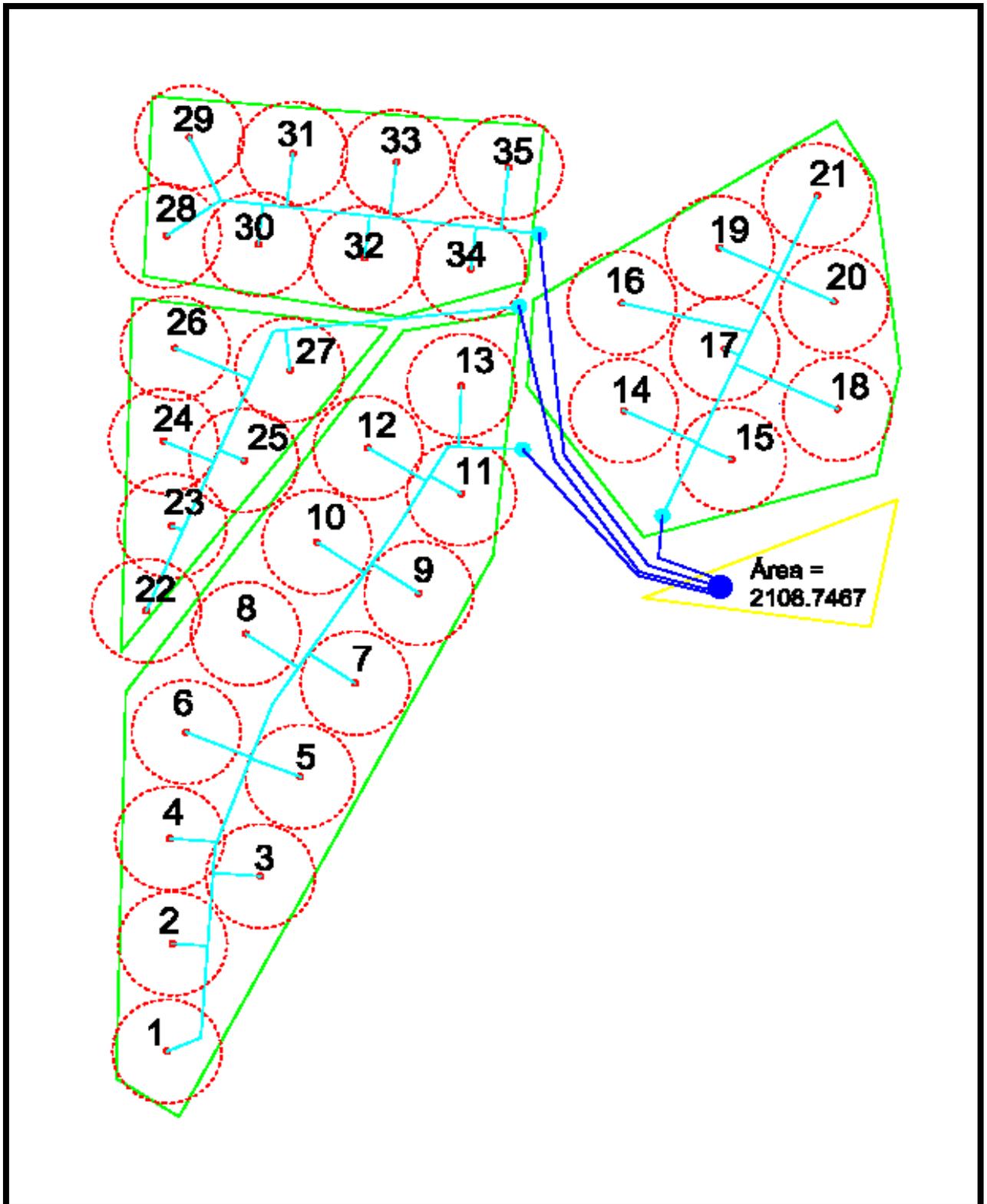


Figura D.1 Arreglo de tubería opción 01

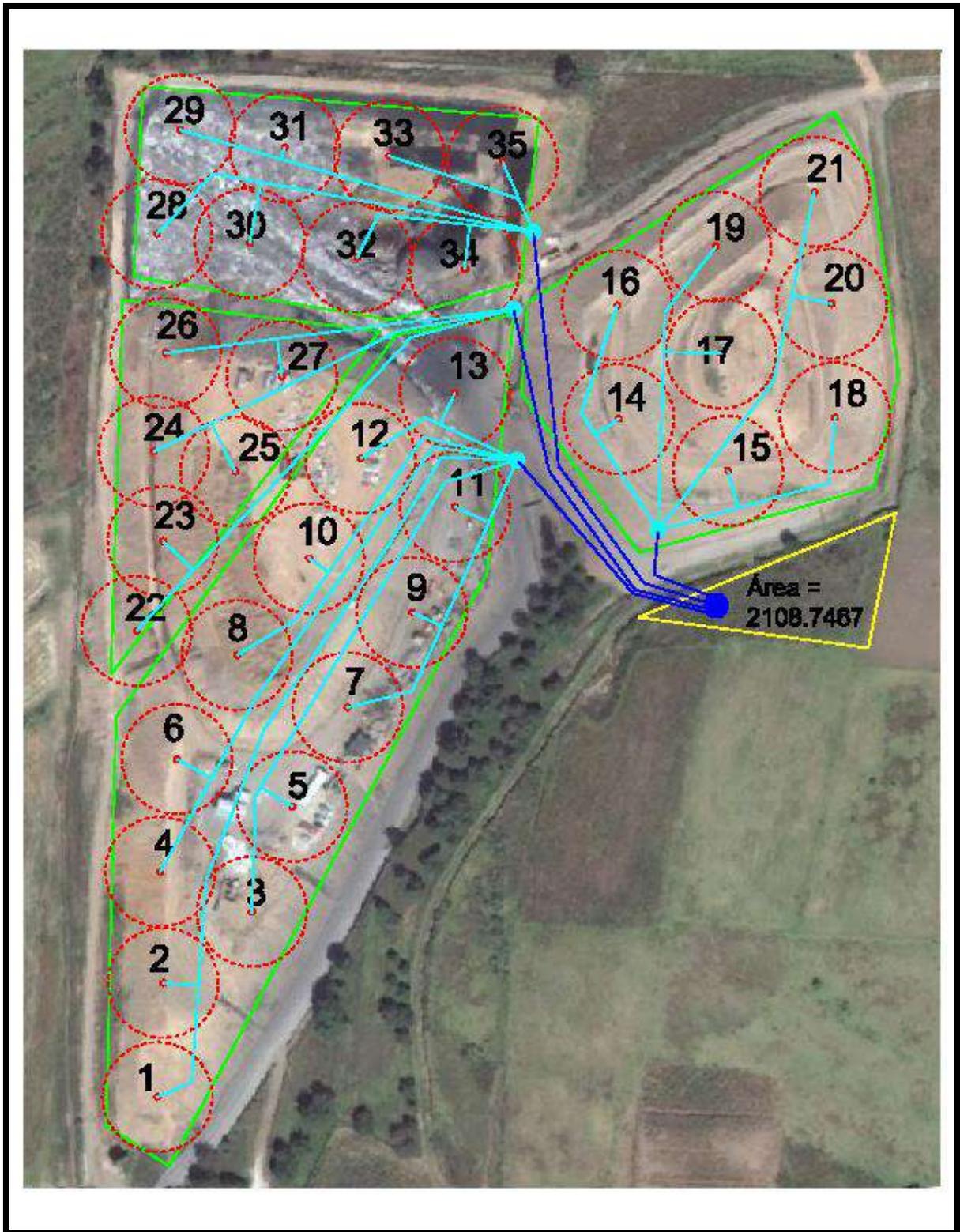


Figura D.2 Arreglo de tubería opción 02

D.2 Tubería

Para determinar el número de pozos, se realizó un trazado a escala mediante un plano en el área actual que contemplan las cuatro celdas existentes, resultando con espacio para 35 pozos, considerando el traslape en los radios de influencia. La distribución de los conductos del sistema de recolección puede tener la forma de líneas cabeceras principales y en ramal o “piernas de la tubería”. Los cálculos de caídas de presión se realizan entonces en cada pierna o ramal trabajando hacia atrás desde los alcances más lejanos del sistema. Los factores del diseño son los siguientes:

- a) Ubicación de los pozos
- b) Distribución y trazado de los conductos
- c) Manejo de líquidos
- d) Selección de materiales (PVC frente a HDPE)
- e) Dimensionamiento de los conductos (caída de presión)
- f) Sistemas sobre el suelo o subterráneos

Para el diseño de la red de conducción de biogás se utilizó el flujo mayor que se determinó mediante la prueba dinámica el cual fue de 76.05 (m³/h). Después de determinar la sección tentativa de tamaños de conductos se utilizó un programa en Excel, el cual facilitó los cálculos del diseño de la tubería.

Tabla D.2 Propiedades de tubería

Calculo de pérdidas por fricción		
Para Plásticos e es igual a 0.0015		
Rugosidad de tubería	0.0015	
Viscosidad del Flujo N*S/m ²	0.0000115	
Densidad del Fluido Kg/m ³	1.276	
Diámetro de tubería (m)	0.3048	10
Radio de tubería (m)	0.1524	
R2 de tubería (m)	0.02322576	
Área de tubería m ²	0.07296605	
Rugosidad Relativa	0.00492126	
Flujo Máximo M3/s	0.021125	
Flujo Máximo M3/hr	76.05	F
Velocidad m/s	0.28951822	
Longitud de tubería (m)	11.79	L
No de Reynolds	9791.37518	
Re ^{-0.25}	0.10052847	
Factor de fricción (f)	0.03180721	
Perdida de carga o de energía (m)	0.00525458	
Perdida de carga o de energía (m)	0.00526991	

D.3 Uso de CHEMCAD para el diagrama de proceso

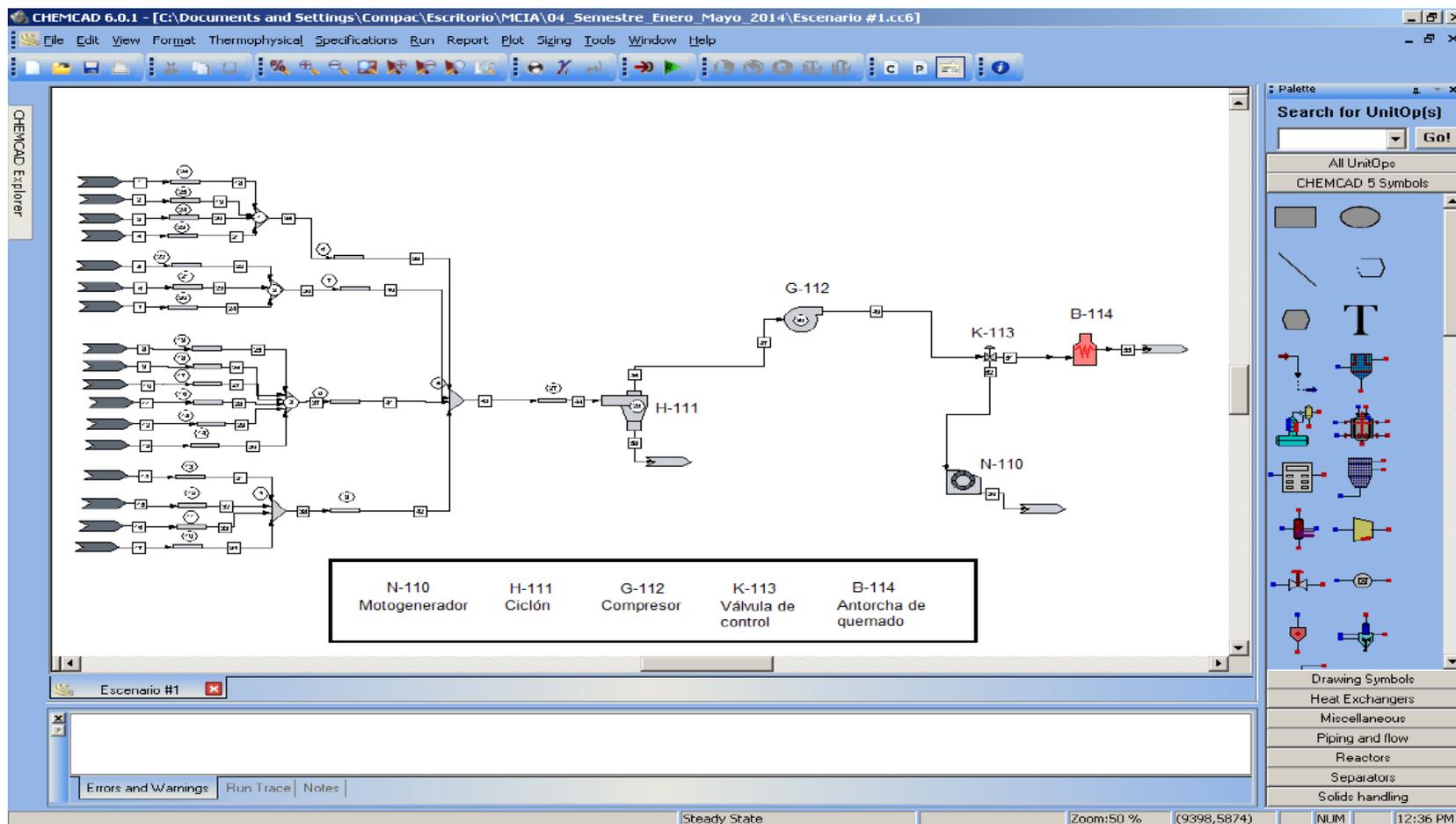


Figura D.3 Diagrama de proceso en Chemcad

Anexo E. Evaluación económica

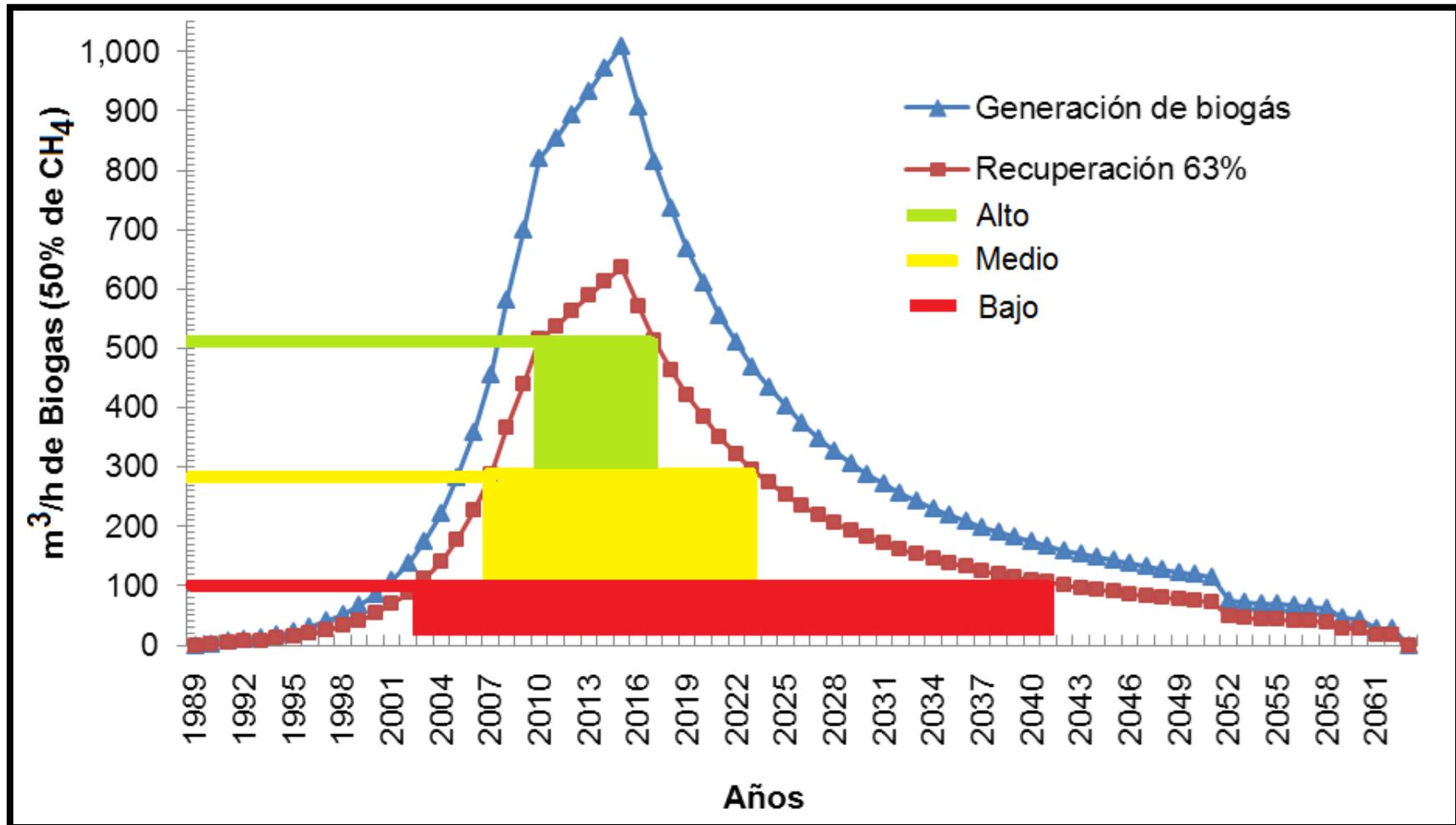


Figura E.1 Determinación de flujo para motogenerador

E.1 Determinación de costos de equipo

Tabla E.1 Determinación de costos de equipo

Concepto	Nuevo Laredo (2006)			Ensenada (2007)		Cancún (2013)		Saltillo (2013)		Zinacantepec (2014)	
	U	C	C/U	C	C/U	C	C/U	C	C/U	C	C/U
Movilización y gestión	-	1	\$165 000	2	\$40 000	1	\$66 000	1	\$53 300	1	\$81 075
Nuevos pozos	-	21	\$6 000	14	\$10 000	11	\$12 000	35	\$9 000	35	\$9 250
Modificaciones a pozos	-	24	\$600	17	\$600	30	\$6 000	6	\$6 218	24	\$3 354
Equipo de extracción dual	-	2	\$5 000	1	\$5 000	8	\$5 000	4	\$5 000	4	\$5 000
Tubería principal	m	1300	\$150	1400	\$130	1800	\$70	1770	\$302	2590	\$163
Tubería lateral	m	1000	\$40	900	\$90	1000	\$35	1197	\$292	404	\$114
Trampas de condensado	-	2	\$10 000	1	\$10 000	3	\$11 000	3	\$10 660	16	\$10 415
Pozos de inspección	-	1	\$25 000	1	\$25 000	1	\$15 000	-	-	1	\$21 666
Válvulas de los cabezales principales	-	-	-	-	-	3	\$2 000	-	-	-	-
Estación de la antorcha	-	1	\$150 000	1	\$130 000	1	\$200 000	1	\$213 200	1	\$173 300
Construcción y preparación de la estación de antorcha	-	1	\$100 000	1	\$50 000	1	\$80 000	1	\$310 512	1	\$80 000
Motor a biogás	kW	1700	\$1 000	335	\$1 000	633	\$1 200	2120	\$1 500	633	\$1 200
Subestación de la planta	-	1	\$80 000	1	\$80 000	1	\$150 000	1	\$66 666	1	\$94 166
Interconexión eléctrica	-	1	\$200 000	1	\$200 000	1	\$150 000	1	\$533 000	1	\$270 750
Puesta en marcha	-	1	\$15 000	1	\$15 000	1	\$15 000	-	-	1	\$15 000
Prueba de origen	-	2	\$25 000	2	\$25 000	2	\$25 000	1	\$22 000	1	\$24 250
Equipo de medición de biogás	-	1	\$35 000	1	\$35 000	1	\$35 000	1	\$35 000	1	\$35 000
Costos de ingeniería, contingencias	-	1	\$360 000	1	\$230 000	1	\$152 000	1	\$902 218	1	\$411 054

U: Unidades; C: Cantidad; C/U: Costo por unidad en USD

E.2 Determinación de costos de inversión

Tabla E.2 Costos de inversión (Ejemplo con cuatro años)

COSTOS DE OPERACION					
Aumento de los Costos Generales de O&M	%/año	2	2	2	2
Aumento de los Costos de la Electricidad	%/año	2	2	2	2
Tarifa de la Electricidad del Proyecto	\$Pesos/kWh	\$1.75	\$ 1.78	\$ 1.82	\$ 1.86
Mantenimiento de Rutina - Sistema de Recolección de Biogás	\$ USD	-	\$ 72,522	\$ 73,972	\$ 75,452
Mantenimiento de Rutina - Sistema del Generador	\$ USD	-	-	\$ 119,646	\$ 122,038.92
Mantenimiento Extraordinario	\$ USD	-	\$ 15,300	\$ 15,606	\$ 15,918
Costos Iniciales de MDL - Registro, Validación y Documentación	\$ USD	\$ 10,000	-	-	-
Costos Anuales de Verificación de GEI	\$ USD	\$ 10,000	\$ 10,000	\$ 10,000	\$ 10,000
Costos Legales y de Permisos	\$ USD	\$ 15,000	-	-	-
Servicio a la Deuda	\$ USD	-			
TOTAL GASTOS ANUALES DE OPERACION	\$ USD	\$ 35,000	\$ 97,822	\$ 219,224	\$ 223,409
Total Costos de operación y capital	\$ USD	\$ 2,180,793	\$ 857,422	\$ 219,224	\$ 223,409
Inversión	\$ USD	\$ 3,038,215			
Costos totales del periodo	\$ USD	\$ 6,112,393			

F Análisis de sensibilidad

Tabla F.1 Valor presente neto con generación de electricidad (Ejemplo MMB @ USD \$20)

GENERACION DE EEELECTRICIDAD							
Año	Costos		Ingresos	Factor de valor presente (10%)	Valor presente		
	Capital inicial	Costos de operación			Egresos	Ingresos	Ingresos Netos
0	\$ 3 038 214.71	\$ 35 000.00	\$ -	\$ 1.00	\$ 3 038 214.71	\$ -	-\$ 3 038 214.71
1		\$ 97 822.00	\$ 479 942.26	\$ 0.91	\$ 31 818.50	\$ 436 315.50	\$ 404 497.00
2		\$ 219 224.44	\$ 1 071 785.14	\$ 0.83	\$ 80 840.10	\$ 885 723.24	\$ 804 883.14
3		\$ 223 408.93	\$ 1 170 895.60	\$ 0.75	\$ 164 703.32	\$ 879 693.86	\$ 714 990.54
4		\$ 227 677.11	\$ 1 198 191.10	\$ 0.68	\$ 152 588.30	\$ 818 364.52	\$ 665 776.23
5		\$ 232 030.65	\$ 1 232 446.59	\$ 0.62	\$ 141 364.72	\$ 765 226.09	\$ 623 861.37
6		\$ 236 471.26	\$ 1 265 259.79	\$ 0.56	\$ 130 981.30	\$ 714 239.15	\$ 583 257.85
7		\$ 241 000.69	\$ 1 296 966.66	\$ 0.51	\$ 121 357.05	\$ 665 603.29	\$ 544 246.24
8		\$ 230 526.87	\$ 1 327 648.51	\$ 0.47	\$ 112 426.82	\$ 619 348.03	\$ 506 921.21
9		\$ 234 937.41	\$ 1 241 981.38	\$ 0.42	\$ 97 766.45	\$ 526 724.30	\$ 428 957.86
10		\$ 239 436.16	\$ 1 167 537.71	\$ 0.39	\$ 90 568.37	\$ 450 085.79	\$ 359 517.42
11		\$ 244 024.88	\$ 1 102 724.75	\$ 0.35	\$ 83 922.37	\$ 386 505.03	\$ 302 582.65
12		\$ 248 705.38	\$ 1 046 181.58	\$ 0.32	\$ 77 746.33	\$ 333 313.45	\$ 255 567.12
13		\$ 253 479.49	\$ 996 745.03	\$ 0.29	\$ 72 049.95	\$ 288 757.04	\$ 216 707.09
14		\$ 243 255.12	\$ 953 420.70	\$ 0.26	\$ 66 741.15	\$ 251 035.67	\$ 184 294.52
Totales	\$	3 207 000.39	\$ 15 551 726.81		\$ 4 463 089.44	\$ 8 020 934.96	

Rango de costo beneficio	1.797
Valor presente neto	\$ 3 557 845.52
Retorno de Inversión	15.74%

Tabla F.2 Valor presente neto con bonos de carbono (Ejemplo MMB @ USD \$20)

BONOS DE CARBONO		Costos		Ingresos		Factor de valor presente (10%)		Valor presente	
Año	Capital inicial	Costos de operación				Egresos	Ingresos	Ingresos Netos	
0	\$ 1 772 626.77	\$ 35 000.00	\$ -	\$ 1.00	\$ 1 772 626.77	0	-\$ 1 772 626.77		
1		\$ 82 522.00	\$ 479 942.26	\$ 0.91	\$ 31 818.50	\$ 436 315.50	\$ 404 497.00		
2		\$ 83 972.44	\$ 577 581.65	\$ 0.83	\$ 68 196.18	\$ 477 313.48	\$ 409 117.30		
3		\$ 85 451.89	\$ 676 692.11	\$ 0.75	\$ 63 088.49	\$ 508 398.78	\$ 445 310.29		
4		\$ 86 960.93	\$ 703 987.61	\$ 0.68	\$ 58 363.64	\$ 480 823.54	\$ 422 459.90		
5		\$ 88 500.15	\$ 738 243.10	\$ 0.62	\$ 53 994.04	\$ 458 375.14	\$ 404 381.10		
6		\$ 90 070.15	\$ 771 056.30	\$ 0.56	\$ 49 958.33	\$ 435 261.28	\$ 385 302.95		
7		\$ 91 671.55	\$ 802 763.17	\$ 0.51	\$ 46 224.00	\$ 411 978.06	\$ 365 754.06		
8		\$ 82 524.00	\$ 833 445.02	\$ 0.47	\$ 42 764.78	\$ 388 802.101	\$ 346 037.32		
9		\$ 83 974.48	\$ 747 777.89	\$ 0.42	\$ 34 998.43	\$ 317 132.60	\$ 282 134.17		
10		\$ 85 453.97	\$ 673 334.22	\$ 0.39	\$ 32 372.16	\$ 259 570.34	\$ 227 198.18		
11		\$ 86 963.05	\$ 608 521.26	\$ 0.35	\$ 29 951.62	\$ 213 286.70	\$ 183 335.09		
12		\$ 88 502.31	\$ 551 978.09	\$ 0.32	\$ 27 706.43	\$ 175 860.22	\$ 148 153.79		
13		\$ 90 072.36	\$ 502 541.54	\$ 0.29	\$ 25 639.12	\$ 145 586.28	\$ 119 947.17		
14		\$ 91 673.80	\$ 459 217.21	\$ 0.26	\$ 23 716.05	\$ 120 911.89	\$ 97 195.84		
Totales		\$ 1 253 313.07	\$ 9 127 081.43		\$ 2 361 418.54	\$ 4 829 615.93	\$ 4 240 824.16		

Rango de costo beneficio	2.045
Valor presente neto	\$ 2 468 197.39
Retorno de Inversión	19%