



**DISEÑO PRELIMINAR DE UNA DEPENDENCIA DE APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS  
ORGÁNICOS DEL RELLENO SANITARIO DE CARTAGENA, PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA  
ELÉCTRICA PRODUCIDA POR LA COMBUSTIÓN DE BIOGÁS, Y LA OBTENCIÓN DE COMPOST POR  
DESCOMPOSICIÓN DE MATERIA ORGÁNICA.**

**PRESENTADO POR:**

**ALAN JOHN MARQUEZ MORA  
IVAN RODRIGO REYES SALGADO**

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA  
FACULTAD DE CIENCIAS ECONOMICAS  
PROGRAMA DE ADMINISTRACION INDUSTRIAL  
CARTAGENA DE INDIAS, DT Y C.  
JUNIO 22 DEL 2007**

**DISEÑO PRELIMINAR DE UNA DEPENDENCIA DE APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS  
ORGÁNICOS DEL RELLENO SANITARIO DE CARTAGENA, PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA  
ELÉCTRICA PRODUCIDA POR LA COMBUSTIÓN DE BIOGÁS, Y LA OBTENCIÓN DE COMPOST POR  
DESCOMPOSICIÓN DE MATERIA ORGÁNICA.**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR  
EL TITULO DE ADMINISTRADOR INDUSTRIAL**

**PRESENTADO POR:**

**ALAN JOHN MARQUEZ MORA  
IVAN RODRIGO REYES SALGADO**

**ASESORA:  
BERENA VERGARA SERPA  
ECONOMISTA**

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA  
FACULTAD DE CIENCIAS ECONOMICAS  
PROGRAMA DE ADMINISTRACION INDUSTRIAL  
CARTAGENA DE INDIAS, DT Y C.  
JUNIO 22 DEL 2007**

**NOTA DE ACEPTACION:**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**PRESIDENTE DEL JURADO**

---

**JURADO**

---

**JURADO**

**Ciudad y Fecha. (dia, mes, año)**

## DEDICATORIA

*Doy gracias...*

*A Dios, por la inmensidad que me ha permitido disfrutar,  
Por todas las oportunidades y adversidades que ha puesto en mi camino y  
Toda la fortaleza y sabiduría para afrontarlas.*

*A mis padres, por haberme dado la vida y estar siempre  
Conmigo brindándome todo su apoyo y dedicación  
Para hacer de mis sueños una Realidad.*

*A mis abuelitos y demás familiares, por su apoyo constante  
Durante mis años de estudio.*

*A mis compañeras, por su apoyo  
Incondicional durante toda mi carrera.*

*A Tatiana, por su apoyo sincero y fortaleza para seguir adelante  
Durante estos meses de compañía y trabajo.*

*A todas las personas que en un momento dado han compartido  
Conmigo su conocimiento y experiencia y han contribuido  
A alcanzar logros en mi vida como el que hoy obtengo.*

*Gracias.*

*Alan John Márquez Mora*

## DEDICATORIA

*Dedicado a mis padres, por ellos y para ellos.  
A mis hermanos por su apoyo incondicional.  
A mis amigos que me apoyaron, sostuvieron y empujaron cuando así lo necesité.  
A todos los que pusieron su granito de arena... ustedes saben quienes son.  
Pero sobre todo a Dios por acompañarme siempre hasta este momento.*

*A todos muchas gracias*

*Iván Reyes Salgado.*

## AGRADECIMIENTOS

Los autores del proyecto desean agradecer a las siguientes personas su valiosa colaboración en el desarrollo del mismo:

**Berena Vergara Serpa.** Economista Directora del Trabajo de grado.

## CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS.....	XIII
LISTA DE GRAFICAS.....	XIV
LISTA DE TABLAS.....	XV
LISTA DE ANEXOS.....	XVII
1. GENERALIDADES.....	18
1.1. DESCRIPCION DEL PROBLEMA.....	18
1.1.1. Situación actual de la gestión de los residuos sólidos urbanos (R.S.U.).....	18
1.1.1.1. Situación actual de la gestión de R. S. U. En el mundo.....	19
1.1.1.2. Situación actual de la gestión de R. S. U. En Colombia.....	23
1.1.1.3. Situación actual de la gestión de R. S. U. En Cartagena.....	28
1.1.1.3.1. Botaderos y rellenos sanitarios.....	28
1.1.1.3.2. Generación de residuos.....	29
1.1.1.3.3. Potencial de utilización de residuos.....	30
1.1.1.3.4. Manejo y disposición de residuos sólidos.....	30
1.2. FORMULACION DEL PROBLEMA.....	32
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	35
1.4. OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	36
1.4.1. Objetivo general.....	36
1.4.2. Objetivos específicos.....	36
1.5. DISEÑO METODOLÓGICO.....	37
1.5.1. Tipo de investigación.....	37
1.5.2. Método de investigación.....	37
1.5.3 Delimitación del proyecto.....	37
1.5.3.1. Delimitación temporal.....	37
1.5.3.2. Delimitación espacial.....	37
1.5.3.3. Delimitación temática.....	37
1.5.4. Fuentes de recolección de información.....	37
1.5.5. Técnicas e instrumentos de recolección de información.....	38
2. ANALISIS DE DATOS SOBRE GENERACIÓN DE RESIDUOS E IDENTIFICACION DE LAS CANTIDADES ÓPTIMAS DE TRATAMIENTO.....	39
2.1. ANALISIS SOBRE LA PRODUCCIÓN DE RESIDUOS EN COLOMBIA.....	39
2.2. ANALISIS SOBRE LA PRODUCCIÓN DE RESIDUOS EN CARTAGENA DE INDIAS.....	41
2.2.1. Producción de residuos sólidos.....	44
2.2.1.1. Composición gravimétrica de residuos sector residencial.....	44
2.2.1.2. Composición gravimétrica de residuos sector centros comerciales y colmenas de bazarro.....	46
2.2.1.3. Composición gravimétrica de residuos sector hotelero.....	48
2.2.1.4. Residuos depositados en el relleno sanitario de henequén.....	49
2.2.1.5. Composición gravimétrica de residuos sector industrial y empresarial.....	52
2.3. IDENTIFICACION DE CANTIDADES ÓPTIMAS DE TRATAMIENTO.....	54
2.3.1. Generación de residuos per capita.....	54
2.4. POTENCIAL CALORIFICO DE LOS RESIDUOS.....	59
2.5. POTENCIAL DE GENERACIÓN DE BIOGAS.....	60
2.5.1. Calculo de potencial de biogás.....	61
2.5.1.1. Calculo de las emisiones de GEI a partir del potencial de biogás.....	62
2.5.2. Generación de biogás en vertederos.....	64
2.5.2.1. Generación de biogás en el relleno de henequén.....	64

2.5.2.2. Generación de biogás en el relleno de loma de los cocos .....	67
2.6. POTENCIAL DE GENERACIÓN DE COMPOST .....	70
2.7. POTENCIAL DE REUTILIZACIÓN DE RESIDUOS RECICLABLES .....	71
3. SELECCIÓN Y DIAGRAMACIÓN DE LOS PROCESOS ÓPTIMOS DE VALORIZACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS .....	72
3.1. SELECCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS .....	74
3.1.1. Recepción y descarga .....	74
3.1.2. Transporte .....	74
3.1.3. Selección o triaje .....	75
3.1.4. Prensado y almacenamiento .....	75
3.2. DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS .....	77
3.2.1. Recepción de los residuos .....	78
3.2.2. Pre-tratamiento mecánico .....	78
3.2.3. Digestión anaerobia (fermentación) .....	78
3.2.4. Almacenamiento del biogás .....	79
3.2.5. Disposición de la fracción residual .....	80
3.2.6. Filtro para la captación del sulfuro de hidrógeno del biogás .....	80
3.3. COMPOSTAJE DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS .....	82
3.3.1. Periodos del proceso de compostaje .....	82
3.3.2. Factores que condicionan el proceso de compostaje .....	82
3.3.3. Producción de compost orgánico .....	84
3.3.3.1. Preparación previa .....	85
3.3.3.1.1. Recepción de la fracción vegetal y trituración .....	85
3.3.3.1.2. Mezcla y homogenización .....	85
3.3.3.2. Proceso de compostaje .....	85
3.3.3.2.1. Disposición en pilas .....	85
3.3.3.2.2. Volteado de las pilas y control de condiciones ambientales del proceso .....	85
3.3.3.2.3. Recogida de lixiviados y aguas pluviales .....	86
3.3.3.2.4. Cribado del compost maduro .....	86
3.3.3.2.5. Compost .....	86
3.4. PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLE DERIVADO DE RESIDUOS (CDR) .....	88
3.4.1. Recepción de RSU .....	88
3.4.2. Alimentación de RSU .....	88
3.4.3. Clasificación primaria .....	88
3.4.4. Clasificación secundaria .....	88
3.4.5. Trituración .....	89
3.4.6. Secado de la fracción fina .....	89
3.4.7. Mezclado .....	89
3.4.8. Almacenamiento de CDR .....	89
3.4.9. Depósito temporal .....	89
3.5. COMBUSTIÓN DE LA FRACCIÓN INORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS (CDR) CON RECUPERACION DE ENERGIA .....	91
3.5.1. Fases en el proceso de incineración .....	92
3.5.1. Descarga y almacenamiento .....	92
3.5.2. Alimentación del horno .....	93
3.5.3. Zona de horno y combustión de CDR .....	93
3.5.3.1. Aire de combustión .....	94
3.5.4. Zona de caldera .....	95
3.5.4.1. Quemadores auxiliares .....	96

3.5.5. Depuración de los gases de combustión .....	96
3.5.6. Recogida y extracción de escorias.....	96
3.5.7. Tratamiento de escorias.....	96
3.5.7.1. Separación de metales contenidos en escorias.....	97
3.5.7.1.1. Fracción rebose del tromel .....	97
3.5.7.1.2. Fracción hundida o cribada del tromel.....	98
3.5.8. Tratamiento de cenizas .....	98
3.5.9. Evacuación de gases depurados .....	99
3.6. COGENERACIÓN ELECTRICA.....	101
3.6.1. Valorización o recuperación energética .....	102
3.6.2. Proceso de cogeneración eléctrica.....	103
3.6.3. Sistema de ciclo combinado .....	103
3.6.3.1. Ciclo agua vapor y generación de energía .....	104
3.6.3.1.1. Colector principal.....	105
3.6.3.1.2. By-pass de turbina .....	105
3.6.3.1.3. Generadores de energía.....	106
3.6.3.1.3.1. Turbina a gas.....	106
3.6.3.1.3.2. Turbina a vapor .....	106
3.6.3.1.3.2.1. Funcionamiento de la turbina .....	107
3.6.3.1.4. Colector secundario .....	108
3.6.3.1.5. Precaentador de aire.....	108
3.6.3.1.6. Aerocondensador.....	108
3.6.3.1.7. Desgasificador y tanque de agua de alimentación.....	110
3.6.3.1.8. Bombas de agua de alimentación.....	110
3.7. TRATAMIENTO DE EFLUENTES, LÍQUIDOS DE PRECOLACIÓN O LIXIVIADOS.....	112
3.7.1. Tratamiento de efluentes .....	112
3.7.1.1. Tratamiento físico de desbaste .....	112
3.7.1.2. Decantación – floculación .....	112
3.7.1.3. Filtración.....	113
3.7.1.4. Deshidratación de fangos .....	113
3.7.1.5. Dosificación y adición de reactivos .....	113
3.7.2. Tratamiento de aguas de condensación .....	113
3.7.2.1. Condensación y refrigeración .....	113
3.7.3. Tratamiento de aguas residuales .....	114
3.7.4. Tratamiento de aguas de alimentación .....	114
3.8. TRATAMIENTO DE GASES DE COMBUSTIÓN .....	116
3.8.1. Sistema de reducción de NOx.....	118
3.8.1.1. Recirculación de los gases de combustión.....	118
3.8.1.2. Reducción no catalítica selectiva de los óxidos de nitrógeno (snrc).....	118
3.8.1.2.1. Estación de recepción y descarga.....	118
3.8.1.2.2. Almacenamiento de amoníaco.....	119
3.8.1.2.3. Dosificación de amoníaco.....	119
3.8.1.2.4. Inyección de amoníaco.....	119
3.8.1.2.5. Extractor de escorias.....	120
3.8.1.2.6. Central hidráulica .....	120
3.8.2. Depuración de gases con lavado semi-seco.....	120
3.8.2.1. Torre de acondicionamiento .....	121
3.8.2.2. Reactor de contacto .....	121
3.8.2.3. Filtro de mangas.....	122

3.8.2.4. Ventilador de filtro y chimenea .....	123
3.8.2.5. Analizador de gases .....	124
3.8.2.6. Almacenamiento y dosificación de reactivos (hidróxido de calcio y carbón activo) .....	124
3.8.2.7. Transporte, almacenamiento y descarga de residuos .....	125
3.8.2.8. Sistema centralizado de aspiración .....	125
3.9. PROCESO DE RECICLAJE DE RESIDUOS .....	127
3.9.1. Tratamiento de los plásticos .....	127
3.9.2. Tratamiento del vidrio .....	128
3.9.3. Tratamiento del papel y cartón .....	128
3.9.4. Tratamiento de los metales .....	128
3.9.5. Tratamiento del tetrabrik .....	129
3.9.6. Otros residuos .....	129
3.10. RECUPERACION Y APROVECHAMIENTO DE BIOGAS DE VERTEDEROS .....	132
3.11. DIAGRAMACIÓN GENERAL DE LOS PROCESOS .....	132
4. LOCALIZACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE PLANTA DE VALORIZACIÓN Y COGENERACIÓN ELÉCTRICA .....	135
4.1. LOCALIZACIÓN .....	135
4.2. DISTRIBUCIÓN .....	141
5. CONSIDERACIONES OPERATIVAS, ECONOMICAS, PERSPECTIVAS Y APLICACIONES FUTURAS .....	147
5.1. CONSIDERACIONES OPERATIVAS .....	147
5.1.1. Capacidad de la planta .....	147
5.1.2. Presupuesto de equipos .....	147
5.1.2.1. Selección y clasificación de los residuos sólidos .....	147
5.1.2.2. Digestión anaerobia de la fracción orgánica de los residuos .....	148
5.1.2.3. Tratamiento de efluentes, líquidos de percolación o lixiviados .....	148
5.1.2.4. Compostaje de la fracción orgánica de los residuos .....	148
5.1.2.5. Producción de combustible derivado de residuos (CDR) .....	149
5.1.2.6. Combustión de la fracción inorgánica de residuos (CDR) .....	149
5.1.2.7. Cogeneración eléctrica .....	149
5.1.2.8. Tratamiento de gases de combustión .....	150
5.1.2.9. Reciclaje de residuos .....	150
5.1.3. Características de los equipos y procesos .....	150
5.1.3.1. Microturbinas .....	150
5.1.3.2. Motores de combustión interna a gas .....	151
5.1.3.3. Turbinas de gas .....	151
5.1.3.4. Captación de biogás en vertederos .....	152
5.2. CONSIDERACIONES ECONOMICAS .....	152
5.2.1. Ingresos proyectados por venta de cer`s .....	154
5.2.1.1. Reducción de emisiones de gases invernadero .....	154
5.2.2. Ingresos proyectados por venta de energía eléctrica .....	155
5.2.2.1 Sector de la industria eléctrica en Colombia .....	155
5.2.2.2. Características del servicio de energía en bolívar .....	157
5.2.2.3. Generación de energía eléctrica .....	157
5.2.3. Ingresos proyectados por venta de compost orgánico .....	160
5.2.4. Costos de instalación .....	161
5.2.6. Ganancias del proyecto .....	162
5.3. BENEFICIOS Y PERSPECTIVAS FUTURAS .....	164
5.3.1. Beneficios del proyecto y contribución al desarrollo sostenible en Cartagena y Colombia .....	164
5.3.1.1. Crecimiento económico .....	164

5.3.1.2. Protección del medio ambiente .....	164
5.3.1.3. Desarrollo social .....	165
5.3.2. Perspectivas futuras .....	165
5.3.2.1. Desarrollo sostenible .....	166
5.3.2.2. Protocolo de kyoto .....	167
5.3.2.2.1. Mercado de carbono .....	169
5.3.2.2.2. Gases de efecto invernadero .....	170
5.3.2.2.2.1. Impactos potenciales del gas de residuo sólido .....	171
5.3.2.2.2.2. Beneficios potenciales de los gases de residuo sólido .....	173
5.3.2.3. Estructura del proyecto, condiciones del mercado y negocios .....	174
5.3.2.4. Competitividad de proyectos de MDL frente al mercado internacional de carbono .....	175
5.4. APLICACIONES .....	176
5.4.1. Generación de energía. ....	176
5.4.1.1. Beneficios y ventajas .....	177
5.4.1.2. Barreras y desventajas .....	179
5.4.2. Aplicaciones proyectadas de la cogeneración .....	181
5.4.2.1. Secado .....	181
5.4.2.2. Industrias textiles .....	182
5.4.2.3. Aplicaciones para industrias medioambientales .....	182
CONCLUSIONES .....	183
BIBLIOGRAFIA .....	185
GLOSARIO .....	191
ANEXOS .....	195

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fases del Proceso de Digestión Anaerobia .....	79
Figura 2: Modelo de funcionamiento de una unidad de Cogeneración y sus emisiones. ....	101
Figura 3: Sistema de incineración con recuperación de energía.....	102
Figura 4: Residuos generados por los sistemas de depuración de gases.....	117
Figura 5: Proceso de cogeneración con secado en la industria cerámica .....	181
Figura 6: Proceso de cogeneración en la Industria Textil con producción de aceite térmico, vapor y agua caliente. ....	182
Figura 7: Sistema básico de captación y conducción de Biogás. ....	214
Figura 8: Sistema de Captación de biogás en un vertedero. ....	215

## LISTA DE GRAFICAS

Grafica 1: Disposición de residuos sólidos en Colombia (2001).....	40
Grafica 2: Proceso de biometanización a partir de la fracción degradable de los residuos sólidos. ....	60
Grafica 3: Generación Proyectada de Gas de Relleno Sanitario: Henequén .....	65
Grafica 4: Potencial de Utilización de Gas de Relleno Sanitario: Henequén.....	66
Grafica 5: Generación Proyectada de Gas de Relleno Sanitario: Loma de los Cocos. ....	68
Grafica 6: Potencial de Utilización de Gas de Relleno Sanitario: Loma de los Cocos.....	69
Grafica 7: Implicación de los sistemas de disposición de RSU .....	72
Grafica 8: Proceso de Selección y Clasificación de los Residuos.....	76
Grafica 9: Proceso de Digestión Anaerobia. ....	81
Grafica 10: Proceso de Compostaje. ....	87
Grafica 11: Proceso de Producción de Combustible Derivado de Residuos (CDR). ....	90
Grafica 12: Proceso de Combustión o Incineración de CDR. ....	100
Grafica 13: Proceso de Cogeneración Eléctrica. ....	111
Grafica 14: Proceso de Tratamiento de Efluentes.....	115
Grafica 15: Proceso de Tratamiento de Gases de Combustión. ....	126
Grafica 16: Proceso de Reciclaje.....	131
Grafica 17: Diagrama General de Procesos .....	133
Grafica 18: Balance General de Materia/Energía .....	134
Grafica 19: Distribución Física de la Planta. ....	146

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Problemas que provoca el tratamiento inadecuado de los residuos sobre el medio .....	22
Tabla 2: Población (2000) .....	41
Tabla 3: Evolución Histórica y Proyección de las Tasas de crecimiento de la Población de Cartagena (Periodo 1951-2018).....	42
Tabla 4: Estratificación Socio-Económica. Años 1998 y 2000.....	43
Tabla 5: Composición Gravimétrica de los Residuos Sólidos Domiciliarios (Muestreo por cuarteo en el Relleno Sanitario Regional La Paz) 2002. ....	45
Tabla 6: Composición Gravimétrica de los residuos Sólidos Domiciliarios (Muestreo en la fuente de generación).....	46
Tabla 7: Composición Gravimétrica de los Residuos Sólidos Producidos por el Sector Comercial .....	47
Tabla 8: Composición Gravimétrica de los Residuos Sólidos Producidos por el Sector Comercial .....	47
Tabla 9: Composición Gravimétrica de los Residuos Sólidos Generados por el Sector Turístico. 1998.....	49
Tabla 10: Caracterización de los Residuos Reciclables en el Sector Comercial. 1998(kilos/mes) .....	49
Tabla 11: Residuos Sólidos Dispuestos en el Relleno Sanitario de Henequén desde 1994.....	50
Tabla 12: Tipo de Residuo (de acuerdo con la fuente de generación).....	51
Tabla 13: Materiales Reciclables Generados por el sector Industrial y Empresarial. ....	53
Tabla 14: Producción de Residuos en relación al Estrato Socio-Económico. ....	55
Tabla 15: Proyección de Producción de Residuos en Relación a la Población Total del Distrito de Cartagena. Periodo: 1998:2018.....	55
Tabla 16: Residuos Generados y Porcentaje Representativo Sector Residencial (Kg/año) Año 1998. ....	56
Tabla 17: Caracterización de los Residuos Reciclables en el Sector Comercial Año 1998 (kilos/mes).....	57
Tabla 18: Caracterización de los Residuos Generados en la Ciudad de Cartagena (kilos/mes 1998).....	57
Tabla 19: Caracterización de Producción Mensual y Diaria de Residuos Sólidos (Año 1998). ....	58
Tabla 20: Proyección de Producción de Residuos en Relación a la Población Total del Distrito de Cartagena. Periodo: 1998:2018.....	58
Tabla 21: Poder calorífico inferior de los RSU .....	59
Tabla 22: Contenido de materia seca en desechos orgánicos. ....	61
Tabla 23: Generación Proyectada de Biogás a partir de R. Orgánicos (Año 2005-2030).....	62
Tabla 24: Generación Proyectada de Metano y su equivalente en Carbono a partir de Residuos Orgánicos (Año 2005-2030) .....	63
Tabla 25: Generación Proyectada de Compost a partir de R. Orgánicos (Año 2005-2030).....	70
Tabla 26: Generación Proyectada de Residuos Pot. Reciclables y Aprovechables. (Año 2005-2030).....	71
Tabla 27: Tipos de selección de materiales y técnicas de separación. ....	74
Tabla 28: Límites máximos permisibles en el compost.....	84
Tabla 29: Principales características de los sistemas de tratamiento de gases.....	117
Tabla 30: Capacidad de la planta (diaria).....	147
Tabla 31: Rangos Generales de Costos de Pozos Verticales .....	152
Tabla 32: ingresos proyectados por venta de CER`s (Año 2005-2030).....	155
Tabla 33: Resumen de precios mayoristas de energía en Colombia. Año 2004.....	156
Tabla 34: localización y demanda de las subestaciones .....	157
Tabla 35: Ingresos proyectados por venta de Energía (Año 2005-2030) .....	158
Tabla 36: Ingresos proyectados por venta de Excedente de Energía (Año 2005-2030) .....	159

Tabla 37: Ingresos proyectados por venta de compost (Año 2005-2030) .....	160
Tabla 38: Resumen de costos para la planta de energía con motores IC .....	161
Tabla 39: Costos presupuestales anuales para el mantenimiento de la planta de energía.....	162
Tabla 40: Resumen de los costos del proyecto asumidos .....	162
Tabla 41: Análisis financiero preliminar. (Expresado en U\$) .....	163
Tabla 42: Rango de Valores de k Sugeridos según la Precipitación Anual .....	199
Tabla 43: Valores de Lo Sugeridos según el Contenido Orgánico del Residuo .....	200
Tabla 44: Vida Media de Subproductos de Biodegradación .....	201
Tabla 45. Historial de Disposición de RSU en el Relleno Sanitario de Henequén .....	202
Tabla 46: Datos de Composición de Residuos.....	203
Tabla 47: Datos Geotécnicos Cartagena de Indias. ....	203
Tabla 48: Producción de Biogás con un potencial de generación normal de metano.....	205
Tabla 49: Producción de Biogás con un potencial de generación bajo de metano .....	206
Tabla 50: Producción de Biogás con un potencial de generación alto de metano .....	207
Tabla 51: Disposición Proyectada de RSU en el Relleno Sanitario de Loma de los Cocos .....	208
Tabla 52: Datos de Composición de Residuos.....	209
Tabla 53: Datos Geotécnicos Cartagena de Indias. ....	209
Tabla 54: Producción de Biogás con un potencial de generación normal de metano.....	211
Tabla 55: Producción de Biogás con un potencial de generación bajo de metano .....	212
Tabla 56: Producción de Biogás con un potencial de generación alto de metano .....	213

## LISTA DE ANEXOS

Anexo A: Modelos Matemáticos Para Estimación Del Potencial De Emisión GHG .....	196
Anexo B: Cálculo de Emisiones en Henequén. ....	202
Anexo C: Cálculo De Emisiones En Loma De Los Cocos .....	208
Anexo D: Sistema de Recolección de gas de Vertedero (GRS).....	214
Anexo E: Proceso de tratamiento de residuos animales.....	217
Anexo F: Equipos para cogeneración.....	219

## 1. GENERALIDADES

### 1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

#### 1.1.1. Situación actual de la gestión de los residuos sólidos urbanos (R.S.U.).

Una de las problemáticas que ha enfrentado la humanidad en las últimas décadas tiene que ver con el manejo y disposición final de los residuos sólidos ya sean orgánicos e inorgánicos, producto de las diferentes actividades cotidianas. Los residuos sólidos existen desde los albores de la humanidad como subproducto de la actividad de los hombres. Su composición física y química ha ido variando de acuerdo con la evolución cultural y tecnológica de la civilización. La forma más fácil que encontró el hombre primitivo de disponer los desechos no comibles por los animales fue arrojarlos en un sitio cercano a su vivienda; así nació el botadero a cielo abierto, práctica que se ha mantenido hasta nuestros días.

El problema se agudiza con la implementación y desarrollo del actual modelo económico ya que entre otros aspectos tiene como eje fundamental el crear y propiciar una sociedad de consumo trayendo consigo diversos flujos de residuos incontrolados que significan altos costos sociales, económicos y ambientales para las ciudades afectadas. El incremento del volumen de los residuos han generado un problema a nivel residencial y poco a poco este se ha ido trasladando a las calles, cuerpos de agua y zonas verdes de las ciudades, lo que evidencia una clara inconciencia ambiental, Cabe aclarar que los residuos ya no son sólo un peligro para el medio ambiente, sino que poco a poco se han convertido en una amenaza para la salud de los seres humanos y nuestro estilo de vida.

En la mayoría de los países el problema de los residuos sólidos se agrava como consecuencia del acelerado crecimiento de la población, una concentración desmesurada en áreas urbanas, así como un desordenado desarrollo industrial, a cambios no contemplados en los hábitos de consumo y a la ausencia de planificación urbana. En la mayoría de los casos el desarrollo de cualquier región va acompañado de una mayor producción de residuos sólidos, los cuales si no se manejan adecuadamente afectan la salud de la comunidad; por lo tanto, la salud se constituye en un motivo esencial para que se implementen las soluciones satisfactorias para realizar una correcta gestión y resolver los problemas de su manejo y disposición final. El efecto ambiental mas obvio del manejo inadecuado de las basuras es el deterioro estético de las ciudades y el paisaje natural, la contaminación de aguas superficiales y subterráneas y la contaminación del aire.

Por otro lado, la preponderancia de los residuos sólidos como causa directa de enfermedades, no está bien determinada. Sin embargo, se les atribuye una incidencia importante en la transmisión de algunas enfermedades digestivas, respiratorias y cutáneas: disentería vacilar y amibiana entre otras.

Para comprender con mayor claridad los efectos de los residuos sólidos en la salud de las personas, es necesario distinguir entre los riesgos directos e indirectos. Los primeros son ocasionados por el contacto directo con la basura la cual, a veces, contiene excrementos humanos y de animales. Las personas más expuestas son los recolectores, debido a la manipulación de recipientes inadecuados para el almacenamiento de desechos, al uso de equipos inapropiados y la carencia de ropa limpia, guantes y zapatos de seguridad. En esta misma situación se encuentran los recicladores, cuya actividad de separación y selección de materiales es realizada en las peores condiciones y sin la más mínima protección. Los riesgos causados por el manejo inadecuado de basuras son principalmente indirectos y afectan al público en general. Ellos se originan por la proliferación de vectores sanitarios tales como moscas, mosquitos, ratas y cucarachas que encuentran en los residuos sólidos su alimento y las condiciones adecuadas para su reproducción

Como respuesta a esta problemática, los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos surgen de la necesidad de establecer una herramienta eficaz para el manejo de los residuos industriales y domésticos, que garantice la protección de la salud y la conservación del medio ambiente. Estos planes contemplan un conjunto de operaciones encaminadas al aprovechamiento de los recursos materiales y energéticos contenidos en los residuos y su disposición de una forma ambientalmente segura. Así mismo, los planes de gestión de residuos establecen su prioridad en la prevención, y reducción en la fuente de origen de los residuos, para posteriormente impulsar los procesos de reutilización y reciclaje, y eliminar la última fracción de residuos.

#### **1.1.1.1. Situación actual de la gestión de R. S. U. En el mundo.**

A nivel mundial se estima que la producción actual de residuos sólidos es cerca de 400 billones de toneladas al año, lo suficiente para sepultar a la ciudad de los Ángeles 100 metros bajo tierra<sup>1</sup>. En muchos países desarrollados, los residuos son el problema ambiental del cual se preocupa más la gente.

En la Comunidad Europea<sup>2</sup>, se han dado cuenta de que el continuo aumento en la generación de residuos sólidos y la deficiencia de los sistemas tradicionales de acumulación y eliminación (vertederos e incineración) traen consecuencias catastróficas para el medio ambiente. En los día a día más abarrotados vertederos

---

<sup>1</sup> Red Juan Colombia. CENSAT Agua Viva. <[http://www.censat.org/Red\\_Juan\\_Novedades.htm#L4](http://www.censat.org/Red_Juan_Novedades.htm#L4)>

<sup>2</sup> TECNOCIENCIA: ESPECIAL RESIDUOS. <<http://www.tecnociencia.es/especiales/residuos/imagen.html>>.

autorizados, se generan gases tóxicos como el metano y dióxido de carbono (gases de invernadero con un alto potencial de calentamiento global) y se producen filtraciones de metales pesados (mercurio) y toxinas al suelo y a la capa freática lo cual ha venido afectando considerablemente el entorno que se encuentra a su alrededor. Más grave aún es el número desconocido, y sin duda elevado, de vertederos ilegales o satélites, los cuales pueden encontrarse en cualquier esquina de algún sector ya sea residencial o industrial, cuyos riesgos no se pueden cuantificar ni mucho menos cualificar<sup>3</sup>.

Algunos datos que permiten visualizar la situación actual del manejo y disposición de los RSU en Europa son<sup>4</sup>:

- La cantidad total de residuos generados cada año en Europa asciende, aproximadamente, a 2000 millones de toneladas. Más de 40 millones de toneladas son residuos peligrosos.
- Se calcula que, entre 1990 y 1995, el volumen total de residuos generados en Europa (incluidos los países de Europa Central y Oriental) aumentó un 10 %.
- Las principales fuentes de residuos son: agricultura, construcción, actividades mineras y zonas urbanas. Los residuos agrarios son los más importantes en términos cuantitativos. Los residuos industriales son los que tienen repercusiones más graves sobre el medio ambiente.
- Las fuentes de residuos difieren en cada país y dependen de su situación económica. Los países de Europa Occidental registran el mayor porcentaje de residuos industriales y urbanos, mientras que la fuente principal en Europa Central y Oriental la constituyen las actividades extractivas.
- Los RSU en los países europeos de la OCDE aumentaron un 11 % entre 1990 y 1995 hasta totalizar los 200 millones de toneladas. En un futuro próximo esa cifra va a seguir aumentando.
- El papel y los residuos orgánicos constituyen un componente importante de los flujos de residuos urbanos en Europa y los plásticos ocupan un porcentaje cada vez mayor.
- La mayor parte de los residuos urbanos se eliminan en vertederos, solución que sigue siendo la menos costosa a pesar de que en la actualidad algunos países europeos aplican cánones de vertido.
- Cada vez se es más consciente de la necesidad de prevenir y reducir los residuos, así como del reciclado en países con sistemas avanzados de gestión. En general, el compostaje es una posibilidad a la que se recurre con demasiada poca frecuencia.
- Las estadísticas sobre producción, composición, transporte y tratamiento de residuos no siempre se obtienen aplicando los mismos métodos, ni con el mismo grado de detalle, en todos los países de

---

<sup>3</sup> Ibíd.

<sup>4</sup> Europe's Environment: The Second Assessment. European Environment Agency. 1998

Europa. Es, pues, difícil hacerse una idea global de la situación y detectar tendencias. La falta de datos sobre residuos peligrosos es un aspecto especialmente preocupante.

En vista del grave problema medioambiental, la Unión Europea ha venido desarrollando una política de protección del medio ambiente cada vez más enérgica y rigurosa, la cual se ha traducido en una ampliación de medidas de aplicación en sus países miembros: legislación, iniciativas económicas para la realización de proyectos (entre estos cabe destacar el fomento hacia una cultura del aprovechamiento integral de los residuos), etc.

Con base en lo anterior, en el año 1996 se instauró en Europa la Directiva 96/61/CE, por la cual se establecieron los principios bajo los cuales se regiría el plan de gestión de residuos de la comunidad europea en relación hacia la prevención y el control integral de los mismos, estos principios son<sup>5</sup>:

- 1.- Prevención de la generación de residuos
- 2.- Reciclado y reutilización
- 3.- Optimización de la eliminación definitiva y mayor control
- 4.- Reducir los traslados de residuos y mejorar la normativa al respecto
- 5.- Nuevos y mejores instrumentos de gestión de residuos, (instrumentos reglamentarios y económicos, estadísticas fidedignas y comparables sobre residuos, planes de gestión de residuos, vigilancia de cumplimiento de la legislación)

En la siguiente tabla, se puede observar que las técnicas de tratamiento de residuos como el compostaje y el reciclaje generan menos problemas al medio ambiente (emisión de CO<sub>2</sub>, olores, ocupación de suelos, emisiones de polvo, vertido de aguas residuales, entre otros); técnicas de tratamiento como la incineración precisan de tecnologías para la eliminación de dioxinas y furanos procedentes de los gases de incineración, y así mismo de sitios adecuados para la disposición de los residuos finales producto de la combustión de los residuos con el propósito de no arrojar sustancias nocivas y contaminantes hacia la atmósfera. Entre tanto que técnicas como el vertido y el transporte de residuos presentan graves consecuencias al medio ambiente con lo que distan de ser las más apropiadas para aplicar a los residuos sólidos.

---

<sup>5</sup> [http://europa.eu.int/smartapi/cgi/sga\\_doc?smartapi!celexapi!prod!CELEXnumdoc&lg=ES&numdoc=31996L0061&model=guichett](http://europa.eu.int/smartapi/cgi/sga_doc?smartapi!celexapi!prod!CELEXnumdoc&lg=ES&numdoc=31996L0061&model=guichett)

En el siguiente cuadro se detallan los problemas que provoca el tratamiento de los residuos sobre el medio:

**Tabla 1: Problemas que provoca el tratamiento inadecuado de los residuos sobre el medio**

	<b>Vertederos</b>	<b>Compostaje</b>	<b>Incineración</b>	<b>Reciclado</b>	<b>Transporte</b>
<b>Aire</b>	Emisión de CH <sub>4</sub> y CO <sub>2</sub> ; Olores	Emisión de CO <sub>2</sub> ; Olores	Emisión de SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , HCl, HF, COVDM, CO, CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O, dioxinas, dibenzofuranos y metales pesados (Zn, Pb, Cu, As)	Emisión de polvo	Emisión de polvo, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> ; derrame accidental de sustancias peligrosas
<b>Agua</b>	Lixiviado de sales, metales pesados, compuestos orgánicos persistentes y biodegradables a la capa freática		Deposición de sustancias peligrosas en aguas superficiales	Vertido de aguas residuales	Riesgo de contaminación de las aguas de superficie y subterráneas por derrames accidentales
<b>Suelos</b>	Acumulación de sustancias peligrosas en el suelo		Depósito de escorias, cenizas y chatarra en vertederos	Depósito de los residuos finales en vertederos	Riesgo de contaminación del suelo por derrames accidentales
<b>Paisajes</b>	Ocupación del suelo, impide otros usos	Ocupación del suelo, impide otros usos	Impacto visual; impide otros usos	Impacto visual	Tráfico
<b>Ecosistemas</b>	Contaminación y acumulación de sustancias en la cadena trófica		Contaminación y acumulación de sustancias en la cadena trófica		Riesgo de contaminación del suelo por derrames accidentales
<b>Zonas Urbanas</b>	Exposición a sustancias peligrosas		Exposición a sustancias peligrosas	Ruido	Riesgo de exposición a sustancias peligrosas por derrames accidentales; tráfico

Fuente: La UE apuesta por la gestión de residuos Luxemburgo: Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas. 2000<sup>6</sup>.

<sup>6</sup> Europe: The European Union .<[http://europa.eu.int/comm/environment/eufocus/waste\\_management\\_es.pdf](http://europa.eu.int/comm/environment/eufocus/waste_management_es.pdf)>

Cabe anotar que existen diversos sistemas de disposición final considerados como aceptables desde el punto de vista técnico y sanitario siempre y cuando cumplan una serie de condiciones que permitan mantener la calidad de nuestros recursos sin afectar adicionalmente al sistema natural, el medio ambiente y el ser humano. Es necesario reconocer que el hombre moderno, desconoce la magnitud de los efectos que esta causando y causarán los residuos de: fertilizantes, biocidas domésticos, etc., que no están siendo dispuestos adecuadamente. Conviene mencionar que hay muchas soluciones al problema del destino final de los residuos que se están aplicando hoy en día, aclarando no son los mas convenientes para nuestro medio.

#### **1.1.1.2. Situación actual de la gestión de R. S. U. En Colombia**

El proceso de gestión y disposición de los residuos sólidos en Colombia, al igual que en muchos países de Latinoamérica ha sido ejecutado de forma inadecuada. En América Latina más del 50% de los residuos sólidos generados se disponen de manera inadecuada en botaderos a cielo abierto o en fuentes de agua<sup>7</sup>.

Gran parte de la problemática que se genera en torno a los residuos sólidos es debido a nuestro modelo de desarrollo el cual se caracteriza por no ser integral. El producir para desechar deja abiertos los ciclos naturales de la materia y genera por consiguiente un desequilibrio en todos los campos de las actividades antrópicas. Cuando en nuestras casas ponemos en un mismo recipiente todos los materiales que queremos desechar, estamos generando residuos, si mezclamos con material descompuesto otro que no lo es, todo se vuelve maloliente. Igualmente cuando mezclamos materiales tóxicos con objetos que aun son útiles, obtendremos residuos tóxicos y sin valor económico los cuales queremos desaparecer lo más rápido y lejos posible

La utilización de las energías renovables y el uso racional de la energía en general, constituyen estrategias básicas para cualquier país que busca el desarrollo sostenible. En Colombia, ello implica la necesidad de realizar actividades de conversión energética, evaluar y aplicar nuevas tecnologías y desarrollar programas de capacitación que permitan una mayor difusión de estos temas.

En Colombia, mas específicamente en el sector rural, nació un fuerte interés por la tecnología del Biogás a finales de los años 70, alimentado por las informaciones sobre el auge de esta tecnología en China, India y Vietnam. Como consecuencia se difundió la tecnología de los biodigestores en las fincas, copiando inicialmente los modelos chinos (cúpula fija, presión variable) e indios (campana flotante, presión estable), este proceso de fomento y divulgación de toda la información relativa a los biodigestores se realizó de buena

---

<sup>7</sup> El Universal, Sección Actualidad, julio 31 de 2005

voluntad pero de una manera somera y bastante ingenua por parte de ciertas entidades estatales encargadas de la agricultura o energía (I.C.A. Instituto Colombiano Agropecuario, CVC (con apoyo GTZ), CORELCA (proyecto PESENCA con apoyo GTZ), INCORA (Instituto Colombiano de Reforma Agraria), ICEL (Energía Eléctrica), SENA (Servicio Nacional de Aprendizaje)), desde las oficinas centrales de Bogotá o desde las oficinas regionales, generalmente sin coordinación ninguna entre ellas<sup>8</sup>. Las O.N.G. divulgaron también la tecnología, como herramienta básica en las granjas autosuficientes. El ejemplo más conocido es HOGARES JUVENILES CAMPESINOS (Monseñor Cadavid). Sin embargo cabe resaltar que en ningún caso ha habido política de gobierno, ni coordinación inter-institucional, sino que eran iniciativas sueltas de personas entusiastas dentro de las instituciones. Tampoco ha habido análisis de la tecnología, modelos, componentes, ni de la rentabilidad de la tecnología propuesta. Así mismo tampoco ha habido monitoreo de las unidades construidas para permitir su evaluación y mejoramiento. En conclusión no hubo política sino ganas.

En igual medida la falta de educación y sensibilización ambiental a las comunidades en el manejo y eliminación de sus desechos ha propiciado el uso de las aceras, vías, prados, parques, quebradas, ríos y cualquier otro espacio público, como sitios de disposición de los residuos sólidos, impidiendo así el manejo y control de los mismos por parte de las empresas prestadoras del servicio público domiciliario de aseo. Toda esta cultura del desperdicio, del uso inadecuado de elementos llamados “desechables”, incrementa cada año los volúmenes de desechos y generan acumulación de residuos en los actuales sitios de disposición final.

A la anterior situación se suman las siguientes<sup>9</sup>:

- Desconocimiento de la normatividad sanitaria ambiental para desarrollar los proyectos de aseo como el RAS/2000 (Resolución 1096 del 17 de noviembre del 2000), Decreto Reglamentario 1713 de 2002 y Capítulo 4º de la Resolución CRA 151 de 2001.
- Falta de gestión y compromiso de las autoridades municipales para realizar inversiones en el sistema de aseo con recursos propios, conforme la Ley 715 de 2001.
- Insuficiencia de recursos asignados en los presupuestos nacional y departamental.
- Operación y mantenimiento inadecuados del sistema, en los componentes de barrido, recolección, transporte y disposición final de residuos sólidos por parte de los entes prestadores.
- Bajos niveles de cobertura del servicio en municipios menores.
- No se tienen recursos humanos capacitados y calificados en todos los niveles.

---

<sup>8</sup> CONIL, Phillipe. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES Y DESECHOS, CON ENFASIS SOBRE LA DIGESTION ANAEROBIA, estudio de caso: Colombia. 1996.

<sup>9</sup> Superintendencia de Servicios Públicos. Supercifras Acueducto, Alcantarillado y Aseo 1998-2001. Revista #6, Año 2002

Con respecto a esta problemática, por medio del Decreto 1713 del 2002, y luego, en el 2003, el Ministerio del Medio Ambiente<sup>10</sup> dió un plazo definitivo de dos años para que en todo el país se cerraran los sitios donde se disponen basuras a cielo abierto y para que los alcaldes implementaran en sus municipios un Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos. Este plazo se venció el 3 de octubre de 2004, y a la fecha varios de estos botaderos a cielo abierto siguen recibiendo las basuras producidas por las ciudades bajo la declaratoria de emergencia ambiental. Según información suministrada por el Ministerio del Medio Ambiente solo a finales del año 2007 todos los botaderos a cielo abierto deberán estar cerrados en su totalidad<sup>11</sup>.

Con base en estudios realizados en 1994<sup>12</sup>, en Colombia se producen aproximadamente 18.000 toneladas diaria de residuos sólidos, cada colombiano produce en promedio 0,5 kilos diarios de basura, 15 kilos/mes y 180 kilos/año, el 71% se produce en Cundinamarca, Antioquia, Atlántico y Valle. Se estima que el 85% de las basuras se generan en los hogares, y el 15% restante lo produce el comercio, la industria, las instituciones, las plazas de mercado y las vías públicas. Entre un 20 y un 30% del dinero que gastamos en nuestras compras lo invertimos en los envases que van directamente al botadero es decir, un 20 y 30% de nuestra inversión va directamente a la basura.

La composición física de los residuos varía con las costumbres y grado de desarrollo de las regiones, permitiendo ver las tendencias en uso de ciertos elementos, y determinando el potencial recuperable de muchos productos y el tipo de tecnología apropiado para el tratamiento de ellos.

En Colombia no existe una cultura de aprovechamiento de residuos, por ello actualmente la cantidad de basura per cápita producida, es un indicador directo del grado de desarrollo económico de cada región. En términos generales la basura en este país se compone de un 47% de materia orgánica (residuos de comida en su gran mayoría) y 53% de residuos inorgánicos: vidrio, papel, plástico, metales, textiles, huesos y otros, todos ellos aprovechables.

En la actualidad, según datos suministrados por el Ministerio del Medio Ambiente<sup>13</sup>, de todos los municipios que tiene el país, 750 (aproximadamente el 91% de los municipio de nuestro país) disponen sus basuras en botaderos a cielo abierto, sobre ríos o fuentes de agua superficiales o se entierran sin ninguna técnica. Todo eso sin contar, que de los 302 rellenos sanitarios activos, considerados como el sistema más apropiado, 136 (45%), funcionan sin licencia ambiental. Debido en gran parte al desconocimiento de las autoridades locales

---

<sup>10</sup> Federación Colombiana de Municipios. <<http://www.fcm.org.co/es/noticia.php?uid=0&todo=0&det=3644&leng=es>>

<sup>11</sup> Diario EL MUNDO (Salvador). <<http://www.elmundo.com.sv/vernota.php?nota=51062&fecha=19-12-2005>>

<sup>12</sup> Red Juan Colombia. CENSAT Agua Viva. <[http://www.censat.org/Red\\_Juan\\_Novedades.htm#L4](http://www.censat.org/Red_Juan_Novedades.htm#L4)>

<sup>13</sup> Ministerio del Medio Ambiente. (Colombia). <<http://www.minambiente.gov.co/>>.

sobre la información necesaria (incumplimiento de las especificaciones técnicas, así como "la incoherencia de la normatividad que se aplica al tema") para llevar a cabo una buena disposición final de los residuos sólidos, y en otra medida, a la falta de apoyo y de incentivos, así como también a la escasez de sitios adecuados para su disposición final por parte del gobierno nacional para propender por un buen uso de los mismos.

Se pueden observar casos como en el departamento de Caldas, donde La mayoría de los municipios, 20 de 27, depositan las basuras en el relleno sanitario La esmeralda, de Manizales, que cuenta con el manejo apropiado de los sólidos y de los lixiviados, según la Corporación Autónoma Regional de Caldas (Corporcaldas)<sup>14</sup>. Así mismo, otros tres rellenos sanitarios que cumplen con todas las condiciones son los de Aguadas, La Dorada y Marquetalia y sólo tres deberán cerrar en octubre próximo sus botaderos a cielo abierto: Pensilvania, Marulanda y Manzanares.

En el departamento del Atlántico<sup>15</sup>, La historia de estos basureros tiene más de 30 años. Unos 20 de ellos existen aún en los límites de Barranquilla, Soledad y Malambo, sin que ninguna de las últimas administraciones haya podido erradicar ni siquiera el 50% de ellos. Además de los problemas ambientales, el basurero alienta la presencia de gallinazos que son un problema constante para las aerolíneas y pilotos que a diario llegan al Aeropuerto Ernesto Cortizoz. El año pasado la Aeronáutica Civil estuvo a punto de cerrar el Aeropuerto, pero el interés de las autoridades, sumado a algunos compromisos ambientales hizo reversar la medida. Todavía no se ha hecho nada para disminuir el peligro circundante en el aeropuerto. De hecho, esta problemática se ha venido incrementando debido al aumento de botaderos satélite en inmediaciones del aeropuerto, poniendo en peligro las actividades de aeronavegación en el mismo. La situación más grave se presenta en Soledad y Malambo, debido a los recolectores informales de basuras, quienes en vehículos de tracción animal disponen a su acomodo los desechos en cualquiera de estos descampados abandonados.

Pero las cosas no son muy distintas en el departamento del Valle del Cauca, donde el Basurero de Navarro, que durante cerca de tres décadas ha recibido los residuos sólidos de los caleños, agotó su vida útil. Así lo señala la Corporación Regional Autónoma del Valle del Cauca (CVC)<sup>16</sup>. Ante la inminente emergencia sanitaria, la Administración Municipal encontró un predio ubicado en el corregimiento El Hormiguero, el más apropiado para disponer las 1.800 toneladas de desperdicio que produce la capital del Valle. Sin embargo, según expertos, el terreno de 60 hectáreas tiene problemas de inundabilidad por su proximidad al río Cauca, asentamientos humanos, y pozos profundos de agua usados para el consumo.

---

<sup>14</sup> Corporación Autónoma Regional de Caldas. CORPOCALDAS. <<http://www.corpocaldas.gov.co>>

<sup>15</sup> Corporación Autónoma Regional del Atlántico. CRA. <<http://www.crautonomia.gov.co>>

<sup>16</sup> Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. CVC. <<http://www.cvc.gov.co>>.

En el departamento de Antioquia, mas exactamente en la ciudad de Medellín, La operación del relleno sanitario Curva de Rodas finalizó el 31 de agosto de 2002. Por ello Empresas Varias de Medellín desarrolló, como medidas de contingencia, una alternativa de aprovechamiento de residuos en un lugar contiguo a dicho relleno. A partir de junio de 2003, los residuos se llevan al sitio denominado "La Pradera" en el municipio de Don Matías, al norte de Medellín. Este parque ambiental ha resultado ser un proyecto innovador en materia de manejo de los residuos sólidos, por cuanto combina las técnicas de tratamiento y disposición final o su confinamiento definitivo, con lo cual se busca hacer efectivo el concepto de Desarrollo Sostenible según el cual se debe conciliar el ejercicio de actividades económicas y de desarrollo que son de interés público o social, con la preservación de los recursos naturales que les sirven de sustento. Esto se ha visto sustentado dado que en el Parque Ambiental la Pradera se realizan labores que tienen que ver con la terminación de las obras físicas tales como: el perfilamiento final del terreno, instalación de la geomembrana como barrera física para proteger el suelo y las aguas subterráneas, reacomodo de los residuos en las zonas impermeabilizadas, conformación de los residuos bajo la estructura de celda, la instalación de un filtro para la conducción de lixiviados, filtros para evitar que las aguas de escorrentía entren en contacto con la masa de residuos, la recolección, bombeo, cargue y transporte de los lixiviados a la planta de tratamiento de aguas residuales San Fernando, la adecuación de los canales perimetrales y la culminación de las obras relacionadas con la infraestructura vial del proyecto<sup>17</sup>.

Así mismo, en el departamento del Meta, mas exactamente en la ciudad de Villavicencio, se gestó después de 10 años un complejo parque ecológico llamado el Parque Ecológico Reciclante, este se encuentra situado donde antiguamente funcionaba el relleno de Don Juanito. Actualmente el parque recibe diariamente 300 toneladas de residuos que igualmente se encuentra a cargo de la empresa Bioagricola del Llano, la cual es la encargada de prestar el servicio de recolección, transporte y disposición final de los residuos generados en la ciudad de Villavicencio. Antes de depositar los residuos sólidos, se realizan estudios técnicos del suelo y obras civiles para evitar la contaminación del área circundante. Así mismo, cada porción de terreno donde se depositan desechos es previamente impermeabilizado para evitar que los fluidos de la descomposición lleguen al suelo, el subsuelo y las fuentes de agua<sup>18</sup>.

En la ciudad de Bucaramanga, departamento de Santander, La empresa EMAB (Empresa de Aseo de Bucaramanga) y el municipio de Bucaramanga están trabajando y han ejecutado inversiones para convertir en

---

<sup>17</sup>Corporación Autónoma Regional de Antioquia.

<[http://www.corantioquia.gov.co/index.php?option=com\\_content&task=category&sectionid=1&id=1&Itemid=26](http://www.corantioquia.gov.co/index.php?option=com_content&task=category&sectionid=1&id=1&Itemid=26)>

<sup>18</sup> Bioagricola del Llano S.A. E.S.P. <<http://www.bioagricoladellano.com.co/website/index.php/parque?>>

los últimos años el sitio Carrasco en un sistema de enterramiento con características de relleno sanitario. Pero por disposición de la autoridad ambiental su vida útil venció el 10 de julio de 2005. La EMAB y el municipio de Bucaramanga han adelantado estudios; la primera opción es la ampliación del Carrasco que tiene capacidad (en la etapa tres), hasta diciembre del 2006; y hasta cinco años más, si se usa el espacio que ha dejado el lugar donde se encontraba el material de cobertura.

Montería, capital del departamento de Córdoba, Cuenta con un botadero de basuras cuya fecha de cierre, por disposición de la autoridad ambiental, se cumplió en diciembre de 2002. En 2003 se hizo efectivo el amparo policivo por parte de la autoridad ambiental y se declaró la emergencia sanitaria para disponer en el mismo sitio hasta que se encontrara un sitio adecuado. La CVC, mediante resolución, otorgó licencia Ambiental para la operación del nuevo relleno sanitario "Loma Grande". El operador del relleno Parque Nueva Montería, iniciaría operaciones a finales de 2005<sup>19</sup>.

En general, en las grandes ciudades del país se viene acrecentando la problemática respecto a los sitios de tratamiento y disposición final de los residuos, no teniendo un horizonte hacia el cual se puedan dirigir estrategias encaminadas a un aprovechamiento de estos y a su correcta disposición.

### **1.1.1.3. Situación actual de la gestión de R. S. U. En Cartagena.**

#### **1.1.1.3.1. Botaderos y rellenos sanitarios.**

El relleno sanitario de Henequén, utilizado para la disposición final de los residuos, fue un botadero a cielo abierto localizado al sur occidente de la ciudad de Cartagena, durante su tiempo de uso operó sin ningún tipo de control técnico, provocando impactos de tipo biofísico, sociocultural, económico e institucional; es en 1994 y debido a una acción de tutela, que es ordenado el cese de toda operación dentro del botadero de henequén. En este mismo año, se inicio la disposición final de los residuos sólidos en el sitio de Henequén, operado por el consorcio de aseo LIME S.A. ESP. Con el apoyo de la empresa CICON S.A., desde su puesta en operación, se presentaron problemas para la obtención de la licencia ambiental para su operación y funcionamiento, además de presentar problemas con el manejo de lixiviados y la recirculación de los mismos, la compactación de los residuos, erosión de los taludes, y toda una serie de problemas de contaminación que conllevarían a su cierre en septiembre de 2001, debido al agotamiento de su vida útil. Posteriormente se diseñaron planes de clausura y post-clausura del relleno, con miras a prevenir problemas sanitarios a la población y la restitución del paisaje natural de la zona urbana.

---

<sup>19</sup> Información de Colprensa, los diarios El País, La Patria y el corresponsal en Barranquilla. Publicada en el diario El Universal, "Basuras: Fuera de Lugar", Julio 31 de 2005.

En octubre del 2001 se inicia el proceso de disposición en el relleno sanitario de La Paz, de manera temporal mientras se adjudicaba el servicio de disposición final mediante licitación pública. En marzo de 2002 bajo la responsabilidad del distrito se procede a reanudar la disposición de los residuos hasta llegar a un acuerdo con la empresa INGEAMBIENTE para la operación del relleno sanitario. Posteriormente surgieron problemas por los cuales se pensó en reutilizar el botadero de henequén, pero dadas las acciones legales que surgirían si este fuera usado, obligaron al Distrito a acudir con INGEAMBIENTE de manera temporal con miras a solucionar la posible crisis ambiental que se podría presentar, situación que se dio hasta el 17 de noviembre del 2004, tiempo en el cual se cumplió el plazo estipulado entre ambas partes. En enero del 2003 se adjudicó mediante licitación la contratación por 20 años con la Empresa Tirsa el manejo, tratamiento y disposición final de los residuos en el vertedero de la Concordia, en donde se iniciaría un sistema de aprovechamiento de residuos sólidos para realizar labores de reciclaje y producción de compost, dado que para estas actividades no se requiere de licencia ambiental, pero si requiere de los permisos pertinentes de la autoridad ambiental. Luego de una inspección por parte de una empresa consultora de ingeniería ambiental, CARDIQUE (Corporación Autónoma Regional del Canal del Dique) ordenó su cierre en mayo de 2003.

Un nuevo contrato fue hecho y la nueva empresa, Caribe Verde, entró a operar desde abril del 2005. Sin embargo, la Superintendencia de Servicios Públicos hace seguimiento, teniendo en cuenta que esta entidad no cumplía las normas exigidas al momento de entrar en funcionamiento.

#### **1.1.1.3.2. Generación de residuos**

En cuanto a la generación de residuos, éste viene siendo un problema creciente, mas aún, Cartagena no cuenta con estrategias de mercadeo y sistemas de producción sostenibles que puedan incidir sobre los patrones de consumo de la población. Además, el distrito no ha establecido programas especiales que incentiven la conciencia ciudadana sobre los impactos negativos generados por la mala disposición de los residuos en los cuerpos de agua, los canales pluviales y rondas de arroyos, así mismo, no es clara la participación de la comunidad en programas de separación y reciclaje que permitan establecer algún incremento en la economía familiar.

En el sector de las PYMES, existe una incapacidad financiera que permita la adopción de tecnologías limpias y solo en algunos casos se ha podido observar la formulación y el cumplimiento de planes de gestión ambiental. Es bien conocido que en Cartagena hace pocos años se llevo a cabo un convenio entre Producción mas Limpia y la Fundación Mamonal (hoy Andi Cartagena), de igual manera existe un

desconocimiento general sobre las bondades que implica la introducción de estas tecnologías en los procesos productivos y no está claramente reglamentada la responsabilidad de los sectores productivos en la generación, manejo y disposición de residuos post-consumo.

#### **1.1.1.3.3. Potencial de utilización de residuos**

En la actualidad, en la ciudad los residuos se mezclan en el origen, esto sucede tanto con los residuos peligrosos como los no peligrosos; como consecuencia de estos procesos se pierde el potencial comercial de aquellos residuos que pueden ser aprovechables, notando que la recuperación en los hogares se da en forma voluntaria y por sentido solidario. Precisamente se han realizado varios intentos con miras a implantar programas, los cuales propenden iniciativas puntuales sobre la separación en la fuente y los procesos de reciclaje, pero ha resultado muy obvio la clara falta de promoción por parte las instituciones encargadas de desarrollar dichos proyectos.

Hoy en día es preciso notar que no existe motivación ni cultura del aprovechamiento, esto es consecuencia de una pobre sensibilización hacia la población cartagenera respecto a los impactos que genera el manejo inadecuado de los residuos en la calidad de vida de la población y la conservación de los recursos naturales. Así mismo, escasea la población con conciencia y hábitos de reutilización y de separación en la fuente, dado que se juzga a la recuperación de residuos como una actividad marginal, poco digna y no muy aceptada socialmente. Dada esta situación, las pocas empresas de reciclaje no tienen carácter empresarial y sus estructuras organizacionales no corresponden a los lineamientos de una organización.

#### **1.1.1.3.4. Manejo y disposición de residuos sólidos.**

Históricamente, en Cartagena se ha concebido una concepción del aseo, solamente basada en función de algunos aspectos higiénicos y sanitarios, enfocados en la limpieza de las vías públicas y la recolección y transporte de residuos sólidos. Este mismo ha estado vinculado a la disposición de grandes volúmenes en rellenos sanitarios o botaderos a cielo abierto sin considerar otras alternativas respecto a la aplicación de tecnologías alternativas para el tratamiento, aprovechamiento y disposición final de los residuos.

Esto se hace más evidente dado que las empresas prestadoras del servicio de aseo no han adoptado una política integral de gestión de residuos, y simplemente han optado por prestar los tradicionales servicios de recolección y transporte y no de disposición final. Agregando otro elemento a considerar: en la tarifa de aseo

solo se están considerando los costos de recolección y transporte de tal forma que no se están involucrando los costos reales de un sistema de eliminación, tratamiento o disposición final.

Gran parte del problema es responsabilidad de las autoridades distritales, las cuales no han previsto programas de desarrollo tecnológico que ofrezcan alternativas para el aprovechamiento y la comercialización de residuos, lo que ha generado desconfianza y recelo respecto a los beneficios económicos y sociales que estas actividades puedan generar. Así mismo han descuidado a lo largo de los años el manejo que se ha dado a los botaderos y vertederos que han existido en la ciudad, originando problemáticas tanto a nivel ambiental, como a nivel social e institucional.

La disposición inadecuada de toda clase de residuos sólidos en los cuerpos de agua de Cartagena y los numerosos enterramientos de desechos químicos realizados clandestinamente están comenzando a repercutir en la calidad de los suelos, del agua y de la salud humana, estas situaciones se evidencian en cuerpos de agua como la Ciénaga de las quintas, lugar donde van a parar diariamente la gran mayoría de los residuos producidos por los comerciantes del mercado de Bazurto, desconociendo el gran daño ambiental que poco a poco han ido generando a causa de la incorrecta disposición en un lugar no adecuado para estos.

## 1.2. FORMULACION DEL PROBLEMA

En la actualidad a nivel internacional, es creciente la preocupación por las alarmantes cantidades de desechos que están produciéndose en los centros urbanos, cuyo tratamiento tradicional ha venido haciéndose obsoleto debido al volumen, diversidad y complejidad de algunos de estos residuos, que al ser eliminados, agreden tanto los ecosistemas que sus efectos sobre el medio ambiente para las generaciones futuras resultan siendo nocivos. Por otra parte, la tendencia actual del precio internacional del petróleo prevé una crisis futura en cuanto a la producción de los países miembros de la OPEP (Organización de Países Exportadores de Petróleo), lo que puede provocar una disminución en la cantidad de petróleo suministrado, y por consiguiente, un aumento desmesurado en el precio internacional del crudo por barril. La actual dependencia de producir energía a partir de fuentes no renovables (gas, carbón) y el aumento constante de la demanda energética por parte de la sociedad dado el aumento en la compra de electrodomésticos alimentados con energía eléctrica, crea un panorama sombrío donde la búsqueda por nuevas fuentes alternativas de energía resulta ser cada vez más evidente.

Por tal motivo muchos países han invertido grandes cantidades de esfuerzo y dinero, ubicándose a la vanguardia en esta materia. Estos países han desarrollado avances tecnológicos en el manejo de residuos sólidos urbanos, que van desde mejoras en la disposición final hasta el aprovechamiento de muchos de estos residuos en diferentes aspectos, dentro de estos países están España, Alemania y Francia, miembros de la Unión Europea, donde la legislación ha influenciado en la creación de una cultura de conservación del medio ambiente, y en donde claramente se han visto grandes avances en el tratamiento de los residuos urbanos y su disposición final en vertederos controlados, preparándolos para su posterior aprovechamiento; proceso que incluye al final la generación de energía, el compostaje y abonos orgánicos.

En la actualidad países latinoamericanos han venido realizando esfuerzos en pro del aprovechamiento de los residuos sólidos, como es el caso de Chile y Brasil. En este último país se ha desarrollado un proyecto para la ciudad de Salvador de Bahía a través de un convenio entre la empresa VEGA y el gobierno municipal, obteniendo buenos resultados en cuanto a la disminución de emisiones de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) y Metano (CH<sub>4</sub>) hacia la atmósfera, gases que contribuyen al efecto invernadero y en consecuencia, al calentamiento global del planeta, a través de la captura y aprovechamiento del gas metano contenido en los residuos sólidos mediante chimeneas ubicadas en los fosos de disposición de los residuos.

En Colombia, existen algunos casos donde la empresa privada y algunos organismos del sector público han trabajado por una mejor disposición final de los residuos, este es el caso de la empresa INCAUCA S.A.<sup>20</sup>. La cual podemos mencionar como una de las pioneras en el aprovechamiento de los residuos de la caña de azúcar (bagazo de caña) para la cogeneración de energía; por un lado para el consumo propio de la planta, y por el otro, como proveedor de energía eléctrica en un sector del valle del cauca. Esto ha sido motivado gracias a los esfuerzos que ha hecho la CVC (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca), quien junto al Centro Nacional de Producción Más Limpia, ha venido implementando desde hace pocos años el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS), el cual rige a todas las empresas de la región del Valle del Cauca, y especialmente a aquellas ubicadas en el sector industrial de Yumbo y Cali.

Recientemente las Empresas Publicas de Medellín (EEPPMM), han realizado estudios para el aprovechamiento del biogás proveniente del tratamiento de las aguas residuales de la planta de tratamiento de San Fernando, lo que representa un impulso para el desarrollo de nuevos proyectos para el aprovechamiento del Biogás, igualmente en el departamento de Antioquia, mas exactamente en el municipio de la pradera<sup>21</sup> se ha establecido en el parque ambiental La Pradera el lugar donde son llevados para su tratamiento y disposición final los residuos sólidos del área metropolitana de la ciudad de Medellín. Este parque ha obtenido buenos resultados a pesar de las críticas por parte de algunos sectores quienes señalan que el parque no cuenta con una licencia ambiental que le permita ejercer el proceso de disposición final de los residuos. Igualmente se han visto excelentes resultados en el parque ecológico reciclante<sup>22</sup>, ubicado a las afueras de la ciudad de Villavicencio, donde hace varios años funcionaba el relleno sanitario Don Juanito. Y después de 10 años se ha convertido en un complejo parque ecológico de reciclaje de residuos, donde llegan cerca de 300 toneladas métricas de residuos que son procesadas y degradadas, para finalmente incorporarse al suelo.

Después de la sequía de la década pasada, provocada por fenómenos de carácter natural como el fenómeno del Niño (el cual se esta presentando nuevamente en la actualidad) y debido en igual manera al aumento de la demanda de energía eléctrica, el gobierno nacional y la empresa privada se vieron en la necesidad de invertir en las plantas de generación con el motivo de incrementar la capacidad de generación de energía eléctrica (térmica) a partir de fuentes no hídricas (carbón y gas) en aproximadamente un 50% en relación a la capacidad instalada<sup>23</sup>, la cual era de aproximadamente 27%, indicando una clara tendencia hacia la

---

<sup>20</sup> INGENIO DEL CAUCA S.A. INCAUCA. <<http://www.incauca.com/incauca/inergia.html>>.

<sup>21</sup> Corporación Autónoma Regional de Antioquia. CORANTIOQUIA. <<http://www.corantioquia.gov.co>>

<sup>22</sup> International Water and Sanitation Centre. <<http://www2.irc.nl/source/lges/item.php/5783>>

<sup>23</sup> UPME. Plan de Expansión de Referencia: Generación y Transmisión – 2002-2011. Bogota. 2002.

generación de energía eléctrica a partir de fuentes no renovables, lo que en un futuro podría generar problemas de autoabastecimiento eléctrico para el país si no se encuentran nuevos yacimientos de carbón y gas o nuevas fuentes de generación eléctrica.

En Colombia, varias ciudades han presentado proyectos de recuperación de biogás de vertederos ante organismos internacionales como el Banco Mundial o el CDM (Clean Development Mechanism o Mecanismo de Desarrollo Limpio) para certificar reducciones de emisiones de gases de efecto invernadero (CER's por sus siglas en inglés) y así poder negociar las anteriores CER's e ingresar al Mercado del Carbono, mostrando en principio un pequeño interés a nivel nacional por la búsqueda de alternativas en cuanto a generación de energía eléctrica se refiere, obteniendo beneficios adicionales, principalmente a nivel ambiental y social, pero adicionalmente obteniendo beneficios económicos por la venta de CER's y la venta del excedente de generación de energía eléctrica, y en igual medida, beneficios a nivel tributario por las exenciones en cuanto a impuestos se refiere, otorgadas por el gobierno nacional para aquellas empresas que propendan por la generación de energía limpia a partir de fuentes renovables.

En Cartagena, se puede apreciar la problemática existente alrededor de la gestión de los residuos que se producen en la ciudad, y de los numerosos problemas de salubridad que se han presentado en las zonas aledañas a la ubicación de los rellenos sanitarios utilizados con anterioridad, como en el caso del relleno de Henequén, que hasta el momento no ha sido clausurado y ha generado una gran cantidad de quejas de parte de los pobladores del sector por las pésimas condiciones sanitarias como consecuencia de la disposición inadecuada y anti-técnica de las basuras en ese lugar durante su tiempo de operación, esto se ha evidenciado por las condiciones necesarias para las operaciones de clausura y post-clausura del relleno.

Si bien recientemente en los rellenos sanitarios del país se han implementado medidas tendientes a minimizar el impacto del manejo de los residuos, como los malos olores, la presencia de lixiviados, entre otros, existe la oportunidad de adaptar nuevos procesos y tecnologías que están siendo utilizadas exitosamente en el resto del mundo, para no pensar solamente en cómo y dónde acumular estos desechos sino cómo poder aprovecharlos al máximo y así complementar la gestión integral de los mismos, prolongando a la vez la vida útil de los sitios destinados a la disposición final de aquellos residuos no aprovechables.

### **1.3. JUSTIFICACIÓN**

Dada la problemática actual del manejo de los residuos sólidos en la Ciudad, y los potenciales efectos nocivos en la salud de la población que reside cerca de los puntos de concentración de las basuras (botaderos satélites, botaderos a cielo abierto), es necesario tomar medidas que tiendan a mejorar las condiciones de salubridad en estos sitios y que permitan aprovechar los desechos que están afectando el equilibrio ecológico, incluso en el lugar destinado para su disposición final.

La producción de estos desechos es mayor cada día y las medidas encaminadas hacia una gestión integral no se ponen en práctica por parte de las autoridades locales, por esta razón es prudente y necesario aplicar mecanismos como los incluidos en la política nacional de residuos sólidos, que sean más eficientes y menos complejos en su aplicación en el manejo de los residuos.

Por otro lado, nuestro país debe entrar a competir en la carrera mundial que existe en torno a la creación de una conciencia ecológica en la gente para el máximo aprovechamiento de los desechos más allá del reciclaje, y su participación en el desarrollo de fuentes de energía limpias, con miras a no depender por más tiempo de fuentes de energía no renovables como los combustibles fósiles y la energía nuclear, que aparte de no ser renovables, han deteriorado en dos siglos a nuestro planeta, más de lo que éste se había deteriorado en miles de años.

Por todo esto, es necesario un proyecto que pueda convertirse en el primer ladrillo de la construcción de una conciencia ecológica colectiva que ayude a ofrecerles un mundo más limpio a las generaciones futuras desde este mismo momento, y que sirva de apoyo a las instituciones que están a cargo actualmente de la gestión de estos residuos para garantizar que la misma sea integral.

## **1.4. OBJETIVOS DEL PROYECTO**

### **1.4.1. Objetivo general**

Elaborar el diseño preliminar de una dependencia del relleno sanitario que garantice la gestión de los residuos sólidos orgánicos generados en la ciudad de Cartagena de Indias, a través del aprovechamiento para la generación de energía eléctrica y la obtención de abono orgánico, mediante la implementación de tecnologías y procesos que faciliten su reutilización y posterior disposición final.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Identificar, describir, y analizar las tecnologías, los procesos, la infraestructura y los equipos requeridos para la generación de energía eléctrica a partir de la incineración de combustible derivado de residuos (CDR), producto del tratamiento de la fracción orgánica e inorgánica de los residuos sólidos, y la combustión del biogás obtenido por la biometanización de la fracción orgánica de los residuos.
- Identificar, describir, y analizar las tecnologías, los procesos, la infraestructura y los equipos requeridos para la obtención de abono orgánico o compost como subproducto del proceso de biometanización de la fracción orgánica de los residuos sólidos.
- Calcular la capacidad requerida para el procesamiento del biogás y del compost orgánico, necesarios para la operación de la planta de compostaje y cogeneración eléctrica, con base en los niveles actuales de generación de residuos aprovechables, proyectando la tasa de crecimiento o decrecimiento a presentarse durante la vida útil del proyecto.
- Determinar a partir de las cantidades generadas y tratadas de residuos sólidos, la capacidad de generación de biogás procedente de los vertederos, los factores de emisión de la fracción que realmente se degrada y de la fracción que se libera como metano, así como su grado de recuperación en el relleno sanitario.

## **1.5. DISEÑO METODOLÓGICO**

### **1.5.1. Tipo de investigación**

La investigación es de tipo exploratorio-descriptiva basada en un estudio productivo, dado que se pretende examinar un tema o problema de investigación poco estudiado o que no ha sido abordado antes, dentro del cual se establecerán unas herramientas guías que permitirán desarrollar nuevos proyectos en pro de un mejor aprovechamiento de los recursos, sin olvidar el adecuado manejo del medio ambiente en general.

### **1.5.2. Método de investigación**

El método que se va a implementar en esta investigación es el inductivo-deductivo a través del análisis y la descripción, pues se busca analizar la situación actual de la gestión de los residuos sólidos orgánicos en el relleno sanitario de Cartagena de Indias, describiendo igualmente las causas de la creciente problemática de estos, exponiendo nuevas formas y tecnologías para su aprovechamiento.

### **1.5.3 Delimitación del proyecto**

#### **1.5.3.1. Delimitación temporal**

Para el diseño preliminar de una dependencia de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos del relleno sanitario de Cartagena, para la generación de energía eléctrica, y la obtención de compost se requerirá información histórica y actual de los niveles de producción de residuos sólidos en la ciudad de Cartagena y su composición e igualmente, las cantidades depositadas en los rellenos sanitarios.

#### **1.5.3.2. Delimitación espacial**

Será el objeto de estudio de esta investigación el entorno urbano de la ciudad de Cartagena.

#### **1.5.3.3. Delimitación temática**

El estudio se realizará basándose en los elementos considerados en los lineamientos generales del Manejo, Gestión y Aprovechamiento de Residuos Sólidos Orgánicos. (Compostaje, Digestión aerobia/anaerobia, Incineración, Cogeneración, Biogás) y su impacto en el medio ambiente.

### **1.5.4. Fuentes de recolección de información**

Las fuentes de recolección de información son imprescindibles e indispensables. A través de estas se va a obtener información precisa, confiable y veraz que permitirá fundamentar el proyecto. Estas se clasifican en:

· **Fuentes Primarias:**

Para los efectos del desarrollo de nuestra investigación encontramos de carácter principal la información recolectada y suministrada por CARDIQUE como ente regulador y principal fuente de datos históricos sobre los residuos sólidos generados en la ciudad de Cartagena, así mismo por información suministrada por el Establecimiento Público Ambiental, INGEAMBIENTE, y los operadores del servicio de aseo urbano y los operadores de los sitios de disposición final de los residuos sólidos.

· **Fuentes secundarias:**

Se obtendrá información a través de la documentación presentada en las referencias bibliográficas de este documento y cualquier otro texto que sea pertinente a la investigación, igualmente se analizará toda la información técnica actualizada sobre el manejo y la disposición de los residuos sólidos orgánicos a nivel nacional y a nivel mundial, considerando en gran medida las nuevas tecnologías desarrolladas principalmente en Europa durante los últimos años con miras a la reducción y a un mejor aprovechamiento de estos.

**1.5.5. Técnicas e instrumentos de recolección de información.**

Para el estudio hemos decidido usar como técnica de recolección de información la Observación Estructurada como eje central para la evaluación de la información, lo que nos permita visualizar, obtener e identificar cada aspecto relacionado en cuanto a las condiciones del manejo y disposición final de los residuos sólidos en los distintos vertederos existentes en la ciudad, posibilitando un mejor análisis e interpretación de los datos.

Para propósitos del trabajo, se ha determinado indispensable el estudio del marco legal y normativo aplicable a la disposición final de los residuos sólidos y la generación y comercialización de energía eléctrica, con miras a identificar la solución a implementar y su plan de manejo. Se prevé el estudio de las tecnologías y procesos a desarrollar, para determinar las cantidades de tratamiento y las posibilidades de introducir mejoras en los procesos para optimizar su funcionamiento.

El desarrollo de la investigación se centraliza en primera parte, de una descripción de las tecnologías actuales en cuanto al tratamiento y disposición final de los residuos; posteriormente se analizarán los datos obtenidos a través de CARDIQUE y la superservicios para determinar los procesos óptimos a desarrollar dentro de la instalación. Luego a la selección de los procesos óptimos, se procederá a la esquematización de cada uno de los procesos, así como su distribución y localización dentro de la instalación. Se analizarán las capacidades de producción de compost, así mismo las cantidades de producción de energía eléctrica a partir de la combustión y la cogeneración. En última instancia se evaluarán los beneficios en cuanto a reducción de emisiones de carbono al medio ambiente.

## 2. ANALISIS DE DATOS SOBRE GENERACIÓN DE RESIDUOS E IDENTIFICACION DE LAS CANTIDADES ÓPTIMAS DE TRATAMIENTO

### 2.1. ANALISIS SOBRE LA PRODUCCIÓN DE RESIDUOS EN COLOMBIA

A través de un estudio realizado en el año 2001 por la Superintendencia de Servicios Públicos<sup>24</sup>, se pudo establecer un consolidado general sobre la situación actual de la disposición final de los residuos sólidos generados en las distintas ciudades y municipios del país, el estudio analizó la situación de la disposición de 1.086 municipios del país.

Dentro de este estudio, se evidenció que la gran mayoría de los municipios del país (565), realizan la disposición final de los residuos a través de botaderos y quemas a cielo abierto, mostrando un claro desconocimiento sobre la reglamentación para la buena disposición final de los residuos sólidos e incumpliendo todos los aspectos técnicos de acuerdo a lo establecido por las normas dictadas por el comité de regulación del agua potable y saneamiento básico (C.R.A.). Solo en 350<sup>25</sup> municipios de los 32 departamentos realizan la disposición final a través de sistemas de relleno sanitario, muchos de estos municipios realizan conjuntamente su disposición final en un relleno sanitario regional. Entre otras alternativas de disposición observadas se pueden anotar las disposiciones en cuerpos de agua con 32 municipios, 42 municipios realizan la disposición a través del enterramiento, 5 municipios utilizan sistemas de incineración, 72 municipios no especifican su sistema de disposición final y 44 utilizan otros sistemas de disposición (lombricultura, compostaje, planta integral de residuos).

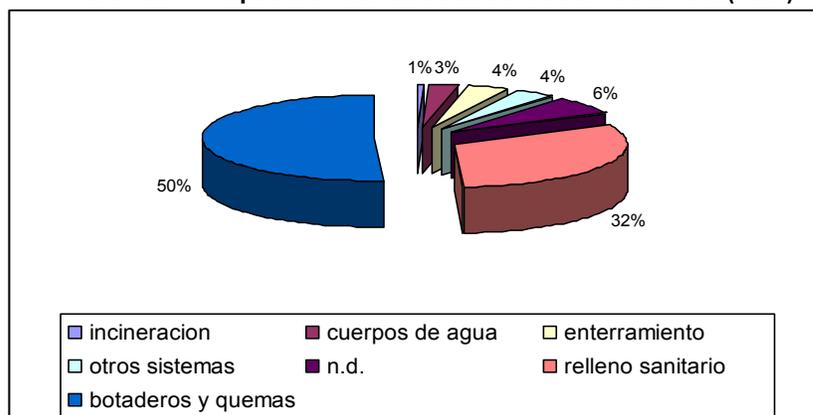
Con relación al siguiente gráfico se observa que:

- Sólo 350 municipios, que representan un 32%, disponen de manera adecuada sus residuos sólidos a través de rellenos sanitarios, muchos de los cuales son de tipo regional.
- En las verificaciones de la entidad se ha podido constatar que aproximadamente un 50% de estos sistemas, clasificados como rellenos sanitarios, se asemejan más a sistemas de enterramiento, es decir, 175 municipios podrían estar mal clasificados.
- De acuerdo con lo anterior, aproximadamente 891 municipios, que representan el 82% del total de la muestra, efectúan una disposición final antitécnica.
- De 1.086 municipios sólo 52 realizan alguna actividad de aprovechamiento de residuos, acompañada de una disposición final a través de relleno sanitario, enterramiento o botadero.

<sup>24</sup> Superintendencia de Servicios Públicos. Supercifras Acueducto, Alcantarillado y Aseo 1998-2001. Revista #6 2002, p23

<sup>25</sup> Ibid, p24

**Gráfica 1: Disposición de residuos sólidos en Colombia (2001).**



Se ha estimado que el 85 % de las basuras se generan en los hogares, y el 15% restante lo produce el comercio, la industria, las instituciones, las plazas de mercado y las vías públicas. Entre un 20 y un 30 % del dinero que gastamos en nuestras compras lo invertimos en los envases que van directamente al botadero es decir, un 20 y 30% de nuestra inversión va directamente a la basura<sup>26</sup>.

En Colombia, para una producción per cápita entre 0.6 y 0.65 kg/hab/día<sup>27</sup>, se tiene una producción total de 27.150 t/día, destacándose lo siguiente:

- El 41% de los residuos sólidos dispuestos es generado por las grandes ciudades, donde Bogotá dispone el mayor porcentaje de residuos sólidos con 20%, seguido de Medellín con 8.8%, Cali con 6.6% y finalizando con Barranquilla con 5.3%, produciéndose un total aproximado de 11.150 t/día.
- Las demás ciudades capitales departamentales representan el 18.6%.
- Los demás de municipios, en el nivel nacional, representan el 40.4%.

Cabe resaltar dentro de las cifras para las grandes ciudades, donde el mayor volumen de residuos dispuestos se ha encontrado en Bogotá con 5.500 t/día y el menor en Barranquilla con 1.450 ton/día. Como datos importantes podemos mencionar a Medellín con 2.400 t/día y Cali con 1.800 t/día de residuos sólidos producidos.

En Colombia se ha evidenciado que no existe una cultura de aprovechamiento de los residuos, por ello actualmente la cantidad de basura per cápita producida, es un indicador directo que permite evaluar el grado de desarrollo económico de cada región. En términos generales la basura en este país se compone de un

<sup>26</sup> *Ibíd.* p32

<sup>27</sup> *Ibíd.* p48

47% de materia orgánica (residuos de comida en su gran mayoría) y 53% de residuos inorgánicos: vidrio, papel, plástico, metales, textiles, huesos y otros<sup>28</sup>, muchos de los cuales pueden ser aprovechados a través de sistemas de valorización energética o por medio de su reutilización y posterior reincorporación al ciclo productivo.

En cuanto a la vida útil de los sitios de disposición final ésta depende de las siguientes actividades, que amplían o disminuyen su rango, entre ellas las siguientes:

- Separación de residuos sólidos en la fuente.
- Recolección selectiva de residuos sólidos.
- Técnicas de aprovechamiento o tratamiento.
- Área del terreno.
- Operación del sistema de acuerdo con los lineamientos previamente establecidos.

## 2.2. ANALISIS SOBRE LA PRODUCCIÓN DE RESIDUOS EN CARTAGENA DE INDIAS

Para el año 2000<sup>29</sup>, la ciudad de Cartagena contaba con 902.005 personas según datos obtenidos a través del plan de ordenamiento territorial establecido en el año 2002, de las cuales 829.476 personas correspondientes al 91.96% de la población se encuentra ubicada en el casco urbano, así mismo el restante 8.04%, es decir, 72.529 personas, corresponden al sector rural de la ciudad de Cartagena.

**Tabla 2: Población (2000)**

Demografía	Urbana	Rural	Total
No. Habitantes	829.476	72.529	902.005
Proporción	91,96%	8,04%	

Por otro lado, la densidad de población de la ciudad en la zona urbana es de 5.35 habitantes por cada vivienda, mientras que en la zona rural esta misma densidad equivale a 4.51 personas por cada vivienda<sup>30</sup>, lo que da a entender un mayor tamaño del núcleo familiar en el sector urbano en relación con el sector rural.

Mediante el estudio "formulación de la política social estratégica para Cartagena de indias (Diciembre de 2002)", se determinó que la tasa de crecimiento promedio anual de la población de la ciudad ha sido superior a las tasas del departamento de Bolívar y de la Nación: para el año 2000 el país presentaba un crecimiento

<sup>28</sup> Red Juan Colombia. CENSAT Agua Viva. <[http://www.censat.org/Red\\_Juan\\_Novedades.htm#L4](http://www.censat.org/Red_Juan_Novedades.htm#L4)>

<sup>29</sup> Alcaldía de Cartagena. Programa de las Naciones Unidas Para el Desarrollo PNUD COL 00/005. PLAN DE GESTION INTEGRAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS DEL DISTRITO DE CARTAGENA. Cartagena de indias, Enero 2004.p47

<sup>30</sup> *Ibid.* p47

anual de 1.9%, el departamento 2.5% y el Distrito 2.9%. Se observa en la tabla 2, donde para el año 1995, la población de Cartagena era de 780.527; en 2000 aumentó a 902.005; mientras que las proyecciones para el año 2015 estiman en 1.300.000 el número de personas<sup>31</sup>.

**Tabla 3: Evolución Histórica y Proyección de las Tasas de crecimiento de la Población de Cartagena (Periodo1951-2018)**

Años	Total		Cabecera		Resto	
	Poblacion	Tasa Crec.	Poblacion	%	Poblacion	%
1951	111.300					
1964	217.900	5,300%				
1973	348.961	4,300%	311.664	89,31%	37.297	10,69%
1985	563.949	4,000%	522.318	92,62%	41.631	7,38%
1993	747.390	3,520%	681.668	91,21%	65.722	8,79%
1995	780.527	2,290%	713.570	91,42%	66.957	8,58%
1998	852.594	2,940%	782.205	91,74%	70.389	8,26%
1999	877.238	2,890%	805.757	91,85%	71.481	8,15%
2000	902.005	2,823%	829.476	91,96%	72.529	8,04%
2001	927.117	2,780%	853.556	92,07%	73.561	7,93%
2002	952.523	2,740%	877.980	92,17%	74.543	7,83%
2003	978.187	2,690%	902.688	92,28%	75.499	7,72%
2004	1.004.074	2,650%	927.657	92,39%	76.417	7,61%
2005	1.030.149	2,600%	952.855	92,50%	77.294	7,50%
2006	1.056.489	2,560%	978.309	92,60%	78.180	7,40%
2007	1.083.080	2,520%	1.004.015	92,70%	79.065	7,30%
2008	1.109.907	2,480%	1.029.994	92,80%	79.913	7,20%
2009	1.136.955	2,440%	1.056.231	92,90%	80.724	7,10%
2010	1.164.207	2,400%	1.082.712	93,00%	81.495	7,00%
2011	1.188.684	2,350%	1.106.109	93,05%	82.575	6,95%
2012	1.214.909	2,310%	1.131.438	93,13%	83.471	6,87%
2013	1.241.133	2,270%	1.156.767	93,20%	84.366	6,80%
2014	1.267.358	2,230%	1.182.096	93,27%	85.262	6,73%
2015	1.293.583	2,180%	1.207.425	93,34%	86.158	6,66%
2016	1.319.807	2,140%	1.232.754	93,40%	87.053	6,60%
2017	1.346.032	2,100%	1.258.083	93,47%	87.949	6,53%
2018	1.372.257	2,060%	1.283.412	93,53%	88.845	6,47%

Fuente: DANE. Proyecciones de población 1995-2005, Censos de Población (1965, 1973, 1985, y 1993), Cálculos del POT (2002)<sup>32</sup>, PGIRS 2005, Decreto 0977 por medio del cual se adopta el Plan de Ordenamiento Territorial de la ciudad de Cartagena y los Autores.

En la tabla 3<sup>33</sup> se observa la tendencia descendente en la tasa de crecimiento de la población de la ciudad, mientras que la población de la cabecera o zona urbana crece en participación del total de la población con respecto a la población de la zona rural de la ciudad, cuya participación del porcentaje de la población va

<sup>31</sup> Convenio de la Alcaldía de Cartagena de Indias y la Corporación Viva la Ciudadanía

<sup>32</sup> El plan de ordenamiento territorial del año 2002 utilizó como soporte para su realización el trabajo denominado: "Localización Espacial de la Población de Cartagena para el periodo 1995-2005; la encuesta nacional de Hogares de 1999 y las "Proyecciones de Población 1995-2005" del DANE. La población base es tomada de las "Proyecciones de población 1995-2005" del DANE, en las cuales se estima para Cartagena en el año 2000, la cifra de 829.476 habitantes para su cabecera (74.5%) y 72.529 habitantes (8.255%) en sus corregimientos, para un total de 902.005 habitantes.

<sup>33</sup> de acuerdo con la metodología emitida por el ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, las proyecciones deben realizarse a 15 años.

disminuyendo con el transcurso de los años, lo que indica una migración de la población ubicada en la zona rural hacia zonas urbanas ubicadas en la periferia de la ciudad, casos como la población perteneciente a barrios como San José de los Campanos, Pozón, Pasacaballos y otros barrios son muestra de esta tendencia migratoria hacia la ciudad.

Según datos suministrados por el DANE, referente a la población, la ciudad debe contar con un poco más de un millón de habitantes, asentado más de un 90% en el área urbana. Por otra parte, la cantidad de residuos sólidos generados no se conoce con certeza, las entidades involucradas en la Gestión Integral de Residuos Sólidos (GIRS), estipulan cifras que van desde 600 hasta 850 toneladas diarias. El Consorcio LIME S.A. E.S.P., dentro de su zona, expresa un promedio de 7876,4 toneladas de RSU recolectados mensualmente<sup>34</sup>.

Dado que los nuevos operadores del servicio de aseo (Pasacaribe y URBASER) no cuentan con datos estadísticos referentes a la cantidad de residuos sólidos recolectados, se hace necesario utilizar las cifras provenientes de las antiguas empresas prestadoras del servicio de aseo urbano (Ciudad Limpia y LIME).

Con referencia a la estratificación socio económica de la población, para el año 1998 se tiene que la mayor parte de la población, aproximadamente un 80.9%, se encuentra ubicada entre los estratos 1, 2 y 3, con 177.561, 240.137 y 215.106 habitantes respectivamente, mientras que el resto de la población cartagenera, aproximadamente el 19.1%, es decir, 148.619 personas, se encuentran ubicadas entre los estratos 4, 5, y 6.

**Tabla 4: Estratificación Socio-Económica. Años 1998 y 2000**

		Estrato 1	Estrato 2	Estrato 3	Estrato 4	Estrato 5	Estrato 6	Total
<b>Año 1998</b>	Poblacion No.	177.561	240.137	215.106	56.319	52.408	39.892	782.205
	Porcentaje	22,70%	30,70%	27,50%	7,20%	6,70%	5,10%	100%
<b>Año 2000</b>	Poblacion No.	146.112	205.519	317.150	55.882	68.938	35.875	829.476
	Porcentaje	17,61%	24,78%	38,23%	6,74%	8,31%	4,33%	100%

Fuente: BRIGANTI, DIAZ Y VERGARA. Lineamientos para la separación en la fuente de los residuos Sólidos Producidos por el sector residencial (estratos 4, 5, 6) de la Ciudad de Cartagena, 2002. y Sección de Planeación en POT

Por otra parte, para el año 2000, la estratificación socio económica muestra un aumento de la población en el estrato 3, la cual aumenta en aproximadamente 102.044 habitantes, igualmente en el estrato 5 se presenta un aumento de 16.530 habitantes mientras que los estratos 4, y 6 presentan un leve descenso de participación en respecto a la población total, con 437 y 4.017 personas respectivamente, así mismo la población de los estratos 1 y 2 disminuye relativamente, con aproximadamente 31.449 y 34.618 habitantes respectivamente, indicando que el nivel de vida de la población de Cartagena no ha mejorado sustancialmente, dado que los

<sup>34</sup> Datos tomados del plan de manejo ambiental del consorcio LIME S.A. E.S.P. el cual reposa en el archivo de la corporación autónoma regional del canal del dique- CARDIQUE, Marzo de 2003

aumentos de población presentados en el estrato 3 pueden relacionarse con los descensos de habitantes estratificados en los estratos 1.2.4 y 6, pero estos hechos no pueden afirmarse dada la insuficiencia de los datos para presentar las causas de las variaciones de la estratificación socio-económica de la ciudad.

### **2.2.1. Producción de residuos sólidos**

Según datos proporcionados por el consorcio Ciudad Limpia y CARDIQUE en el año 2000, en la ciudad se produjo un total de 12.384 toneladas mensuales de residuos sólidos, cabe anotar que ese dato solo corresponde a la cantidad de residuos recogida por el consorcio ciudad limpia.

Por otra parte, el volumen de basuras en el distrito de Cartagena tiene un peso promedio diario de 812 ton/día, los cuales se discriminan así<sup>35</sup>:

- 312 toneladas diarias recoge Ciudad Limpia del caribe
- 500 toneladas diarias recoge LIME S.A.

Con respecto a la cifra total de residuos sólidos recogidos, Según información de Lime y Ciudad Limpia, en 2005 en Cartagena se recogieron 245.429 toneladas de residuos sólidos. Es decir, diariamente se recogen en promedio 681 toneladas de residuos sólidos en la ciudad.

#### **2.2.1.1. Composición gravimétrica de residuos sector residencial**

Para los estratos 1, 2 y 3, a través de la tabla 5, podemos observar de los residuos generados, se encuentran compuestos en gran parte por residuos de alimentos con aproximadamente 65% del total, así mismo los plásticos, residuos de podas y el papel y cartón comprenden un 14.12%, 4.65% y 2.57% respectivamente, y en menor medida encontramos residuos de vidrio, metales, madera, caucho y cuero, textiles, fibras vegetales y material sanitarios con un 13% aproximadamente. Esto muestra el gran contenido de material orgánico presente en los residuos sólidos generados por los habitantes comprendidos en los estratos 1, 2 y 3 de la ciudad, representado por la generación de residuos orgánicos, residuos de podas y fibras vegetales, los cuales pueden ser utilizados en procesos tales como el compostaje o la valorización energética si se cuentan con las herramientas y los equipos necesarios, previamente implementando una adecuación y mejoramiento de los sistemas de disposición final de los mismos.

---

<sup>35</sup> Decreto No. 0977 por medio del cual se adopta el Plan de Ordenamiento Territorial del Distrito Turístico y Cultural de Cartagena de Indias. 2002.

**Tabla 5: Composición Gravimétrica de los Residuos Sólidos Domiciliarios (Muestreo por cuarteo en el Relleno Sanitario Regional La Paz) 2002.**

Componentes de los residuos Sólidos	Porcentaje por Estrato.					
	Estrato 1	Estrato 2	Estrato 3	Estrato 4	Estrato 5	Estrato 6
Residuos de alimentos	71.17	69.59	57.95	67.94		51.52
Podas	4.13	4.32	5.82	2.96		11.32
Vidrio	0.42	0.85	1.16	1.99		1.49
Metales	0.47	0.56	0.82	1.38		2.52
Papel y Carton	4.19	0.51	0.58	5.06		12.69
Plastico	12.72	13.26	18.4	15.63		15.92
Madera	0.73	0.96	1.7	0.53		1.17
Caucho y Cuero	0.94	0.82	1.86	0.44		0.14
Textiles	2.62	2.53	2.8	1.52		1.29
Fibras Vegetales	0.89	0.57	0.25	1.02		0
Material Sanitario	1.73	1.42	3.48	1.52		1.94

Fuente: INGEAMBIENTE s.A. E.S.P. Ing Alvaro Pion Verbel

Con respecto a la composición gravimétrica de los RSU generados por los estratos 4, 5 y 6, se aprecia en la tabla 6, donde gran parte de los residuos sólidos generados correspondiente a más de un 60%, que corresponden a residuos orgánicos, entre los cuales encontramos residuos de alimentos y residuos de podas, posteriormente encontramos los residuos potencialmente reciclables, con aproximadamente 25% del total de residuos generados, cuya composición se caracteriza principalmente por materiales como plásticos de baja y alta densidad con un 10%, materiales como el papel y el cartón con un 9%, materiales como el vidrio con un 5%, metales férricos y no férricos con un 1.5% y residuos de huesos con un 0.02% aproximadamente.

En cuanto a los residuos aprovechables, estos comprenden aproximadamente un 2% del total de los residuos generados por los estratos 4, 5 y 6, principalmente compuestos por materiales como caucho y cuero con un 1%, y en menor medida por madera y residuos textiles con un 1%. Con respecto a residuos no aprovechables, tenemos que estos comprenden aproximadamente un 8.4% de la composición gravimétrica de los residuos, en su mayoría compuestos por material sanitario con un 7%, y en menor medida por compuestos cerámicos, residuos especiales como medicinas y pilas, y otros tipos de residuos con un 1.4%.

**Tabla 6: Composición Gravimétrica de los residuos Sólidos Domiciliarios (Muestreo en la fuente de generación)**

Componentes de los Residuos Sólidos		Porcentaje por estrato					
		Estrato 4		Estrato 5		Estrato 6	
<b>Residuos Organicos</b>		64.35		63.51		54.5	
Residuos Alimentos		33.21		36.3		35.6	
Podas		31.14		27.21		18.9	
<b>Residuos Potencialmente reciclables</b>		24.43		25.19		33.5	
Vidrio		4.07		5.1		8	
Metales	Ferreo	1.2	0.86	1.6	1.1	1.7	1.3
	No Ferreo		0.34		0.5		0.4
Papel		5.11		4.8		5.7	
Carton		3.31		3.6		7.5	
Huesos		0.03		0.1		0	
Plasticos	Alta Densidad	10.71	2.51	9.99	2.6	10.6	3.5
	Baja Densidad		8.2		7.39		7.1
<b>Residuos Aprovechables</b>		2.15		2.23		2	
Madera		0.75		0.9		1	
Caucho y Cuero		0.27		1.2		1	
Textiles		1.13		0.13		0	
<b>Residuos no Aprovechables</b>		8.42		8.3		9	
Productos ceramicos		0.64		0.7		1.2	
Material Sanitario		7.61		7.5		7.7	
Especiales (medicinas, pilas)		0.17		0.1		0.1	
Otros		0.66		0.1		0.9	

Fuente: BRIGANTI, DIAZ Y VERGARA. Lineamientos para la separacion en la fuente de los residuos Sólidos Producidos por el sector residencial(estratos 4,5,6) de la Ciudad de Cartagena, 2002.

### 2.2.1.2. Composición gravimétrica de residuos sector centros comerciales y colmenas de bazarito.

Con base en la tabla 7, en el sector comercial, con relación a los centros comerciales, encontramos con respecto a la composición gravimétrica, el porcentaje de composición con mayor participación de estos residuos corresponde a cartón, con un 69.81%, seguido en menor medida por residuos como alimentos con un 7.96%, plásticos 7.25%, Residuos orgánicos 6.02%, vidrio 5.67% y otros residuos que corresponden aproximadamente a un 3% de la composición total de los residuos.

A diferencia de los centros comerciales, en las colmenas de bazarito se aprecia una composición gravimétrica correspondiente en gran parte a residuos de cartón y residuos de alimentos, con un 45.91% y 40.19% respectivamente, en menor medida encontramos residuos orgánicos con un 9.97% y en menor medida otros residuos con un 0.03% del total de residuos.

**Tabla 7: Composición Gravimétrica de los Residuos Sólidos Producidos por el Sector Comercial**

Establecimiento	Porcentaje por Componente	
	Centros Comerciales	Colmenas de Bazurto
Carton	69.81	45.91
Vidrio	5.67	0.08
Alimentos	7.96	40.19
Plastico	7.25	3.76
Papel	2.87	0.08
Metales	0.34	0.00
Fibra	0.05	0.01
Organicos	6.02	9.97
Textiles	0.02	0.00

Fuente: Estudio e Identificación de residuos Sólidos Urbanos y Plan de reciclaje en la Ciudad de Cartagena. CARDIQUE-INGEAMBIENTE. Diciembre 1998

Con relación al sector comercial, a través de la tabla 8 podemos observar que gran parte de la composición de los residuos se encuentra relacionada con residuos de tierra, con un 40.9%, seguido por los residuos de alimentos con 20.5%, y por residuos de vidrio con 14%, posteriormente se encuentran restos de residuos plásticos, cartón y papel con 7.7%, 4.1% y 4.0% respectivamente, y en menor medida encontramos residuos de metales, madera, caucho, cuero, textiles e icopor que comprenden el resto de la composición gravimétrica de los residuos con un 8.8% de los residuos generados por el sector comercial.

**Tabla 8: Composición Gravimétrica de los Residuos Sólidos Producidos por el Sector Comercial**

Componentes	Porcentaje
Carton	4.10
Vidrio	14.00
Alimentos	20.50
Plastico	7.70
Papel	4.00
Metales	1.90
Madera	1.98
Caucho	0.10
Textiles	0.55
Icopor	0.20
Tierra	40.90

Fuente: Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos en la ciudad de Cartagena. Fundación Social. Noviembre de 1998

En cuanto a la producción de residuos orgánicos y residuos potencialmente reciclables, se evidencia una gran oportunidad para la producción de biogás por medio de la digestión anaerobia y posteriormente producción de compost a través de la fermentación aerobia de los residuos orgánicos; en relación a la producción de

residuos potencialmente reciclables se aprecia un gran valor que podría generar para las empresas del sector en cuanto al aprovechamiento de estos residuos, a través del reciclaje para su posterior reintroducción en los procesos de producción y comercialización al mercado de bienes de consumo, reincorporándolos al ciclo productivo.

### **2.2.1.3. Composición gravimétrica de residuos sector hotelero**

Para determinar la composición gravimétrica de los residuos correspondientes al sector hotelero de la ciudad, han sido dispuestos los datos de dos estudios, correspondientes a los realizados por Ingeambiente y Fundación Social (ambos realizados en el año 1998), su diferencia en los criterios de análisis varia en la metodología de muestreo empleada en cada estudio lo cual evidencia las grandes diferencias encontradas en los datos de ambos estudios. Mientras el primero solo toma 14 de los principales hoteles, grande y medianos, el segundo define los generadores del sector hotelero y de servicios turísticos que operan en la zona de Bocagrande, incluyendo las playas como una de las principales fuentes de generación.

Del estudio realizado por Fundación Social, se pueden extraer apartes importantes como<sup>36</sup>:

- a. El 89% de los generadores turísticos producen entre 1 y 20 m<sup>3</sup> al mes; en este grupo se ubican los restaurantes y pequeños almacenes.
- b. Los Grandes Hoteles de 4 y 5 estrellas y algunos apartahoteles, hacen parte del 6% de los generadores que producen más de 60m<sup>3</sup> mensuales de residuos.

Con respecto a la composición de los residuos, se observa las diferencias de los datos obtenidos a través de ambos estudios, aun así, se pueden extraer datos como la composición de residuos de alimentos, el cual sigue siendo un componente abundante dentro del total de residuos generados, así mismo los residuos de plástico, cartón, vidrio y papel comprenden un porcentaje amplio dentro de la composición de los residuos sólidos generados, estos datos pueden apreciarse en la tabla 9.

---

<sup>36</sup> Fundación Social. Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos en la Ciudad de Cartagena. Noviembre de 1998

**Tabla 9: Composición Gravimétrica de los Residuos Sólidos Generados por el Sector Turístico. 1998.**

Componentes	Porcentaje de Residuos	
	INGEAMBIENTE	Fundacion Social
<b>Carton</b>	14.84	8.90
<b>Vidrio</b>	12.88	17.00
<b>Alimentos</b>	39.98	25.60
<b>Plastico</b>	7.46	30.00
<b>Papel</b>	9.38	4.80
<b>Metal</b>	1.39	4.60
<b>Fibra</b>	0.92	0.00
<b>Organicos</b>	13.13	8.20
<b>Textiles</b>	0.02	0.50
<b>Icopor</b>	0.00	0.10

Fuente: Estudio e Identificación de residuos Sólidos Urbanos y Plan de reciclaje en la Ciudad de Cartagena. CARDIQUE-INGEAMBIENTE, Dic 1998 y estudio de caracterización de Residuos Sólidos en la Ciudad de Cartagena. Fundación Social. Noviembre de 1998

En la tabla 10, se presenta en resumen los datos correspondientes a la caracterización de residuos sólidos generados por los centros comerciales, hoteles y colmenas del mercado de bazurto, donde se puede apreciar las diferencias en cuanto a la composición de los residuos generados por los distintos agentes involucrados del sector comercial de la ciudad.

**Tabla 10: Caracterización de los Residuos Reciclables en el Sector Comercial. 1998(kilos/mes)<sup>37</sup>**

Material Reciclable	Centros Comerciales		Hoteles		Colmenas (Bazurto)		Total	
	Cantidad	Porcentaje	Cantidad	Porcentaje	Cantidad	Porcentaje	Cantidad	Porcentaje
Carton	34.222	69,81%	5.790	14,84%	22.275	45,91%	62.287	45,61%
Vidrio	2.781	5,67%	5.025	12,88%	38	0,08%	7.844	5,74%
Residuo de Alimento	3.900	7,96%	15.600	39,98%	19.500	40,19%	39.000	28,56%
Plastico	3.556	7,25%	2.910	7,46%	1.825	3,76%	8.291	6,07%
Papel	1.407	2,87%	3.660	9,38%	39	0,08%	5.106	3,74%
Metales	169	0,34%	543	1,39%	0	0,00%	712	0,52%
Fibra	25	0,05%	360	0,92%	7	0,01%	392	0,29%
R.Organicos	2.952	6,02%	5.122	13,13%	4.837	9,97%	12.911	9,45%

Fuente: los autores

#### 2.2.1.4. Residuos depositados en el relleno sanitario de henequén.

El relleno sanitario de henequén estuvo en funcionamiento desde el año 1969, año en el cual comenzó a depositarse todos los residuos sólidos generados en la ciudad de Cartagena, sin ningún tipo de control técnico por parte de las autoridades de Cartagena, provocando toda serie de impactos negativos en su entorno a nivel biofísico, socio-cultural, económico e institucional, hasta el año 1994, donde por una acción de

<sup>37</sup> CARDIQUE-INGEAMBIENTE. Estudio e Identificación de Residuos Sólidos Urbanos y Plan de Reciclaje en la Ciudad de Cartagena. Diciembre 1998.

tutela se ordena el cese de toda operación dentro del botadero de henequén. Es en ese mismo año, donde nuevamente entra en funcionamiento operado con el consorcio LIME S.A. con el apoyo de la empresa CICON S.A., pero debido a problemas para la obtención de la licencia ambiental para su operación y funcionamiento, además de presentar problemas con el manejo de lixiviados y la recirculación de los mismos, la compactación de los residuos, erosión de los taludes, y toda una serie de problemas de contaminación que conllevarían a su cierre en septiembre de 2001, debido al agotamiento de su vida útil, pero es solo hasta el año 2002 cuando se cesa toda actividad de disposición de residuos.

Durante el periodo comprendido entre los años 1994-2002, se depositaron un total de 2.191.715 toneladas de residuos sólidos. Los datos sobre disposición de residuos se presentan en la tabla 11.

**Tabla 11: Residuos Sólidos Dispuestos en el Relleno Sanitario de Henequén desde 1994**

Año	Residuos Ton/Año <sup>1</sup>	Total
1994	199,858	199,858
1995	230,571	430,429
1996	258,468	688,897
1997	253,252	942,149
1998	244,380	1,186,529
1999	248,019	1,434,548
2000	254,973	1,689,521
2001	258,670	1,948,191
2002	243,524	2,191,715

<sup>1</sup> valor estimado para 2002, solo dispusieron 4 mese

Fuente: LIME 2002 en informe de empresas varias de medellin

A través de la tabla 12, podemos ilustrar de una forma general la caracterización de los residuos generados en la ciudad correspondientes a cada uno de los estratos socio-económicos de la ciudad, el sector comercial, turístico y mercado de bazarro, identificando los respectivos porcentajes de participación de las respectivas caracterizaciones de residuos sólidos.

Tabla 12: Tipo de Residuo (de acuerdo con la fuente de generación)<sup>38</sup>

Fuente de Generacion	Factibilidad de Manejo, Disposicion y Grado de Peligrosidad	Naturaleza de los Residuos Solidos	Procedencia						
			Estratos (Proporcion en %)						
			1	2	3	4	5	6	
Domiciliarios	Ordinarios (Estrato 1,2,3: Ingeambiente, 2002)(Estrato 4,5,6: Briganti, Diaz y Vergara, 2002)	Organicos	75,3	73,9	63,8	63,3	63,5	54,5	
		Alimentos	71,2	69,6	58	32,2	36,3	35,6	
		Podas	4,1	4,3	5,8	31,1	27,2	18,9	
		Potencialmente reciclables	17,8	15,3	21	24,4	25	33,6	
		Vidrio	0,4	0,9	1,2	4,1	5,1	8,1	
		Metal	0,5	0,6	0,8	1,2	1,6	1,7	
		Papel y Carton	4,2	0,5	0,6	8,4	8,4	13,2	
		Plasticos	12,7	13,3	18,4	10,7	9,9	10,6	
		Aprovechables	4,2	4,3	6,4	2,2	2,2	2	
		Madera	0,7	1	1,7	0,8	0,9	1	
		Caucho y Cuero	0,9	0,8	1,9	0,3	1,2	1	
		Textiles	2,6	2,5	2,8	1,1	0,1	0	
		No Aprovechables	1,7	1,4	3,5	7,8	7,6	7,8	
		Peligrosos	Sanitarios	1,7	1,4	3,5	7,6	7,5	7,7
	Especiales		0	0	0	0,2	0,1	0,1	
				Centros comerciales		Colmenas de Bazurto		Hoteles	
	Comercial (Ingeambiente, CARDIQUE, 1998)	Ordinarios (kg/mes)	Organicos	6.852		24.337		20.722	
Alimentos			3.900		19.500		15.600		
Potencialmente reciclables			42.135		24.177		9.928		
Vidrio			2.781		38		5.025		
Metal			169		0		543		
Papel Carton			35.629		22.314		1.450		
Plasticos			3.556		1.825		2.910		
Aprovechables			10		0		0		
Textiles			10		0		0		
Especiales		Organicos	0		0		0		
Peligrosos			0		0		0		

Fuente: BRIGANTI, DIAZ Y VERGARA. Lineamientos para la separación en la fuente de los Residuos Sólidos Producidos por el sector residencial (estratos 4,5,6) de la Ciudad de Cartagena, 2002, Estudio e Identificación de residuos Sólidos Urbanos y Plan de reciclaje en la Ciudad de Cartagena. CARDIQUE-INGEAMBIENTE. Diciembre 1998

<sup>38</sup> Alcaldía de Cartagena. Programa de las Naciones Unidas Para el Desarrollo PNUD COL 00/005. PLAN DE GESTION INTEGRAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS DEL DISTRITO DE CARTAGENA. Cartagena de indias, Enero 2004.

### **2.2.1.5. Composición gravimétrica de residuos sector industrial y empresarial**

La actividad empresarial en Cartagena genera grandes cantidades de Residuos Sólidos Industriales (RSI), según los datos obtenidos presentados en la tabla 13, con respecto a los materiales reciclables generados por el sector industrial y empresarial de Cartagena, presentan gran importancia la producción de residuos tales como el cartón, y la chatarra, en materia de cifras se presenta una producción de 441.150kg/mes y 155.884kg/mes para el sector de las industrias, 372kg/mes y 1.147kg/mes para las microempresas, y 2.006kg/mes y 7.585kg/mes para las medianas y pequeñas empresas. Esta producción en materia de cartón y chatarra representan un gran total de 443.528kg/mes y 164.616kg/mes con un porcentaje global del 44.88% y 16.66% respectivamente en relación al total de residuos sólidos producidos. Posteriormente detallamos la producción de residuos compuestos por residuos de jardín, papel, polímeros de baja densidad (PBD), residuos de madera, plásticos, vidrio, fibra de papel y aluminio con una producción aproximada entre los 72.000kg/mes y los 20.000kg/mes con unos porcentajes de participación que oscilan entre un 7.0% y un 2% del total de la producción de residuos sólidos. Así mismo en menor porcentaje encontramos residuos de aceites usados, polipropileno y otras clases de residuos con un porcentaje inferior al 1%.

De manera global, con relación a la producción de residuos sólidos en el sector industrial y comercial, se producen un total de 988.187kg/mes de residuos sólidos, de los cuales las industrias producen 954.513kg/mes correspondientes a un 96.59% del total, las microempresas 9.296kg/mes correspondientes a un 0.94% del total y las pequeñas y medianas empresas producen 24.378kg/mes correspondientes a un 2.47%.

En general, el gran porcentaje de residuos producidos por el sector comercial e industrial de Cartagena, contienen materiales que podrían ser reutilizados en distintos procesos de fabricación de nuevos equipos, herramientas y empaques; e incluso, en su reincorporación al ciclo productivo.

**Tabla 13: Materiales Reciclables Generados por el sector Industrial y Empresarial.**

Material Reciclable	Sector industrial y Empresarial (kilos/mes)							
	Industrias	Porcentaje	Microempresas	Porcentaje	Mediana y Pequeña	Porcentaje	Total	Porcentaje
Vidrio	21.702	2,27%	272	2,93%	1.096	4,50%	23.070	2,33%
Residuo Textil	3.815	0,40%	0	0,00%	10	0,04%	3.825	0,39%
Residuo de Jardin	71.148	7,45%	0	0,00%	50	0,21%	71.198	7,20%
Residuo de Alimento	470	0,05%	0	0,00%	243	1,00%	713	0,07%
P.V.C.	500	0,05%	0	0,00%	45	0,18%	545	0,06%
P.P.	21.181	2,22%	1.000	10,76%	17	0,07%	22.198	2,25%
P.B.D.	38.391	4,02%	1.500	16,14%	701	2,88%	40.592	4,11%
P.E.T.	3.703	0,39%	0	0,00%	650	2,67%	4.353	0,44%
P.S.	1.007	0,11%	0	0,00%	46	0,19%	1.053	0,11%
Pasta Industrial	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
Papel	41.146	4,31%	372	4,00%	1.120	4,59%	42.638	4,31%
P.A.D.	3.610	0,38%	0	0,00%	1.049	4,30%	4.659	0,47%
Madera	39.170	4,10%	500	5,38%	3.080	12,63%	42.750	4,33%
Lata de Hierro	1	0,00%	2	0,02%	397	1,63%	400	0,04%
Icopor	502	0,05%	0	0,00%	15	0,06%	517	0,05%
Lata de Vidrio	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
Hierro Carbon	0	0,00%	385	4,14%	0	0,00%	385	0,04%
Otros	7.060	0,74%	0	0,00%	240	0,98%	7.300	0,74%
Fibra de Papel	14.473	1,52%	4	0,04%	1.655	6,79%	16.132	1,63%
Correas	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
Chatarra	155.884	16,33%	1.147	12,34%	7.585	31,11%	164.616	16,66%
Caucho	120	0,01%	0	0,00%	3.004	12,32%	3.124	0,32%
Plastico	31.766	3,33%	500	5,38%	0	0,00%	32.266	3,27%
Carton	441.150	46,22%	372	4,00%	2.006	8,23%	443.528	44,88%
Bronce	801	0,08%	875	9,41%	20	0,08%	1.696	0,17%
Baterias y Pilas	24	0,00%	10	0,11%	50	0,21%	84	0,01%
Aserrin	0	0,00%	400	4,30%	5	0,02%	405	0,04%
Asbesto	10	0,00%	0	0,00%	0	0,00%	10	0,00%
Aluminio	27.455	2,88%	1.297	13,95%	495	2,03%	29.247	2,96%
Aceite Usado	28.221	2,96%	0	0,00%	594	2,44%	28.815	2,92%
Botella	1.203	0,13%	100	1,08%	195	0,80%	1.498	0,15%
Cobre	0	0,00%	560	6,02%	10	0,04%	570	0,06%
<b>Total (kilos/mes)</b>	<b>954.513</b>	<b>100,00%</b>	<b>9.296</b>	<b>100,00%</b>	<b>24.378</b>	<b>100,00%</b>	<b>988.187</b>	<b>100,00%</b>
<b>Porcentaje</b>	<b>96,59%</b>		<b>0,94%</b>		<b>2,47%</b>			

Fuente: CARDIQUE-INGEAMBIENTE. Estudio e Identificación de Residuos Sólidos Urbanos y Plan de Reciclaje en la Ciudad de Cartagena. Diciembre 1998,

## 2.3. IDENTIFICACION DE CANTIDADES ÓPTIMAS DE TRATAMIENTO

La cantidad de residuos generados en la ciudad puede obtenerse mediante estadísticas detalladas, o indirectamente mediante el producto entre la población y la generación de residuos per capita<sup>39</sup>. Así mismo, las Directrices del IPCC<sup>40</sup> sugieren realizar el cálculo en países en vías de desarrollo sobre la base de la población urbana, considerando que las zonas rurales no cuentan con sistemas de recolección y disposición de residuos. Para efectos de los cálculos, se toman los datos del año 1998, de los cuales se tiene una mayor referencia en relación al año 2000.

### 2.3.1. Generación de residuos per capita.

Para la generación de residuos per cápita se consultaron los estudios de la Superintendencia de Servicios Públicos<sup>41</sup>, Organización Panamericana de la Salud<sup>42</sup>, ASEAS<sup>43</sup> y Ministerio de Salud<sup>44</sup>. Los resultados que presenta cada estudio son muy diferentes y con distintos niveles de desagregación como consecuencia de las diferencias de criterios técnicos, unidades de información, tamaño de población y métodos de estimación.

La validación de esta información, mostró como los mas consistentes los resultados de la Superintendencia de Servicios Públicos y ASEAS, de allí se dedujo que la producción per capita de las grandes ciudades esta entre 0,67 y 0,70 kg./hab/día y entre 0,35 y 0,57 kg./hab/día para los demás centros urbanos.

Por otra parte, según estudios efectuados por la Superintendencia de Servicios Públicos en el año 2002, en Colombia, para una producción per cápita entre 0.6 y 0.66 kg/hab/día<sup>45</sup>, se tiene una producción total de 27.150 t/día, de igual manera si se tiene en cuenta que la población en Cartagena para el año 2005 estaba proyectada en 1'030.149 habitantes, se tiene que en promedio se producen en total 0.66 kg de residuos por persona. Por consiguiente, para efectos de nuestro análisis, tomaremos como tasa de producción de residuos per capita la cifra de 0.66 kg/hab.

Igualmente, se ha estimado que el 85 % de los residuos sólidos se generan en los hogares, y el 15% restante lo produce el comercio, la industria, las instituciones, las plazas de mercado y las vías públicas.

---

<sup>39</sup> IDEAM. Inventario Nacional de Fuentes y Sumideros de Gases de Efecto Invernadero. Módulo Residuos. Marzo de 1990.

<sup>40</sup> Ibid.

<sup>41</sup> Superintendencia de Servicios Públicos, 1997: Las empresas de Acueducto, Alcantarillado y Aseo Según sus Principales Cifras Técnicas. En revista Supercifras en Mts<sup>3</sup> No 1, Pág. 14-22

<sup>42</sup> Organización Panamericana de la Salud - Organización Mundial de la Salud, 1996. Análisis Sectorial De Residuos Sólidos en Colombia. Series Análisis Sectoriales, No 8.

<sup>43</sup> Ministerio de salud. ASEAS-OPS/OMS, 1992: Diagnostico del servicio de Aseo Publico en Colombia

<sup>44</sup> Ministerio de Salud. Programa Nacional de Aseo Urbano (PRONASU). Julio 1976

<sup>45</sup> Superintendencia de Servicios Públicos. Supercifras: Acueducto, Alcantarillado y Aseo 1998-2001. Revista #6 2002

**Tabla 14: Producción de Residuos en relación al Estrato Socio-Económico.**

Año	Item	Estrato 1	Estrato 2	Estrato 3	Estrato 4	Estrato 5	Estrato 6	Total
1998	Poblacion No.	177.561	240.137	215.106	56.319	52.408	39.892	782.205
	Porcentaje	22,70%	30,70%	27,50%	7,20%	6,70%	5,10%	100%
	Prod. Per Capita	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	
	Prod. Total	42.774.332,9	57.848.987,6	51.819.125,7	13.567.189,3	12.625.023,4	9.610.092,4	188.244.751,3
2000	Poblacion No.	146.112	205.519	317.150	55.882	68.938	35.875	829.476
	Porcentaje	17,61%	24,78%	38,23%	6,74%	8,31%	4,33%	100%
	Prod. Per Capita	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	
	Prod. Total	35.198.380,8	49.509.527,1	76.401.435,0	13.461.973,8	16.607.164,2	8.642.287,5	199.820.768,4

Fuente: los Autores

Por medio de la tabla 14, se presentan para el año 1998 y 2000 los datos sobre producción de residuos sólidos en relación al estrato socio-económico con base en la producción per capita establecida, conociendo de antemano el porcentaje representativo de cada estrato dentro de la población total, es así como se obtiene los distintos valores dentro de los cuales cabe resaltar el porcentaje representativo de los estratos 1, 2 y 3 dentro del total, con un porcentaje aproximado de 80.9% para 1998 y un 80.62% para el año 2000.

**Tabla 15: Proyección de Producción de Residuos en Relación a la Población Total del Distrito de Cartagena. Periodo: 1998:2018**

Años	Total		Generacion residuos per Capita	Produccion Total de Residuos (kg/año)
	Pob. Urbana	%		
1998	782.205	91,80	0,66	188.433.184,50
1999	805.757	91,90	0,66	194.106.861,30
2000	829.476	92,00	0,66	199.820.768,40
2001	853.556	92,10	0,66	205.621.640,40
2002	877.980	92,20	0,66	211.505.382,00
2003	902.688	92,30	0,66	217.457.539,20
2004	927.657	92,40	0,66	223.472.571,30
2005	952.855	92,50	0,66	229.542.769,50
2006	978.309	92,60	0,66	235.674.638,10
2007	1.004.015	92,70	0,66	241.867.213,50
2008	1.029.994	92,80	0,66	248.125.554,60
2009	1.056.231	92,90	0,66	254.446.047,90
2010	1.082.712	93,00	0,66	260.825.320,80
2011	1.106.109	93,10	0,66	266.461.658,10
2012	1.131.438	93,20	0,66	272.563.414,20
2013	1.156.767	93,30	0,66	278.665.170,30
2014	1.182.096	93,40	0,66	284.766.926,40
2015	1.207.425	93,50	0,66	290.868.682,50
2016	1.232.754	93,60	0,66	296.970.438,60
2017	1.258.083	93,70	0,66	303.072.194,70
2018	1.283.412	93,80	0,66	309.173.950,80

Fuente: los autores.

En la tabla 15, observamos la proyección de la producción de residuos sólidos en relación a la población urbana proyectada según datos obtenidos de proyecciones realizadas por el DANE, Cálculos del POT y del PGIRS.

Es preciso aclarar que estos cálculos consideran la población urbana como población representativa, según las directrices del IPCC<sup>46</sup> sobre la producción de residuos sólidos en países en vías de desarrollo.

A través del análisis de los datos obtenidos de la tabla 12 donde consideramos como constantes los porcentajes por estrato, los datos sobre producción de residuos sólidos en relación al estrato socio-económico en el año 1998 extraído de la tabla 14, y la producción de residuos sólidos proyectada para el año 2000 obtenida en la tabla 15, obtenemos el porcentaje representativo total de la producción de residuos sólidos por tipo de residuo generado y la cantidad de residuos sólidos expresada en Kilos/Año por el sector residencial en la ciudad de Cartagena en el año 2000.

**Tabla 16: Residuos Generados y Porcentaje Representativo Sector Residencial (Kg/año) Año 1998.**

	Total Prod.	% Total
<b>Organicos</b>	135.613.062,2	70,59%
Alimentos	117.272.520,8	61,04%
Podas	18.340.541,4	9,55%
<b>Potencialmente Recic</b>	40.224.892,0	20,94%
Vidrio	3.602.128,1	1,87%
Metal	1.658.437,7	0,86%
Papel y Carton	5.850.877,8	3,05%
Plasticos	29.113.448,4	15,15%
<b>Aprovechables</b>	9.331.300,3	4,86%
Madera	2.383.891,5	1,24%
Caucho y Cuero	2.490.583,7	1,30%
Textiles	4.456.825,1	2,32%
<b>No Aprovechables</b>	6.951.832,9	3,62%
Sanitarios	6.899.659,5	3,59%
Especiales	52.173,4	0,03%

Fuente: los autores.

Podemos observar que el 70,59% de los residuos generados por el sector residencial corresponde a residuos orgánicos, 20,94% a materiales potencialmente reciclable, el 4,86% son residuos aprovechables y el restante 3,62% corresponden a residuos no aprovechables.

De otra parte, en la tabla 17, encontramos los valores correspondientes a los sectores comerciales, hoteleros y colmenas de bazarro, correspondientes al año 1998.

<sup>46</sup> IPCC: El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático se forma en 1988, por iniciativa de la Organización Meteorológica Mundial (WMO) y el Programa de Medio Ambiente de las Naciones Unidas (UNEP), a fin de contribuir a la solución de los problemas que podría generar el calentamiento global. El IPCC, conformado por más de 2000 científicos, proveen información respecto al estado del conocimiento en torno al Cambio Climático, así como reportes e informes técnicos en temas específicos necesarios para el correcto funcionamiento de los organismos del Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático.

**Tabla 17: Caracterización de los Residuos Reciclables en el Sector Comercial Año 1998 (kilos/mes)**

Material Reciclable	Centros Comerciales		Hoteles		Colmenas (Bazurto)		Total	
	Cantidad	Porcentaje	Cantidad	Porcentaje	Cantidad	Porcentaje	Cantidad	Porcentaje
Carton	34.222	69,81%	5.790	14,84%	22.275	45,91%	62.287	45,61%
Vidrio	2.781	5,67%	5.025	12,88%	38	0,08%	7.844	5,74%
Residuo de Alimento	3.900	7,96%	15.600	39,98%	19.500	40,19%	39.000	28,56%
Plastico	3.556	7,25%	2.910	7,46%	1.825	3,76%	8.291	6,07%
Papel	1.407	2,87%	3.660	9,38%	39	0,08%	5.106	3,74%
Metales	169	0,34%	543	1,39%	0	0,00%	712	0,52%
Fibra	25	0,05%	360	0,92%	7	0,01%	392	0,29%
R.Organicos	2.952	6,02%	5.122	13,13%	4.837	9,97%	12.911	9,45%
Residuo Textil	10	0,02%	6	0,02%	0	0,00%	16	0,01%
<b>Total</b>	<b>49.022</b>	<b>100,00%</b>	<b>39.016</b>	<b>100,00%</b>	<b>48.521</b>	<b>100,00%</b>	<b>136.559</b>	<b>100,00%</b>

Fuente: CARDIQUE-INGEAMBIENTE. Estudio e Identificación de Residuos Sólidos Urbanos y Plan de Reciclaje en la Ciudad de Cartagena. Diciembre 1998.

Con base en los datos anteriores, podemos afirmar que El 38.01% corresponde a residuos orgánicos de los cuales 28.56% corresponden a residuos de alimentos y 9.45% corresponden a residuos orgánicos. El 61.68% corresponden a residuos potencialmente reciclables compuestos por cartón con un 45.61%, vidrio con un 5.74%, plásticos con un 6.07%, papel con un 3.74% y metales con un 0.52%, mientras que un 0.30% corresponden a residuos aprovechables compuestos por residuos de fibra y residuos textiles.

**Tabla 18: Caracterización de los Residuos Generados en la Ciudad de Cartagena (kilos/mes 1998).**

Material	S. Residencial	C.Comerciales	Hoteles	C. Bazurto	S. Com. e Ind	Total	%
<b>Organicos</b>	<b>11,073,071.81</b>	<b>6,852.00</b>	<b>20,722.00</b>	<b>24,337.00</b>	<b>71,911.00</b>	<b>11,196,893.81</b>	66.60%
Alimentos	9,575,530.73	3,900.00	15,600.00	19,500.00	713.00	9,615,243.73	57.19%
Podas	1,497,541.08	2,952.00	5,122.00	4,837.00	71,198.00	1,581,650.08	9.41%
<b>Potencialmente Rec</b>	<b>3,284,441.12</b>	<b>42,135.00</b>	<b>17,928.00</b>	<b>24,177.00</b>	<b>829,446.00</b>	<b>4,198,127.12</b>	24.97%
Vidrio	294,120.80	2,781.00	5,025.00	38.00	24,568.00	326,532.80	1.94%
Metal	135,414.69	169.00	543.00	0.00	196,914.00	333,040.69	1.98%
Papel y Carton	477,735.62	35,629.00	9,450.00	22,314.00	502,298.00	1,047,426.62	6.23%
Plasticos	2,377,170.02	3,556.00	2,910.00	1,825.00	105,666.00	2,491,127.02	14.82%
<b>Aprovechables</b>	<b>761,918.92</b>	<b>35.00</b>	<b>366.00</b>	<b>7.00</b>	<b>50,631.00</b>	<b>812,957.92</b>	4.84%
Madera	194,649.40	0.00	0.00	0.00	43,165.00	237,814.40	1.41%
Caucho y Cuero	203,361.03	25.00	360.00	7.00	3,641.00	207,394.03	1.23%
Textiles	363,908.49	10.00	6.00	0.00	3,825.00	367,749.49	2.19%
<b>No Aprovechables</b>	<b>567,630.76</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>36,199.00</b>	<b>603,829.76</b>	3.59%
Sanitarios	563,370.70	0.00	0.00	0.00	0.00	563,370.70	3.35%
Especiales	4,260.06	0.00	0.00	0.00	36,199.00	40,459.06	0.24%

Fuente: los autores.

A partir de la tabla 18, observamos que gran parte de los RSU generados, el 66.54% corresponde a residuos orgánicos. Lo que representa el potencial de residuos que se emplearán en el proceso de biometanización para posteriormente, a partir de estos residuos, producir compost orgánico. Como material potencialmente utilizable en la elaboración del CDR encontramos los residuos potencialmente reciclables, de los cuales residuos como vidrio, metal, papel y cartón, podrían disponerse en procesos de reciclaje, mientras que en el caso de los plásticos, podrían utilizarse como materia prima para CDR, debido a su alto poder calorífico. Igualmente residuos provenientes del compostaje podrían ser utilizados en la elaboración de CDR.

**Tabla 19: Caracterización de Producción Mensual y Diaria de Residuos Sólidos (Año 1998).**

Material	Total/Mes	Total/Dia	%
<b>Organicos</b>	<b>11,196,893.81</b>	<b>373,229.79</b>	66.60%
Alimentos	9,615,243.73	320,508.12	57.19%
Podas	1,581,650.08	52,721.67	9.41%
<b>Potencialmente Recic</b>	<b>4,198,127.12</b>	<b>139,937.57</b>	24.97%
Vidrio	326,532.80	10,884.43	1.94%
Metal	333,040.69	11,101.36	1.98%
Papel y Carton	1,047,426.62	34,914.22	6.23%
Plasticos	2,491,127.02	83,037.57	14.82%
<b>Aprovechables</b>	<b>812,957.92</b>	<b>27,098.60</b>	4.84%
Madera	237,814.40	7,927.15	1.41%
Caucho y Cuero	207,394.03	6,913.13	1.23%
Textiles	367,749.49	12,258.32	2.19%
<b>No Aprovechables</b>	<b>603,829.76</b>	<b>20,127.66</b>	3.59%
Sanitarios	563,370.70	18,779.02	3.35%
Especiales	40,459.06	1,348.64	0.24%

Fuente: los autores.

Estos valores nos permiten estimar la capacidad de planta en los proceso de biometanización, compostaje, combustión, cogeneración y reciclaje de los residuos con base en la producción de residuos orgánicos, manteniendo una tasa de producción per capita de 0.66Kg/hab. Mensualmente se producen aproximadamente 16'811.808,61kg de residuos y 560.393,62kg de residuos diarios.

**Tabla 20: Proyección de Producción de Residuos en Relación a la Población Total del Distrito de Cartagena. Periodo: 1998:2018**

Años	Total		Generacion residuos per Capita	Produccion Total de Residuos (kg/año)	Produccion Total de Residuos (kg/dia)
	Pob. Urbana	%			
1998	782.205	91,80	0,66	188.433.184,50	516.255,30
1999	805.757	91,90	0,66	194.106.861,30	531.799,62
2000	829.476	92,00	0,66	199.820.768,40	547.454,16
2001	853.556	92,10	0,66	205.621.640,40	563.346,96
2002	877.980	92,20	0,66	211.505.382,00	579.466,80
2003	902.688	92,30	0,66	217.457.539,20	595.774,08
2004	927.657	92,40	0,66	223.472.571,30	612.253,62
2005	952.855	92,50	0,66	229.542.769,50	628.884,30
2006	978.309	92,60	0,66	235.674.638,10	645.683,94
2007	1.004.015	92,70	0,66	241.867.213,50	662.649,90
2008	1.029.994	92,80	0,66	248.125.554,60	679.796,04
2009	1.056.231	92,90	0,66	254.446.047,90	697.112,46
2010	1.082.712	93,00	0,66	260.825.320,80	714.589,92
2011	1.106.109	93,10	0,66	266.461.658,10	730.031,94
2012	1.131.438	93,20	0,66	272.563.414,20	746.749,08
2013	1.156.767	93,30	0,66	278.665.170,30	763.466,22
2014	1.182.096	93,40	0,66	284.766.926,40	780.183,36
2015	1.207.425	93,50	0,66	290.868.682,50	796.900,50
2016	1.232.754	93,60	0,66	296.970.438,60	813.617,64
2017	1.258.083	93,70	0,66	303.072.194,70	830.334,78
2018	1.283.412	93,80	0,66	309.173.950,80	847.051,92

Fuente: los autores.

Teniendo en cuenta la producción diaria de residuos (650 ton), la tasa actual de producción de residuos diarios per capita en la ciudad, la cual corresponde a 0.66kg/hab y según las proyecciones de la población, la planta debe tener una capacidad que permita recibir aproximadamente 850 toneladas de residuos diarios, con miras a tener capacidad suficiente para la recepción, tratamiento y posterior disposición de los residuos.

#### 2.4. POTENCIAL CALORIFICO DE LOS RESIDUOS.

Según la composición de los residuos sólidos y su poder calorífico inferior (PCI), podemos determinar el poder calorífico total para estimar la cantidad de calor total potencialmente almacenada por los RU. Desde el punto de vista del aprovechamiento energético, la biomasa contiene poco Carbono (C), mucho Oxígeno (O) y compuestos volátiles (los cuales aportan más del 60% del PCI). El PCI es del orden de 4000 Kcal/Kg. y está exenta de Azufre (S), lo que resulta ambientalmente favorable. El creciente desarrollo de la economía así mismo ha traído consigo un considerable aumento en la generación de estos residuos. En la década de los 60, la generación de residuos domiciliarios alcanzaba los 0,2 a 0,5 Kg/habitante/día; hoy en cambio, esta cifra se sitúa entre los 0,8 y 1,4 Kg/habitante/día<sup>47</sup>.

**Tabla 21: Poder calorífico inferior de los RSU**

Componente fracción	% en peso	PCI (Kcal/Kg)	Calor Total Kcal
Papel y Cartón	6.23	4.500	283
Plástico	14.82	9.800	1452
Madera	1.42	4.450	632
Textiles	2.19	5.400	118
Residuos de jardín	9.41	4.100	386
Residuos alimenticios	57.19	2.200	1257
Goma y Cuero	1.23	8.300	102
TOTAL		-	4230

Fuente: los autores.

Para propósitos del desarrollo de la planta, se valorizarán aquellos residuos que por sus características, no requieren de tratamiento especiales para su disposición final. En el caso de los residuos industriales, sanitarios, hospitalarios y especiales, desechos que requieren de un manejo especial, para los anteriores se desarrollarán procesos alternativos que permitan su correcta disposición.

<sup>47</sup> Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. <<http://www.ideam.gov.co>>

## 2.5. POTENCIAL DE GENERACIÓN DE BIOGAS

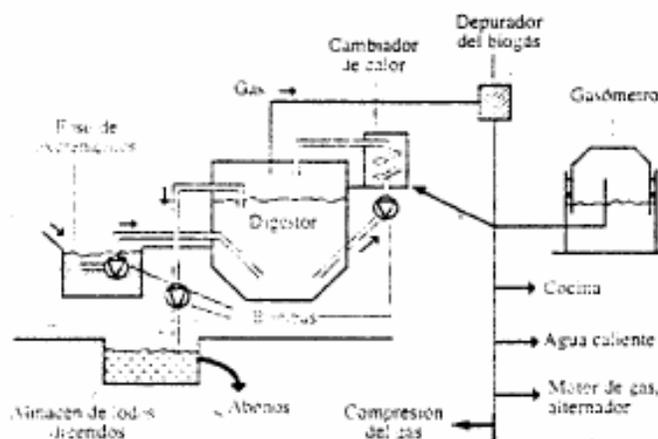
A nivel nacional, la emisión de metano ( $\text{CH}_4$ ) por concepto de la disposición de residuos sólidos y tratamiento de aguas residuales en 1990 fue del orden de 137,6 Kt, de las cuales 95,8% se generaron por la disposición de residuos sólidos en rellenos sanitarios, 1,6% por el tratamiento de las aguas residuales industriales, y 2,6% por el tratamiento de aguas residuales domesticas<sup>48</sup>, estos datos le confieren al metano un valor apreciable si se disponen de las herramientas y equipos necesarios para su captación, tratamiento y posterior utilización como combustible en la alimentación de equipos de combustión interna.

Mediante la Siguiete Relación:

$$1 \text{ T Residuo Orgánico} \longrightarrow 100 \text{ Nm}^3 \text{ Biogás} + 400 \text{ Kg. de Compost}^{49}.$$

Podemos obtener la cantidad de biogás generado a partir de la fracción orgánica de los residuos, cuyo poder calorífico tiene un valor medio de 4200 Kcal./m<sup>3</sup>. El poder calorífico del metano cae entre los 400 y 600 Btus (Unidades térmicas británicas) por pie cúbico estandarizado (scf), la cual es aproximadamente la mitad del poder calorífico del gas natural<sup>50</sup>. En la siguiente figura, presentamos a modo de esquema, el proceso de biometanización de la fracción degradable de los residuos sólidos.

**Grafica 2: Proceso de biometanización a partir de la fracción degradable de los residuos sólidos.**



Fuente: ELIAS, Xavier. Valorización Energética de Residuos. Aplicaciones.

<sup>48</sup> Ibid.

<sup>49</sup> ELIAS, Xavier. Valorización Energética de Residuos. Aplicaciones.

<sup>50</sup> UNDP/World Bank Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP). MANUAL PARA LA PREPARACION DE PROYECTOS DE GENERACION DE ENERGIA A PARTIR DEL GAS DE RELLENOS SANITARIOS EN AMERICA Y EL CARIBE. Abril 2004.

Fracción que, como se le ha extraído la parte más húmeda, aunque también es verdad que se le han retirado fracciones combustibles, ha aumentado su poder calorífico (alrededor de los 2300 kcal/kg). En consecuencia, no tiene mucho sentido que esta fracción residual sea vertida cuando puede ser aprovechada energéticamente, y consume, además, menos territorio.

### 2.5.1. Calculo de potencial de biogás.

Con base en los datos sobre producción de basuras, el contenido de biogás de desechos esta dado por:

**Tabla 22: Contenido de materia seca en desechos orgánicos.**

Materia Seca en Biodesechos (MS)	Contenido de Materia Orgánica Seca (MSO)	Tiempo de Retención dentro del Digestor (T)	Peso Especifico dentro del Digestor	Rata de Descomposición Esperada	Producción Especifica de Biogás
25%	75% de MS	20 días	Máx 4 kg MSO/m <sup>3</sup>	70%	900 lt/kg de MSO

Fuente: PINTO SIABATO, Flavio. Energías Renovables y Desarrollo Sostenible en Zonas Rurales de Colombia: El caso de la vereda Carrizal en Sutamarchán. Cuadernos de Desarrollo Rural. Colombia, 1994. p25

Entonces, la producción de biogás esta dada por<sup>51</sup>:

$$V_{biogas} = 0.25 * 0.75 * 0.7 * 900 * m_{desechoorganico} = 18 \text{ lt/kg} * m_{desechoorganico}$$

Para Colombia, los desechos se han caracterizado de la siguiente manera<sup>52</sup>: materia orgánica 74%, papel y cartón 12,7%, plástico 5%, chatarra 1%, vidrio 4%, hueso, trapo y madera 3,3%. Hay concordancia entre el valor de 0,75 de GBU de la tabla 22 y el de 0,74 para Colombia. El potencial de biogás calculado se presenta en la tabla 23, donde podemos observar para el año 2005 una producción estimada de 52'381.658 litros diarios de biogás generados por los 443.912,36kg diarios de residuos sólidos orgánicos. Para el año 2030 se obtendría una producción estimada de biogás de 88'772.823.08 litros diarios de biogás a partir de 752.312,06kg diarios de residuos sólidos orgánicos.

Cabe aclarar que la producción de biogás se incrementaría cada año, debido al aumento de la población, considerando como constante la producción de residuos per capita en 0.66 kg/hab y la composición gravimétrica de los residuos generados, igualmente se debe considerar la eficiencia del proceso de obtención de biogás.

<sup>51</sup> PINTO SIABATO, Flavio. Energías Renovables y Desarrollo Sostenible en Zonas Rurales de Colombia: El caso de la vereda Carrizal en Sutamarchán. Cuadernos de Desarrollo Rural. Colombia, 1994

<sup>52</sup> BOLÍVAR, L.; GÓMEZ, M.; GUÍO, A.; REYES, S., Diagnóstico, caracterización y formulación de la alternativa más conveniente para el manejo integral de residuos sólidos de los municipios de municipio 5, municipio 7, municipio 6, Sutamarchán, municipio 8, municipio 9, municipio 1 y Chiquiza. Tesis de ingeniería sanitaria y ambiental. Fundación Universitaria de Boyacá, 2001. EN: PINTO SIABATO, Flavio. Energías Renovables y Desarrollo Sostenible en Zonas Rurales de Colombia: El caso de la vereda Carrizal en Sutamarchán. Cuadernos de Desarrollo Rural. Colombia, 1994.

**Tabla 23: Generación Proyectada de Biogás a partir de R. Orgánicos (Año 2005-2030)**

Años	Produccion RSU (kg/día)	R. Organicos (kg)	Biogas (lt/Día)	Biogas (lt/Año)
2005	628,884.30	443,912.36	52,381,658.69	19,119,305,422.98
2006	645,683.94	455,770.77	53,780,951.07	19,630,047,141.53
2007	662,649.90	467,746.58	55,194,096.74	20,145,845,311.46
2008	679,796.04	479,849.58	56,622,250.15	20,667,121,303.70
2009	697,112.46	492,072.77	58,064,586.68	21,193,574,139.00
2010	714,589.92	504,409.63	59,520,336.72	21,724,922,903.40
2011	730,031.94	515,309.74	60,806,548.86	22,194,390,334.42
2012	746,749.08	527,109.91	62,198,969.57	22,702,623,892.58
2013	763,466.22	538,910.09	63,591,390.28	23,210,857,450.74
2014	780,183.36	550,710.26	64,983,810.98	23,719,091,008.89
2015	796,900.50	562,510.44	66,376,231.69	24,227,324,567.05
2016	813,617.64	574,310.61	67,768,652.40	24,735,558,125.21
2017	830,334.78	586,110.79	69,161,073.11	25,243,791,683.37
2018	847,051.92	597,910.96	70,553,493.81	25,752,025,241.53
2019	867,621.49	612,430.47	72,266,795.19	26,377,380,245.47
2020	885,742.68	625,221.72	73,776,163.02	26,928,299,501.46
2021	903,886.65	638,029.05	75,287,428.47	27,479,911,393.19
2022	922,039.30	650,842.52	76,799,417.66	28,031,787,445.80
2023	940,186.25	663,651.96	78,310,931.29	28,583,489,922.32
2024	958,312.80	676,447.00	79,820,746.12	29,134,572,333.33
2025	976,404.00	689,217.09	81,327,616.37	29,684,579,974.81
2026	994,444.64	701,951.49	82,830,275.32	30,233,050,493.53
2027	1,012,419.28	714,639.30	84,327,436.93	30,779,514,479.14
2028	1,030,312.27	727,269.47	85,817,797.49	31,323,496,082.03
2029	1,048,107.76	739,830.83	87,300,037.41	31,864,513,656.02
2030	1,065,789.75	752,312.06	88,772,823.08	32,402,080,424.87

Fuente: los autores.

El Biogás de buena calidad (aquel con alto contenido de metano y bajos niveles de oxígeno y nitrógeno) puede ser utilizado como combustible para desplazar el uso de combustibles fósiles convencionales o otros tipos de combustibles. Los usos para el biogás caen entre las siguientes categorías: generación eléctrica, uso directo como combustible para calentamiento/calderas, tratamiento para convertirlo a gas de alto Btus y otros usos tales como combustible para vehículos.

#### 2.5.1.1. Calculo de las emisiones de GEI a partir del potencial de biogás.

La densidad del biogás es 1,2 g/litro, (1.133 kg/m<sup>3</sup>). Considerando su composición por Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) y metano (CH<sub>4</sub>), y despreciando el 1% del resto de componentes, la ecuación de densidad establece<sup>53</sup>:

$$\rho_{\text{biogas}} = .2 \frac{gr}{lt} = \frac{n_{CH_4} + n_{CO_2}}{1lt} (1)$$

La masa molecular de CH<sub>4</sub> es de 12+4\*1=16 g/mol y la de CO<sub>2</sub> es 12+2\*16=44 g/mol. La masa del CO<sub>2</sub> es:

<sup>53</sup> REHLING 2001-Slides. *Slides for biogas*. MSc. Program on Sustainable Energy Systems and Management. Rehling Uwe. University of Flensburg. EN: PINTO SIABATO, Flavio. Energías Renovables y Desarrollo Sostenible en Zonas Rurales de Colombia: El caso de la vereda Carrizal en Sutamarchán. Cuadernos de Desarrollo Rural. Colombia, 1994.

$$m_{CO_2} = \frac{14}{16} m_{CH_4} = 0.75 m_{CH_4} \quad (2)$$

Ya que la proporción entre CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> es 3:7, reemplazando (2) en (1) y resolviendo la masa del CH<sub>4</sub>:

$$m_{CH_4} = \frac{1.2}{0.7 + 0.3 * 2.75} = 0.78688525 \text{gr}$$

Es decir, hay 0.78688525 gr de CH<sub>4</sub> por litro de biogás.

A partir de los datos anteriores, el equivalente de emisiones de CO<sub>2</sub> de metano se ha calculado considerando que el potencial de invernadero del metano es 21 veces mayor que el de CO<sub>2</sub>. Por lo tanto, las reducciones de emisiones de Gases de Efecto de Invernadero (GEI) serían 20/21 veces las emisiones totales sin el proyecto. En la tabla 24, obtenemos la emisión de Biogás, la emisión de metano y la reducción de emisiones de GEI:

**Tabla 24: Generación Proyectada de Metano y su equivalente en Carbono a partir de Residuos Orgánicos (Año 2005-2030)**

Años	R. Organicos (kg)	Biogas (lt/Día)	Biogas (lt/Año)	Metano (ton)	Equivalente en carbono
2005	443,912.36	52,381,658.69	19,119,305,422.98	15,044.70	315,938.69
2006	455,770.77	53,780,951.07	19,630,047,141.53	15,446.59	324,378.49
2007	467,746.58	55,194,096.74	20,145,845,311.46	15,852.47	332,901.84
2008	479,849.58	56,622,250.15	20,667,121,303.70	16,262.65	341,515.71
2009	492,072.77	58,064,586.68	21,193,574,139.00	16,676.91	350,215.13
2010	504,409.63	59,520,336.72	21,724,922,903.40	17,095.02	358,995.45
2011	515,309.74	60,806,548.86	22,194,390,334.42	17,464.44	366,753.21
2012	527,109.91	62,198,969.57	22,702,623,892.58	17,864.36	375,151.56
2013	538,910.09	63,591,390.28	23,210,857,450.74	18,264.28	383,549.91
2014	550,710.26	64,983,810.98	23,719,091,008.89	18,664.20	391,948.26
2015	562,510.44	66,376,231.69	24,227,324,567.05	19,064.12	400,346.61
2016	574,310.61	67,768,652.40	24,735,558,125.21	19,464.05	408,744.96
2017	586,110.79	69,161,073.11	25,243,791,683.37	19,863.97	417,143.31
2018	597,910.96	70,553,493.81	25,752,025,241.53	20,263.89	425,541.67
2019	612,430.47	72,266,795.19	26,377,380,245.47	20,755.97	435,875.40
2020	625,221.72	73,776,163.02	26,928,299,501.46	21,189.48	444,979.12
2021	638,029.05	75,287,428.47	27,479,911,393.19	21,623.54	454,094.28
2022	650,842.52	76,799,417.66	28,031,787,445.80	22,057.80	463,213.80
2023	663,651.96	78,310,931.29	28,583,489,922.32	22,491.93	472,330.46
2024	676,447.00	79,820,746.12	29,134,572,333.33	22,925.57	481,436.87
2025	689,217.09	81,327,616.37	29,684,579,974.81	23,358.36	490,525.52
2026	701,951.49	82,830,275.32	30,233,050,493.53	23,789.94	499,588.77
2027	714,639.30	84,327,436.93	30,779,514,479.14	24,219.95	508,618.86
2028	727,269.47	85,817,797.49	31,323,496,082.03	24,648.00	517,607.94
2029	739,830.83	87,300,037.41	31,864,513,656.02	25,073.72	526,548.03
2030	752,312.06	88,772,823.08	32,402,080,424.87	25,496.72	535,431.10

Fuente: los autores.

Con lo que al cabo del año 2030, se han de reducir aproximadamente 11.023.374,94 toneladas de carbono eq. Es decir: 524.922.62 ton de metano dejadas de emitir hacia la atmósfera.

## **2.5.2. Generación de biogás en vertederos.**

Mediante estudios de corto plazo adelantados en rellenos de gran tamaño, en los que se usaron datos generados mediante pruebas de extracción de gases de residuos Sólidos (GRS), se ha determinado un rango de producción entre 0.05 y 0.40 m<sup>3</sup> de GRS por kilogramo de residuo dispuesto en el relleno. La masa de residuo esta representa tanto por los materiales sólidos (75-80% por masa) como por la humedad (20-25% por masa)<sup>54</sup>. Para poder realizar cálculos estimativos se hace necesario el empleo de modelos matemáticos que permitan realizar una aproximación a la producción de biogás en los vertederos. Para nuestros análisis, tomaremos el modelo de degradación empírica de primer orden más ampliamente aceptado y utilizado por la industria y agencias reguladoras, incluyendo la U.S. EPA<sup>55</sup>: el Modelo Scholl-Canyon. (Ver anexo 1).

### **2.5.2.1. Generación de biogás en el relleno de henequén.**

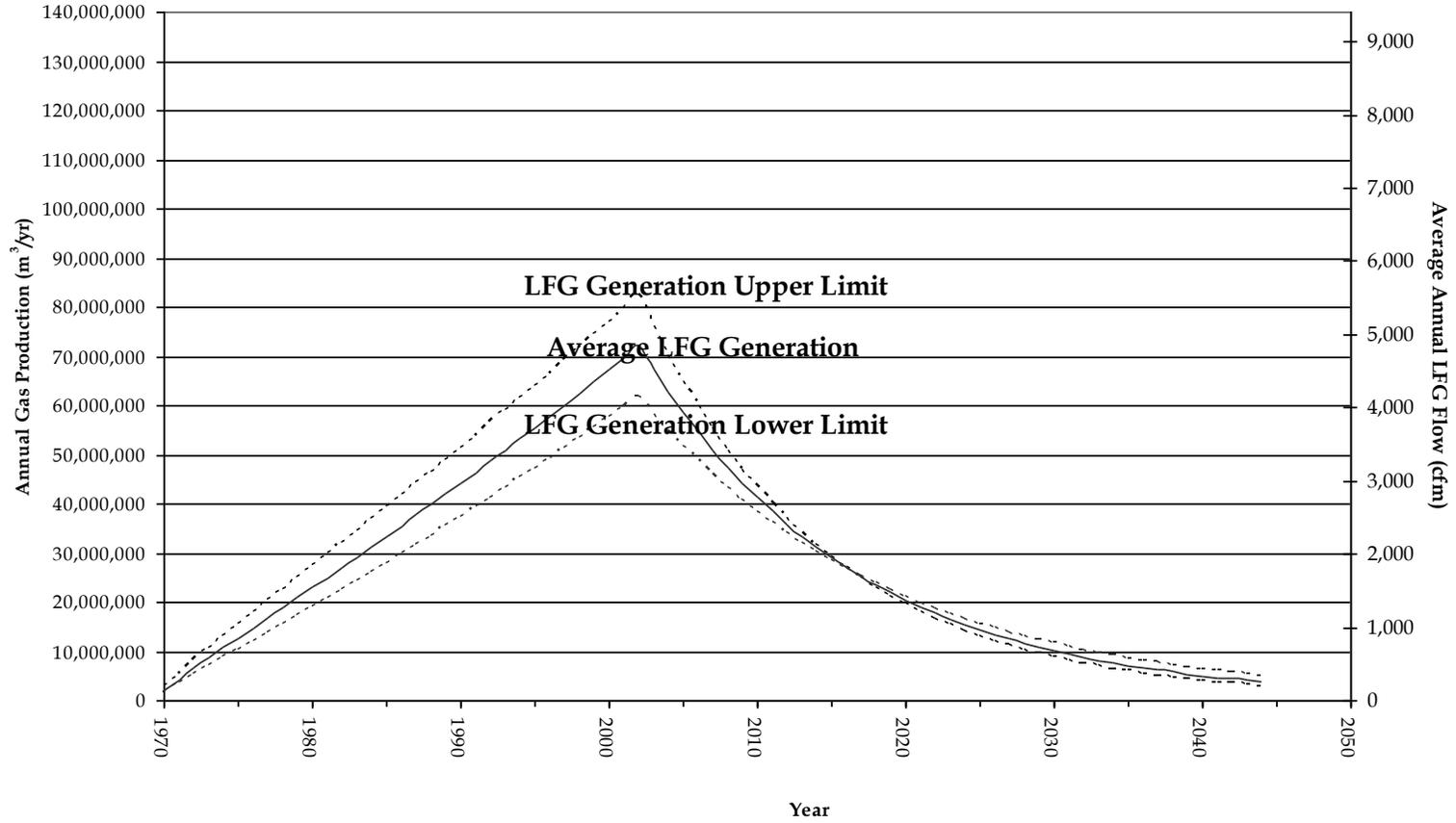
A partir de los análisis sobre generación de biogás presentados en el anexo 2, mediante la implementación de un software de simulación obtenido del banco mundial, se generaron las siguientes graficas correspondientes la generación de biogás del relleno sanitario de henequén. La siguiente gráfica de generación de biogás muestra dos curvas, la cantidad total teórica del GRS producido y el GRS recolectado asumiendo una eficiencia en el sistema de recolección del 75 por ciento. Aunque podría considerarse relativamente alta, un porcentaje de recuperación del 50 por ciento del combustible se considera también muy conservativo y fácilmente alcanzable, asumiendo que tanto la caracterización del residuo como el ejercicio de modelación están basados en datos y supuestos confiables. Otros factores que afectan el contenido de humedad en el residuo y la tasa de generación incluyen el contenido inicial de humedad del residuo; la cantidad y tipo de cobertura diaria que se usa en el sitio; la permeabilidad y tiempo de disposición de la cobertura final; el tipo de impermeabilización de la base; el sistema de recolección de lixiviados; y la profundidad del residuo. En las siguientes graficas se presenta la generación proyectada de metano y el potencial de utilización del metano obtenido a partir de la evaluación de los datos sobre producción de residuos sólidos y el contenido de materia orgánica mediante el modelo scholl-canyon en el relleno sanitario de henequen, cuyos datos son analizados en el anexo 2. Se observa como tanto el índice de generación de metano y el potencial de utilización de metano aumentan hasta llegar al año 2002, fecha en la cual comienza a descender paulatinamente indicando la estabilización del material orgánico depositado en el relleno.

---

<sup>54</sup> UNDP/World Bank Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP). MANUAL PARA LA PREPARACION DE PROYECTOS DE GENERACION DE ENERGIA A PARTIR DEL GAS DE RELLENOS SANITARIOS EN AMERICA Y EL CARIBE. Abril 2004.

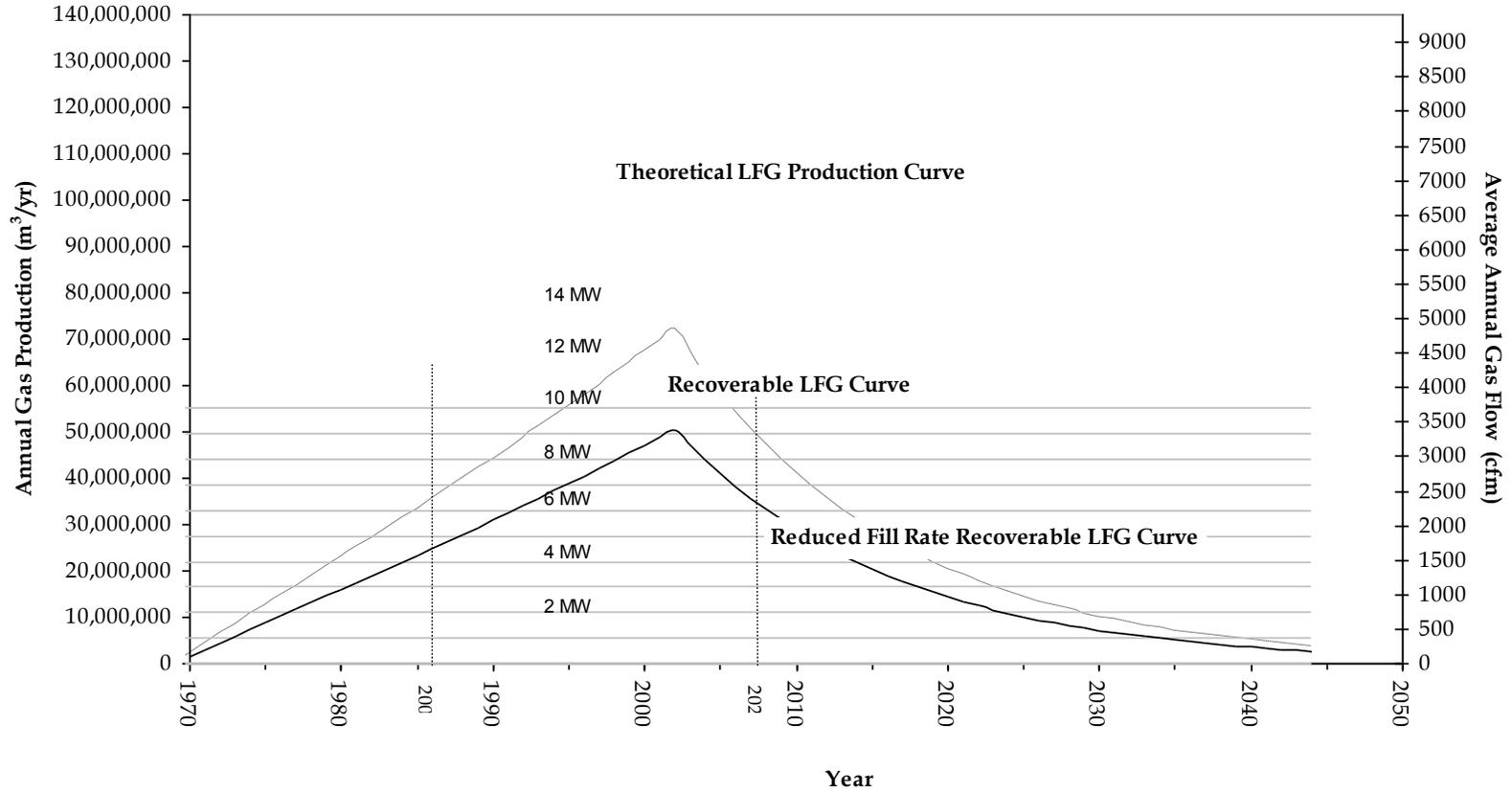
<sup>55</sup> EPA: Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.

**Grafica 3: Generación Proyectada de Gas de Relleno Sanitario: Henequén**



Fuente: Mediante Software del Banco Mundial.

**Grafica 4: Potencial de Utilización de Gas de Relleno Sanitario: Henequén.**



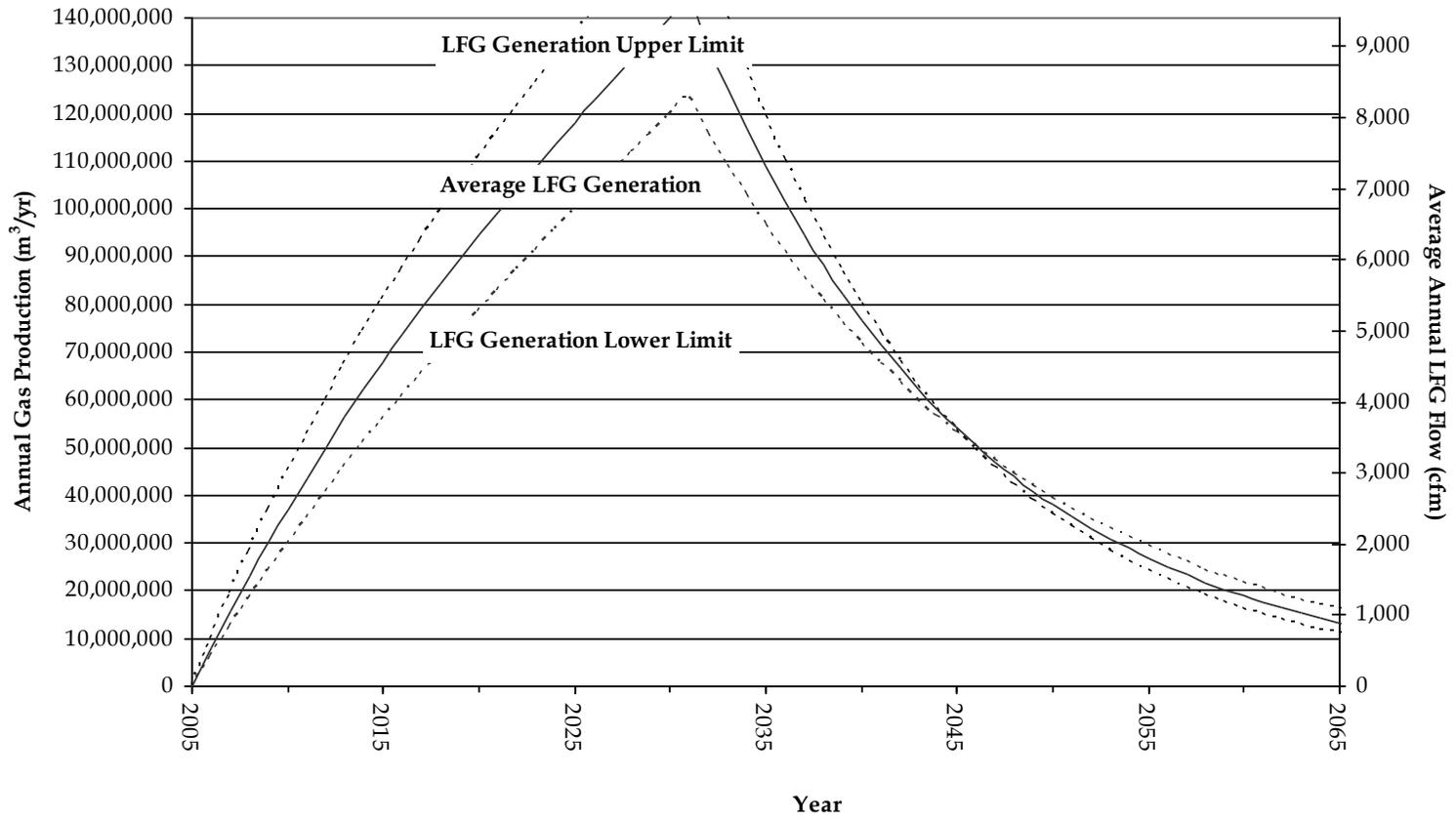
Fuente: Mediante Software del Banco Mundial.

### **2.5.2.2. Generación de biogás en el relleno de loma de los cocos.**

A partir de los análisis sobre generación de biogás presentados en el anexo 3, mediante la implementación de un software de simulación obtenido del banco mundial, se generaron las siguientes graficas correspondientes a la generación de biogás del relleno sanitario de Loma de los Cocos. La siguiente gráfica de generación de biogás muestra dos curvas, la cantidad total teórica del GRS producido y el GRS recolectado asumiendo una eficiencia en el sistema de recolección del 75 por ciento. Aunque podría considerarse relativamente alta, un porcentaje de recuperación del 50 por ciento del combustible se considera también muy conservativo y fácilmente alcanzable, asumiendo que tanto la caracterización del residuo como el ejercicio de modelación están basados en datos y supuestos confiables. Otros factores que afectan el contenido de humedad en el residuo y la tasa de generación incluyen el contenido inicial de humedad del residuo; la cantidad y tipo de cobertura diaria que se usa en el sitio; la permeabilidad y tiempo de disposición de la cobertura final; el tipo de impermeabilización de la base; el sistema de recolección de lixiviados; y la profundidad del residuo. En las siguientes graficas se presenta la generación proyectada de metano y el potencial de utilización del metano obtenido a partir de la evaluación de los datos sobre producción de residuos sólidos y el contenido de materia orgánica mediante el modelo scholl-canyon en el relleno sanitario de loma de los cocos, cuyos datos son analizados en el anexo 3. Se observa como tanto el índice de generación de metano y el potencial de utilización de metano aumentan hasta llegar al año 2031, fecha en la cual comienza a descender paulatinamente indicando la estabilización del material orgánico depositado en el relleno.

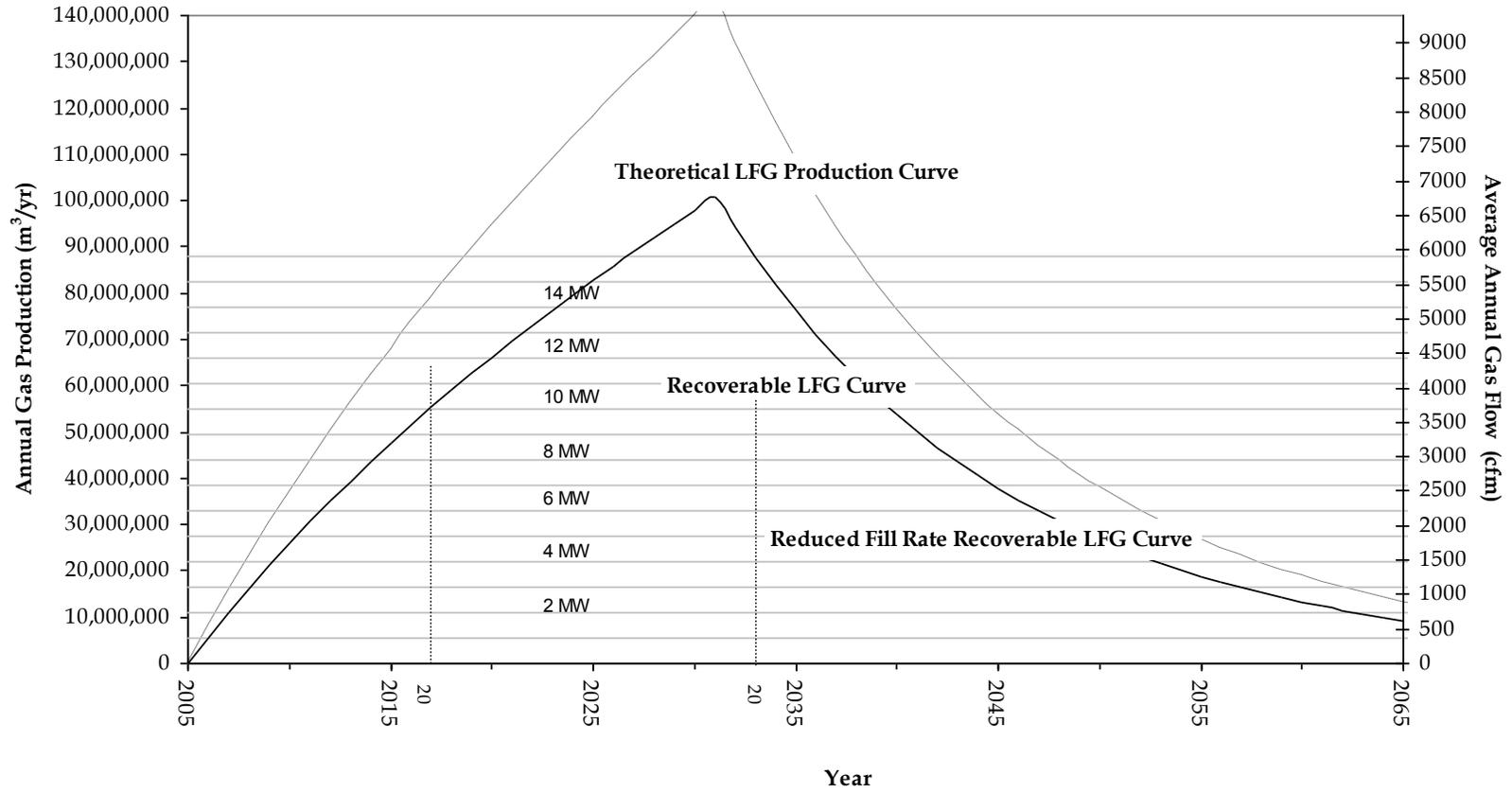
Se puede apreciar, la diferencia de la generación de biogás del relleno sanitario Loma de los Cocos en relación al relleno sanitario de Henequén. Puesto que la cantidad de residuos sólidos a depositar en loma de los cocos será mucho mayor, así mismo el tiempo de recuperación, captación y aprovechamiento del biogás será en un periodo cortote tiempo con respecto a los residuos depositados en henequén. Igualmente los residuos sólidos van perdiendo su potencial de generación de biogás ya que tienden a estabilizarse, limitando el aprovechamiento del biogás generado en henequén. Esto resulta importante por cuanto constituye un punto esencial para la ubicación de la planta de valorización de residuos.

**Grafica 5: Generación Proyectada de Gas de Relleno Sanitario: Loma de los Cocos.**



Fuente: Mediante Software del Banco Mundial.

**Grafica 6: Potencial de Utilización de Gas de Relleno Sanitario: Loma de los Cocos**



Fuente: Mediante Software del Banco Mundial.

## 2.6. POTENCIAL DE GENERACIÓN DE COMPOST

Mediante la Siguiete Relación:

1 T Residuo orgánico → 100 Nm<sup>3</sup> Biogás + 400 Kg. de Compost.

Podemos obtener la calidad de compost generado a partir de la fracción orgánica de los residuos. En este caso obtendríamos diariamente 177.564 Kg de compost y 64.811.204 kg de compost para el año 2005, cantidad que aumenta cada año teniendo en consideración la producción de RSU de la ciudad.

**Tabla 25: Generación Proyectada de Compost a partir de R. Orgánicos (Año 2005-2030)**

Años	Produccion Total RSU (kg/año)	Produccion RSU (kg/dia)	Residuos organicos	Compost (Kg/Dia)	Compost (Kg/Año)
2005	229.542.769,50	628.884,30	443.912,36	177.564,94	64.811.204,82
2006	235.674.638,10	645.683,94	455.770,77	182.308,31	66.542.532,68
2007	241.867.213,50	662.649,90	467.746,58	187.098,63	68.291.001,06
2008	248.125.554,60	679.796,04	479.849,58	191.939,83	70.058.038,32
2009	254.446.047,90	697.112,46	492.072,77	196.829,11	71.842.624,20
2010	260.825.320,80	714.589,92	504.409,63	201.763,85	73.643.806,45
2011	266.461.658,10	730.031,94	515.309,74	206.123,89	75.235.221,47
2012	272.563.414,20	746.749,08	527.109,91	210.843,96	76.958.047,09
2013	278.665.170,30	763.466,22	538.910,09	215.564,03	78.680.872,71
2014	284.766.926,40	780.183,36	550.710,26	220.284,11	80.403.698,34
2015	290.868.682,50	796.900,50	562.510,44	225.004,18	82.126.523,96
2016	296.970.438,60	813.617,64	574.310,61	229.724,25	83.849.349,58
2017	303.072.194,70	830.334,78	586.110,79	234.444,32	85.572.175,20
2018	309.173.950,80	847.051,92	597.910,96	239.164,39	87.295.000,82
2019	316.681.844,86	867.621,49	612.430,47	244.972,19	89.414.848,29
2020	323.296.077,38	885.742,68	625.221,72	250.088,69	91.282.371,19
2021	329.918.625,56	903.886,65	638.029,05	255.211,62	93.152.242,01
2022	336.544.345,20	922.039,30	650.842,52	260.337,01	95.023.008,29
2023	343.167.980,93	940.186,25	663.651,96	265.460,78	96.893.186,18
2024	349.784.172,26	958.312,80	676.447,00	270.578,80	98.761.262,15
2025	356.387.460,12	976.404,00	689.217,09	275.686,84	100.625.694,83
2026	362.972.293,56	994.444,64	701.951,49	280.780,59	102.484.916,93
2027	369.533.036,95	1.012.419,28	714.639,30	285.855,72	104.337.337,22
2028	376.063.977,33	1.030.312,27	727.269,47	290.907,79	106.181.342,65
2029	382.559.332,13	1.048.107,76	739.830,83	295.932,33	108.015.300,53
2030	389.013.257,22	1.065.789,75	752.312,06	300.924,82	109.837.560,76

Fuente: los autores.

Notas: 1. Datos calculados con base en una regresión polinomial de segundo orden en base a las tasas de crecimiento de la población. Así mismo el DANE registra un descenso en las tasas de crecimiento que aunque leve se confirma en los censos poblacionales.

Como se puede apreciar en la tabla, la producción de compost aumenta con cada año, debido al aumento de la población, considerando como una constante la producción de residuos per capita en 0.66 kg/hab y la composición de residuos generados.

## 2.7. POTENCIAL DE REUTILIZACION DE RESIDUOS RECICLABLES

Según la ANDI para 1991 el mercado de empaques y envases en Colombia fue de 738.400 toneladas al año, de las cuales el 39% corresponden a cartones y papeles, el 36% a vidrio, el 17% a plásticos, el 8% a hojalata y el 0.3% a aluminio<sup>56</sup>. Correspondiendo a la proyección de residuos sólidos, para el año 2006 se pueden obtener 131.671,14 kg de residuos potencialmente reciclables y 30.544,84 kilos de residuos aprovechables. Estas cifras son significativas teniendo en cuenta que gran parte de estos residuos corresponden a materiales como el vidrio, plásticos metales, papel y cartón y otros residuos que son susceptibles de aprovechar, aplicando correctos procesos de aprovechamiento final.

**Tabla 26: Generación Proyectada de Residuos Pot. Reciclables y Aprovechables.  
(Año 2005-2030)**

Años	Produccion Total RSU (kg/año)	Produccion RSU (kg/dia)	Potenc. Reciclables/Dia	Aprovechables/Dia
2005	229.542.769,50	628.884,30	131.671,14	30.544,84
2006	235.674.638,10	645.683,94	135.188,53	31.360,80
2007	241.867.213,50	662.649,90	138.740,73	32.184,83
2008	248.125.554,60	679.796,04	142.330,67	33.017,62
2009	254.446.047,90	697.112,46	145.956,25	33.858,68
2010	260.825.320,80	714.589,92	149.615,55	34.707,55
2011	266.461.658,10	730.031,94	152.848,69	35.457,57
2012	272.563.414,20	746.749,08	156.348,80	36.269,52
2013	278.665.170,30	763.466,22	159.848,91	37.081,47
2014	284.766.926,40	780.183,36	163.349,02	37.893,42
2015	290.868.682,50	796.900,50	166.849,13	38.705,37
2016	296.970.438,60	813.617,64	170.349,24	39.517,32
2017	303.072.194,70	830.334,78	173.849,35	40.329,27
2018	309.173.950,80	847.051,92	177.349,46	41.141,22
2019	316.681.844,86	867.621,49	181.656,17	42.140,28
2020	323.296.077,38	885.742,68	185.450,25	43.020,43
2021	329.918.625,56	903.886,65	189.249,10	43.901,68
2022	336.544.345,20	922.039,30	193.049,77	44.783,35
2023	343.167.980,93	940.186,25	196.849,24	45.664,74
2024	349.784.172,26	958.312,80	200.644,44	46.545,15
2025	356.387.460,12	976.404,00	204.432,25	47.423,84
2026	362.972.293,56	994.444,64	208.209,46	48.300,07
2027	369.533.036,95	1.012.419,28	211.972,86	49.173,09
2028	376.063.977,33	1.030.312,27	215.719,16	50.042,15
2029	382.559.332,13	1.048.107,76	219.445,05	50.906,48
2030	389.013.257,22	1.065.789,75	223.147,17	51.765,29

Fuente: los autores.

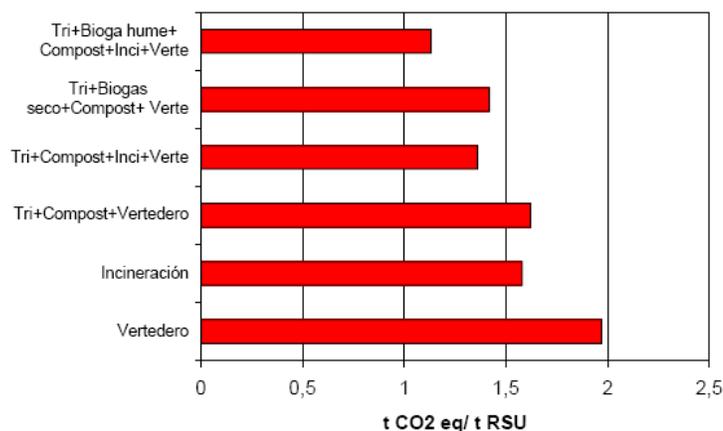
Notas: 1. Datos calculados con base en una regresión polinomial de segundo orden en base a las tasas de crecimiento de la población. Así mismo el DANE registra un descenso en las tasas de crecimiento que aunque leve se confirma en los censos poblacionales.

<sup>56</sup> [http://www.censat.org/Red\\_Juan\\_Novedades.htm#L4](http://www.censat.org/Red_Juan_Novedades.htm#L4)

### 3. SELECCIÓN Y DIAGRAMACIÓN DE LOS PROCESOS ÓPTIMOS DE VALORIZACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS.

Cuando los residuos sólidos urbanos (RSU) se incineran de una forma no controlada, la mayor parte de los gases generados pasan a la atmósfera generando Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), principal gas causante del efecto invernadero. No obstante si el destino de los RSU es el vertido la materia sufre una serie de transformaciones anaerobias y se produce el llamado gas de vertedero formado, esencialmente, por metano y CO<sub>2</sub>. En este aspecto podemos apreciar que una unidad de RSU estándar genera el mayor efecto invernadero cuando el residuo es vertido dada la conformación de los gases de descomposición. Si además se valoran otros aspectos medioambientales como los olores, el impacto visual y sanitario de un vertedero, la ocupación de espacio, la degradación del lugar, el no aprovechamiento de los recursos presentes en los RSU, etc. se entiende el porque del auge actual de las incineradoras y, al mismo tiempo las severas directivas europeas sobre las limitaciones, o prohibiciones en el vertido de las fracciones orgánicas fermentables.

**Grafica 7: Implicacion de los sistemas de disposicion de RSU en el efecto invernadero (t CO<sub>2</sub>eq/t RSU).**



Fuente: ELIAS, Xavier. La Incineración de Residuos y su Adecuación a la Resolución 0058. 3ª parte. Los residuos Como Combustibles. Nociones Sobre la Combustión. p8.

Según la grafica anterior, la disposición final a través del vertido controlado es mas dañina para el medio ambiente por cuanto se generan mayor cantidad de emisiones nocivas a la atmósfera por tonelada de residuo, mientras que los sistemas de disposición integrados que propenden por el aprovechamiento y disposición mediante técnicas como la cogeneración, el compostaje, la digestión anaerobia entre otras, se encuentran como las mejores alternativas para el tratamiento y disposición final de los residuos.

Con base en lo anterior, y para propósitos del proyecto, se pretende obtener biogás a partir de la descomposición anaerobia de la fracción orgánica de los residuos, biogás que será inyectado como

combustible en los procesos de combustión y cogeneración. La fracción orgánica residual del proceso de biometanización será procesada para la obtención de compost orgánico. Simultáneamente la fracción inorgánica de los residuos (fracción no reciclable) será transformada en un combustible derivado de residuos (CDR) para ser utilizado en el proceso de combustión o incineración.

Posteriormente, a través de la inyección del biogás generado por la digestión anaerobia mediante quemadores auxiliares, se iniciará el proceso de combustión y al mismo tiempo será depositado el combustible derivado de residuo (CDR) hacia el horno incinerador dentro del cual se efectuara la incineración, seguidamente el vapor generado será conducido hacia una caldera donde el calor generado por la combustión será transmitido al agua circulante de la caldera produciéndose vapor sobrecalentado, el cual se utilizará para la generación de energía por medio de un sistema de turbinas en ciclo combinado. Luego de utilizado estos gases serán purificados mediante un sistema de lavado semi-humedo, primero a través de la recirculación parcial de los gases de combustión, posteriormente se efectuaría la inyección de cal hidratada y carbón activo apoyado con un sistema de reducción no catalítica selectiva para reducir y eliminar las dioxinas y furanos que puedan haberse originado en el proceso de combustión. La energía generada por las turbinas procederá a transmitirse a una subestación eléctrica donde unos transformadores elevarán su potencia y voltaje para ser utilizada por la planta para consumo propio y el excedente podrá ser vendido a las generadoras eléctricas de la ciudad, igualmente el compost producido podrá ser comercializado con fines de recuperación y enriquecimiento de los suelos de la ciudad.

Por lo anterior, los procesos que se implementarán dentro de la planta son:

- Selección y clasificación de residuos sólidos.
- Digestión anaerobia de la fracción orgánica de los residuos sólidos.
- Tratamiento de efluentes, líquidos de precolación o lixiviados
- Compostaje de la fracción orgánica de los residuos
- Producción de combustible derivado de residuos (CDR)
- Combustión de la fracción inorgánica de los residuos sólidos o CDR.
- Cogeneración Eléctrica.
- Tratamiento de gases de combustión
- Reciclaje de residuos.

A continuación se detallarán cada uno de los anteriores procesos seleccionados, dentro de los cuales se identificará la secuencia requerida para la valorización energética de los residuos y la obtención de compost orgánico; a través de la aplicación de la estrategia de las cuatro R: reducción del volumen de basura generado, reutilización de los materiales el mayor número de veces posible y reciclaje de los mismos para la fabricación de nuevos productos y así mismo, la recuperación energética de los residuos no reciclables,

### 3.1. SELECCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS.

En la selección y clasificación de los residuos sólidos, se recibirán los materiales procedentes de la recogida y se separarán por tipologías a través de dispositivos abre bolsas, cintas de transporte de materiales a velocidad variable, prensas diferenciadas para embalado de materiales ligeros o metales (aluminio y férricos), pinchos para botellas PET y ciclones para separación de bolsas de plástico. Para la separación de metales férricos y de aluminio se contará con sistemas electromagnéticos y de corrientes de Foucault. Una vez seleccionados los distintos materiales potencialmente reciclables, se embalarán por separado para su envío hacia los distintos centros específicos de reciclado, donde tras un proceso de transformación, serán convertidos en nuevos productos dispuestos a reincorporarse al ciclo productivo.

En la tabla 27 presentamos los diferentes tipos de selección de distintos materiales a tratar y sus respectivas técnicas de separación.

**Tabla 27: Tipos de selección de materiales y técnicas de separación.**

Tipo de selección	Material	Técnica de separación
<b>Automática</b>	Férricos	Separador "OverBand" (electroimán)
	Aluminio	Corrientes de Foucault y criba vibratoria
	Briks	
<b>Manual</b>	Polietileno de alta densidad (PEAD)	
	Polietileno de baja densidad (PEBD)	
	Polietileno tereftalato (PET)	
	Otros plásticos	

Fuente: los autores.

De una manera más descriptiva, el siguiente es el proceso que seguirán los residuos sólidos.

#### 3.1.1. Recepción y descarga.

Aquí en donde se descargarán los residuos recogidos en las bolsas (envases y otros residuos). Mediante trómeles dotados de un rompedor de bolsas se procede a la apertura de las bolsas de residuos, se depositan sobre una playa de hormigón. Los residuos voluminosos son pre-tratados con una cizalla para disminuir su tamaño y reincorporarlos a la línea de transporte y posterior clasificación.

#### 3.1.2. Transporte.

A través de una pala mecánica se introduce el material en una cinta transportadora horizontal y se realiza una selección gruesa en la que se separan los residuos metálicos que no son envases, objetos de gran tamaño, grandes embalajes, etc.

Al final de esta selección se produce la apertura de las bolsas usadas para la recogida. Los residuos se reparten sobre la superficie de la cinta, mientras que los restos de las bolsas son eliminados por un sistema de aspiración y almacenados en una tolva para su posterior compactación.

### **3.1.3. Selección o triaje.**

Aquí se realizará la separación combinada de residuos recuperables. El primer paso se realiza manualmente: Papel y cartón: Es el primer material seleccionado.

Plásticos: Se seleccionan en función de las calidades y colores (PVC, PET, PS, PEHD, PELD).

Vidrio: Se clasifican en último lugar las botellas enteras que hayan podido ir mezcladas con estos residuos.

Posteriormente se realiza una selección mecánica:

Los metales férricos son retirados mediante un separados magnético tipo "overband", los metales no férricos mediante separador de corrientes de foucault, y los inertes mediante un separador balístico.

Una posterior selección manual separará el aluminio de los envases mixtos (tetra-briks).

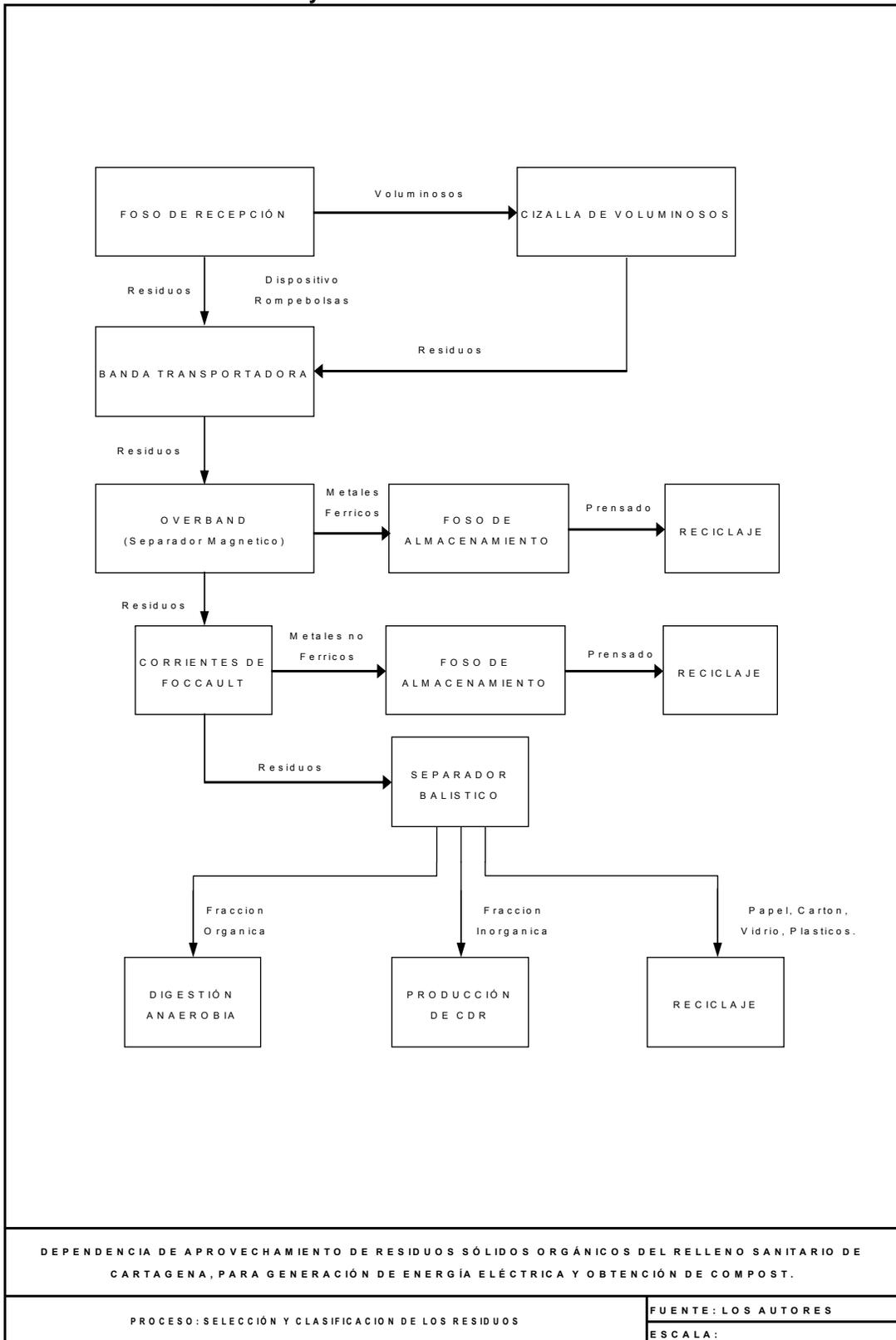
### **3.1.4. Prensado y almacenamiento**

Los distintos tipos de materiales pasan a través de tolvas metálicas hasta los silos de almacenamiento y de aquí a las prensas. Existen tres prensas:

- Para papel, plásticos y residuos mixtos.
- Para envases de aluminio.
- Para envases férricos.

Las balas de alta densidad obtenidas son almacenadas hasta su envío a las diferentes empresas de transformación.

**Grafica 8: Proceso de Selección y Clasificación de los Residuos.**



### 3.2. DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS.

La biometanización, es decir, la fermentación o digestión anaerobia de residuos orgánicos, nos permite obtener una mezcla de gases, especialmente el biogás, que puede utilizarse para la producción de electricidad, vapor para calefacción, o como combustible, a través de la transformación de la fracción fermentable o putrescible para su posterior valorización. El biogás es extraído de los digestores y enviado a un gasómetro, depósito cuya función es regular el flujo de alimentación de la central. Igualmente este tratamiento permite además evitar los malos olores, exige menos espacio y brinda un abono de mejor calidad.

El proceso de producción de biogás depende de varios parámetros que afectan la actividad bacteriana e influyen en el desarrollo del proceso, los cuales son:

- Temperatura
- Tiempo de retención.
- Relación Carbono / Nitrógeno.
- Porcentaje de sólidos.
- Factor PH.

Las condiciones favorables de medio para la supervivencia de los microorganismos anaeróbicos pueden desarrollarse a temperaturas de entre 10 y 60°C, teniendo un óptimo entre 30 y 40°C (fase mesofílica) y otro entre 50 y 60°C (fase termofílica). El pH entre 6.5 y 8.5 permite un buen desarrollo de los microorganismos teniendo un óptimo entre 7 y 7.2<sup>57</sup>. Así mismo, la utilización de los biodigestores además de permitir la producción de biogás, ofrece enormes ventajas para la transformación de desechos:

- Mejora la capacidad fertilizante del estiércol. Todos los nutrientes tales como nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio así como los elementos menores son conservados en el efluente. En el caso del nitrógeno, buena parte del mismo, presente en el estiércol en forma de macromoléculas es convertido a formas más simples como amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), las cuales pueden ser aprovechadas directamente por la planta. Debe notarse que en los casos en que el estiércol es secado al medio ambiente, se pierde alrededor de un 50% del nitrógeno.
- El efluente es mucho menos oloroso que el afluente.
- Control de patógenos. Aunque el nivel de destrucción de patógenos variará de acuerdo a factores como temperatura y tiempo de retención, se ha demostrado experimentalmente que alrededor del 85% de los

---

<sup>57</sup> Generación de Biogás y Abono Biológico por Degradación Anaerobia de Residuos Orgánicos.  
<<http://www.corpodib.com/estudios3.htm>>.

patógenos no sobreviven el proceso de biodigestión. En condiciones de laboratorio, con temperaturas de 35°C los coliformes fecales fueron reducidos en 50 – 70% y los hongos en 95% en 24 horas.

Para el dimensionamiento del digestor se partirá de la cantidad de gas que se quiere lograr del digestor diariamente. Con este dato se dimensionará el digestor para una determinada temperatura de funcionamiento, calculándose la cantidad de material a introducir por día y verificando con posterioridad si alcanza la biomasa disponible. La reacción anaerobia es un excelente proceso en la degradación de residuos tales como vinazas, residuos agrícolas vegetales, y en general del sector de alimentos. Se han encontrado eficiencias de remoción con el uso de esta tecnología de hasta un 95% de la carga orgánica. Adicionalmente se obtiene biogás con una composición aproximada de: CH<sub>4</sub>: 45% - 60%; CO<sub>2</sub>: 28% - 34%; H<sub>2</sub>S: 14% - 18%, el cual es purificado en procesos posteriores hasta obtener gas metano de aproximadamente un 98% de pureza<sup>58</sup>. Para el proceso de biometanización, dispondremos de los siguientes procesos:

### **3.2.1. Recepción de los residuos.**

Después del proceso de triaje, selección y clasificación de los residuos, el material orgánico es trasladado y posteriormente descargado en el foso de residuos biológicos y una grúa los traslada a las tolvas de alimentación, con filtros biológicos.

### **3.2.2. Pre-tratamiento mecánico.**

En este momento se separarán y se eliminarán los elementos no orgánicos que están mezclados por error. Después pasan por los primeros trituradores. Unas cribas continuas, rotatorias, separan tres fracciones: la de menor tamaño se envía a la fermentación anaerobia, la de tamaño medio se utiliza en la fermentación aerobia (compostaje) y la de mayor tamaño se rechaza y, empacada en balas, se destina al depósito, para posteriormente reutilizarlo y fabricar el combustible derivado de residuos (CDR).

### **3.2.3. Digestión anaerobia (fermentación).**

Tras mezclarla con agua y microorganismos esta suspensión será conducida a los digestores anaeróbicos (ausencia de oxígeno) por medio de bombas hidráulicas. Permanecerá aquí entre 28 y 32 días a aproximadamente 35°C. La descomposición produce diversos gases (vapor de agua, metano), denominados en conjunto biogás, que se destinará a la generación de energía eléctrica.

---

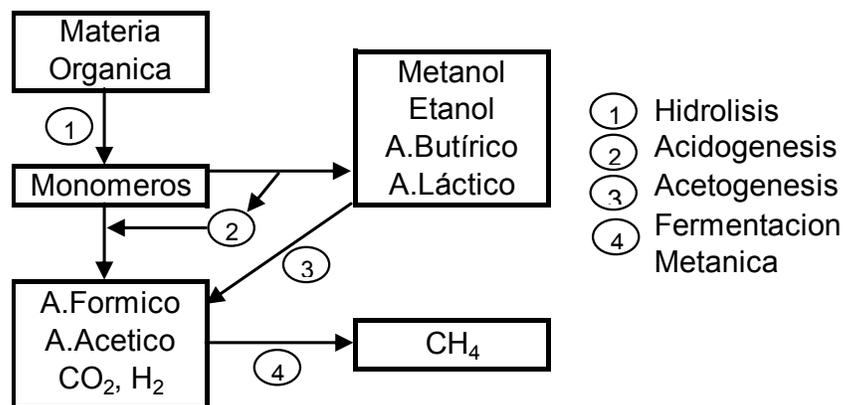
<sup>58</sup> Ibid.

Materia orgánica + bacterias anaerobias = CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O + CH<sub>4</sub> + NH<sub>3</sub> + productos finales reducidos<sup>59</sup>

De forma detallada, el esquema general de conversión este proceso consiste en una serie de reacciones químicas donde gracias a la intervención de bacterias anaerobias permiten la obtención de biogás:

- Hidrólisis de la celulosa: presente en la mayoría de los residuos vegetales
- Acidogénesis: por la cual los monómeros obtenidos en la fase anterior, por la acción de bacterias, se convierten en alcoholes, ácidos orgánicos, gas carbónico e hidrogeno.
- Acetogénesis: la realizan las bacterias anaerobias que aseguran la transformación de los compuestos de la fase anterior en ácido acético, gas carbónico, hidrogeno y formiatos.
- Fermentación metánica propiamente dicha: Esta fase se realiza gracias a la acción de bacterias de lento crecimiento (metagénicas) que degradan los compuestos antes sintetizados y los transforma en metano y gas carbónico.

Figura 1: Fases del Proceso de Digestión Anaerobia



Fuente: ELIAS, Xavier. Valorización Energética de Residuos. Aplicaciones.

### 3.2.4. Almacenamiento del biogás

Para el almacenamiento de biogás (mezcla de metano y gas carbónico), producto de la biometanización de la fracción degradable de los residuos, se dispondrá de una unidad de almacenamiento y distribución. A través de un gasómetro se controlará el flujo del biogás que posteriormente será destinado para la alimentación de los quemadores auxiliares del horno de combustión y para alimentar los motores de generación de energía (turbinas y motores a gas) mediante unas bombas impulsoras de gas. La instalación integrará además, de un

<sup>59</sup> Transforma. Regulación eléctrica: avances y tendencias. Año 2 numero 4 mayo de 2003. unidad de reestructuración eléctrica: <<http://www.cre.gov.mx>>.

depósito, un grupo de regulación general, tubería de distribución y un grupo de regulación independiente para cada quemador auxiliar.

El depósito de almacenamiento será dimensionado para una autonomía de 24 horas de funcionamiento de los quemadores auxiliares a plena carga. Su capacidad permitirá también completar la primera fase de secado del refractario del horno de caldera. A la salida del depósito se instalará un grupo de regulación general que estabilizará la presión del gas a la presión de distribución.

Desde el punto de regulación general, la tubería de distribución se transcurrirá hasta la plataforma de quemadores auxiliares de la caldera, donde se dividirá en dos ramales que se conectarán a cada uno de ellos a los grupos de regulación de cada quemador y al grupo de generación.

### **3.2.5. Disposición de la fracción residual.**

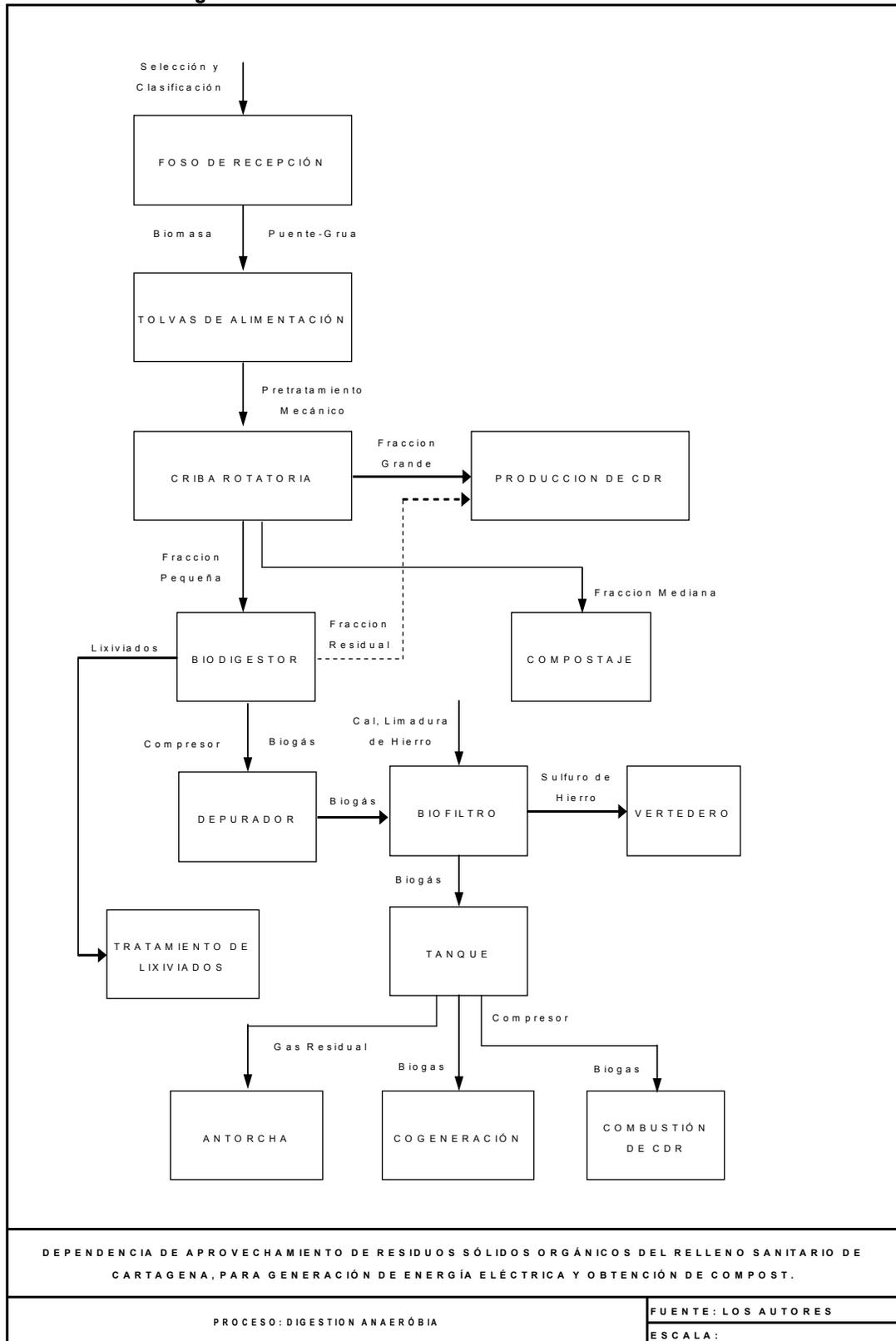
La fracción residual (no gasificada), fango, se extrae por la parte inferior y se puede utilizar en posteriores procesos (producción de CDR).

### **3.2.6. Filtro para la captación del sulfuro de hidrógeno del biogás**

En el biogás se encuentran cantidades variables de sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ), también denominado ácido sulfhídrico. El  $H_2S$  al reaccionar con agua se convierte en ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) el cual es altamente corrosivo y puede ocasionar graves daños en máquinas motrices. Con el fin de eliminar o disminuir el porcentaje de  $H_2S$  en el biogás se emplearán sistemas de filtro con sustancias como cal viva o apagada, limadura de hierro o ciertos tipos de tierras conocidas como hematites parda o limonita, las cuales son ricas en sustancias ferrosas.

Este filtro deberá instalarse en la línea de conducción biodigestor-reservorio, en donde a través de limadura de hierro y esponjillas de hierro, el  $H_2S$  es atrapado por el material ferroso formándose sulfuro de hierro.

**Grafica 9: Proceso de Digestión Anaerobia.**



### 3.3. COMPOSTAJE DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS

La materia orgánica procedente de la fermentación es deshidratada a la salida de los digestores, en los espesadores, y enviada a la nave de compostaje. Aquí es donde la materia orgánica, por aproximadamente 40 días, termina su tratamiento por compostaje aeróbico. Periódicamente es volteada de forma mecánica, al tiempo que se le introduce aire mediante un conjunto de ventiladores. Finalmente se traslada a la estación de afino, donde se eliminan los inertes que aún pueda presentar y se seleccionan las granulometrías para su posterior comercialización. El aire resultante es extraído mediante ventiladores que lo dirigen al biofiltro.

#### 3.3.1. Periodos del proceso de compostaje

El proceso de compostaje puede dividirse en cuatro períodos, atendiendo a la evolución de la temperatura:

- **Mesolítico.** La masa vegetal está a temperatura ambiente y los microorganismos mesófilos se multiplican rápidamente. Como consecuencia de la actividad metabólica la temperatura se eleva y se producen ácidos orgánicos que hacen bajar el pH.
- **Termofílico.** Cuando se alcanza una temperatura de 40°C, los microorganismos termófilos actúan transformando el nitrógeno en amoníaco y el pH del medio se hace alcalino. A los 60°C estos hongos termófilos desaparecen y aparecen las bacterias esporígenas y actinomicetos. Estos microorganismos son los encargados de descomponer las ceras, proteínas y hemicelulosas.
- **De enfriamiento.** Cuando la temperatura es menor de 60°C, reaparecen los hongos termófilos que reinvasen el mantillo y descomponen la celulosa. Al bajar de 40°C los mesófilos también reinician su actividad y el pH del medio desciende ligeramente.
- **De maduración.** Es un periodo que requiere meses a temperatura ambiente, durante los cuales se producen reacciones secundarias de condensación y polimerización del humus.

#### 3.3.2. Factores que condicionan el proceso de compostaje

Como se ha mencionado, el proceso de compostaje se basa en la actividad de microorganismos que viven en el entorno, ya que son los responsables de la descomposición de la materia orgánica. Para que estos microorganismos puedan vivir y desarrollar la actividad descomponedora se necesitan de unas condiciones óptimas de temperatura, humedad y oxigenación.

Son muy complejos los factores que interviene en el proceso biológico del compostaje, estando a su vez influenciados por las condiciones ambientales, tipo de residuo a tratar y el tipo de técnica de compostaje empleada. Los factores más importantes son<sup>60</sup>:

- **Temperatura.** Se consideran óptimas las temperaturas entre mesófilas (35°C) y termófilas (50-60°C). para conseguir la eliminación de patógenos, parásitos y semillas de malas hierbas. A temperaturas muy altas, muchos microorganismos interesantes para el proceso mueren y otros no actúan al estar esporados.
- **Humedad.** En el proceso de compostaje es importante que la humedad alcance unos niveles óptimos del 40-60 %. Si el contenido en humedad es mayor, el agua ocupará todos los poros y por lo tanto el proceso se volvería anaeróbico, es decir se produciría una putrefacción de la materia orgánica. Si la humedad es excesivamente baja se disminuye la actividad de los microorganismos y el proceso es más lento. El contenido de humedad dependerá de las materias primas empleadas. Para materiales fibrosos o residuos forestales gruesos la humedad máxima permisible es del 75-85 % mientras que para material vegetal fresco, ésta oscila entre 50-60%.
- **pH.** Influye en el proceso debido a su acción sobre microorganismos. En general los hongos toleran un margen de pH entre 5-8, mientras que las bacterias tienen una menor tolerancia ( pH= 6-7,5 )
- **Oxígeno.** El compostaje es un proceso aeróbico, por lo que la presencia de oxígeno es esencial. La concentración de oxígeno dependerá del tipo de material, textura, humedad, frecuencia de volteo y de la presencia o ausencia de aireación forzada.
- **Relación C/N equilibrada.** El carbono y el nitrógeno son los dos constituyentes básicos de la materia orgánica. Por ello para obtener un compost de buena calidad es importante que exista una relación equilibrada entre ambos elementos. Teóricamente una relación C/N de 25-35 es la adecuada, pero esta variará en función de las materias primas que conforman el compost. Si la relación C/N es muy elevada, disminuye la actividad biológica. Una relación C/N muy baja no afecta al proceso de compostaje, perdiendo el exceso de nitrógeno en forma de amoníaco. Es importante realizar una mezcla adecuada de los distintos residuos con diferentes relaciones C/N para obtener un compost equilibrado. Los materiales orgánicos ricos en carbono y pobres en nitrógeno son la paja, el heno seco, las hojas, las ramas, la turba y el aserrín. Los pobres en carbono y ricos en nitrógeno son los vegetales jóvenes, las deyecciones animales y los residuos de matadero.
- **Población microbiana.** El compostaje es un proceso aeróbico de descomposición de la materia orgánica, llevado a cabo por una amplia gama de poblaciones de bacterias, hongos y actinomicetos.

---

<sup>60</sup> El Compostaje. INFOAGRO. <<http://www.infoagro.com/abonos/compostaje.asp>>

- **Tamaño.** los residuos han de ser previamente triturados para favorecer su descomposición biológica

### 3.3.3. Producción de compost orgánico.

Los residuos orgánicos putrescibles (restos de comida, residuos de poda, etc.) que son separados del flujo de residuos sólidos urbanos, son dispuestos al aire libre bajo condiciones climáticas controladas, con el objetivo de realizar por medios biológicos la transformación de estos para lograr un material fino con gran proporción de humus llamado abono orgánico o compost. Por otra parte, el compost debe cumplir con unos límites en contenido de sustancias tóxicas:

**Tabla 28: Límites máximos permisibles en el compost**

Parámetro	mg/kg (Peso seco)
Cadmio	18
Cromo	1200
Cobre	1200
Níquel	180
Plomo	300
Zinc	1800
Arsénico	54
Mercurio	5
Cobalto	15
Molibdeno	20
Selenio	14
PCB	1.9
Patógenos	< 1000 <sup>1</sup>
Plástico	< 3 % <sup>2</sup>

<sup>1</sup>: Coliformes fecales/ g de sólidos totales

<sup>2</sup>: Porcentaje en peso

Fuente: Ministerio de Desarrollo Económico. Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico. REGLAMENTO TÉCNICO DEL SECTOR DEL AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO RAS 2000. Bogotá D.C. Noviembre de 2000

En una primera etapa los residuos orgánicos son dispuestos en montículos de algo más de 1,5 mts aproximadamente, sobre plataformas de hormigón armado (este la aísla del suelo) que impiden la infiltración de líquidos por parte del suelo, estos líquidos son recogidos a través de conductos instalados en la superficie los cuales serán depositados en tanques donde posteriormente se efectuará su correspondiente tratamiento; por otra parte son instalados sistemas de venteo de gases (caños de PVC), ya que si bien en una primera instancia la degradación es aeróbica, luego se generan condiciones de anaerobiosis produciéndose gran cantidad de gas, de esta manera las bacterias consumen parcialmente la materia orgánica observándose la pérdida de volumen de la masa de residuos, esta etapa esta dominada por la degradación biológica bacterial.

Una vez realizado el trabajo por la bacteria, parte de estos montículos degradados son depositados en camas lineales sobre una base de suelo en el cual se procede al sembrado de lombrices, estas realizan la etapa de

mineralización de la materia orgánica, es decir transforman esta en minerales útiles para los vegetales (humus). Posteriormente realizado el trabajo por parte de las lombrices y después de un periodo prolongado, parte de este producto esta listo para ser procesado y transformado (mediante maquinas que trituran y limpian este material) en compost orgánico, que luego será almacenado y comercializado.

Para mas detalle, describiremos el proceso de compostaje a realizar con la fracción orgánica procedente de la digestión anaerobia.

### **3.3.3.1. Preparación previa**

#### **3.3.3.1.1. Recepción de la fracción vegetal y trituración**

La Biomasa procedente del proceso de recepción y clasificación es recepcionada y dispuesta junto a los residuos vegetales procedentes de la jardinería; la limpieza de bosques o la desechería municipal son triturados.

#### **3.3.3.1.2. Mezcla y homogenización**

Se mezclan las dos fracciones en las proporciones siguientes: 65-75% de la fracción orgánica sin impurezas y 25-35 % de la fracción vegetal triturada. La mezcla resultante se somete a un proceso de compostaje.

### **3.3.3.2. Proceso de compostaje**

#### **3.3.3.2.1. Disposición en pilas**

La mezcla se dispone con una pala mecánica en una explanada donde se realiza en proceso de compostaje formando pilas, dentro de un cobertizo y encima de un pavimento adecuado para la recogida de lixiviados.

#### **3.3.3.2.2. Volteado de las pilas y control de condiciones ambientales del proceso**

Para que los microorganismos puedan descomponer adecuadamente la materia orgánica, hay que mantener las condiciones de humedad y temperatura adecuadas y la concentración de oxígeno suficiente; a través de la ejecución de volteos periódicos para airear los residuos mediante una maquina volteadora. Durante este tiempo, la pila de materia orgánica alcanza temperaturas elevadas que ayudan a la evaporación de la humedad contenida. Con el propósito de mantener la humedad se mantiene regando periódicamente las pilas.

Dado que el volumen de los residuos se ve disminuido con el paso de los días, es preciso proceder con el proceso del primer afino. El cual consiste en hacer pasar el montón de residuos por un tamiz que separa la materia orgánica bastante descompuesta, de los residuos inorgánicos que traía procedentes del primer proceso de tamizado. Una vez que se ha hecho el afino, el resultante es una pila de materia orgánica, a la que todavía resta tiempo para convertirse en abono orgánico.

#### **3.3.3.2.3. Recogida de lixiviados y aguas pluviales**

Los líquidos que desprenden las pilas objeto de compostaje (los lixiviados) se recogen y sirven para continuar regando las pilas. Toda la superficie de la planta estará pavimentada de manera que las aguas pluviales puedan ser recogidas y aprovechadas para el riego del compost.

#### **3.3.3.2.4. Cribado del compost maduro**

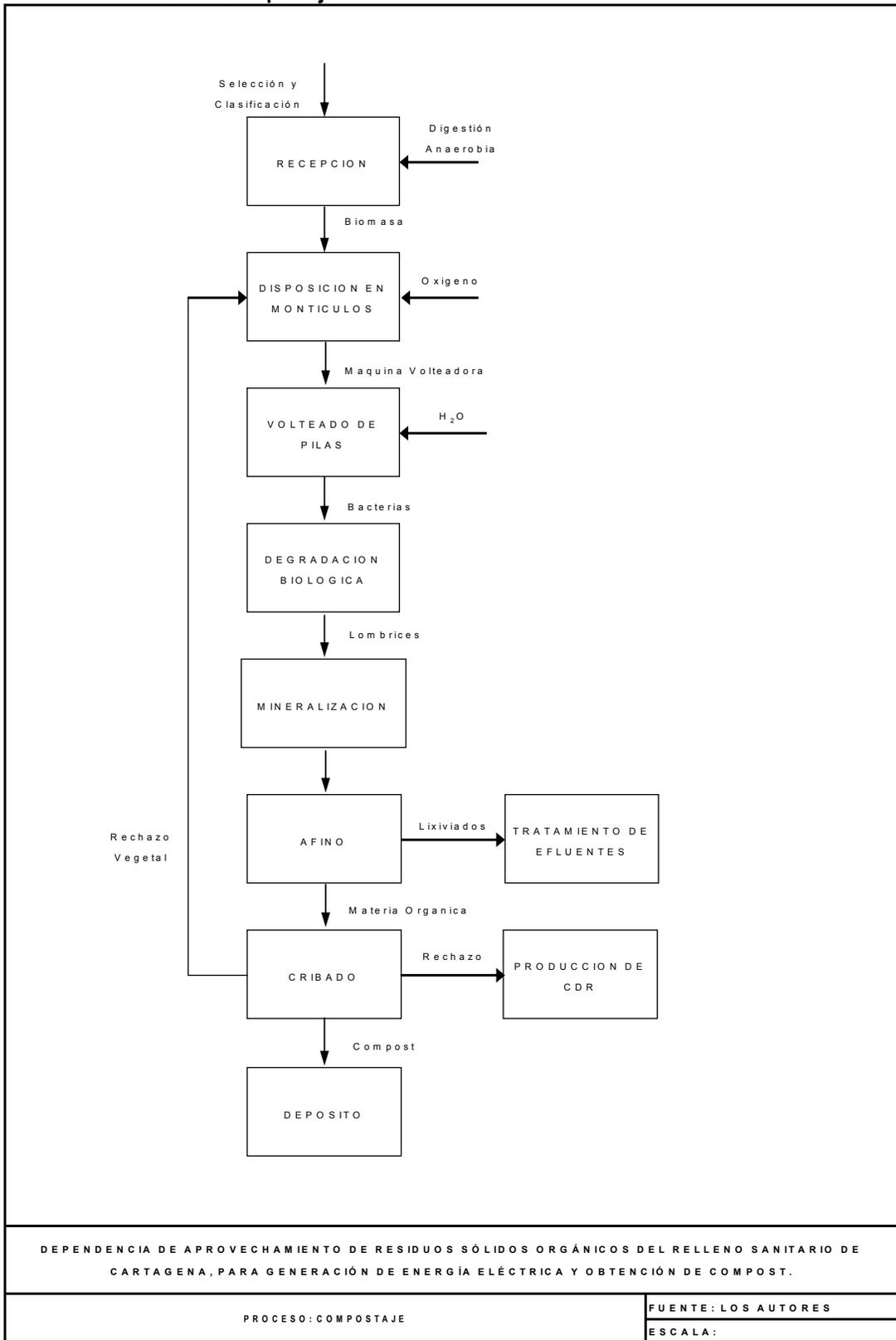
Al cabo de 12-14 semanas, el compost, ya maduro, después de un proceso de estabilización, continua con el proceso de volteo pero ahora con menos frecuencia. Posteriormente se ejecuta un segundo afino donde se criba para obtener un material final homogéneo y fino. El desecho vegetal que pueda quedar se retorna al principio del proceso.

#### **3.3.3.2.5. Compost**

Finalmente, se obtiene un compost maduro y estable que será almacenado, donde podrá comercializarse como abono o corrector de suelos. Este compost obtenido tiene importantes ventajas:

- Hace que los suelos recuperen una estructura adecuada.
- Aumenta la capacidad del suelo para retener agua
- Es fuente de elementos nutritivos
- Mejora el efecto de los abonos químicos.

**Grafica 10: Proceso de Compostaje.**



DEPENDENCIA DE APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS DEL RELLENO SANITARIO DE CARTAGENA, PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y OBTENCIÓN DE COMPOST.

PROCESO: COMPOSTAJE

FUENTE: LOS AUTORES  
ESCALA:

### **3.4. PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLE DERIVADO DE RESIDUOS (CDR)**

En este proceso se recibe la fracción no reciclable, la cual será procesada y convertida en un combustible derivado de residuos (CDR) que alimentará a la planta termoeléctrica. Este proceso constituye, el punto de partida para la valorización energética de la fracción no reciclable de los residuos. Con los residuos no reciclables se realiza una clasificación por tamaños y se someten a un proceso de trituración y secado convirtiéndolos en combustible derivado de residuos. El esquema del proceso a seguir se enuncia a continuación.

#### **3.4.1. Recepción de RSU**

La fracción inorgánica procedente del proceso de selección y la fracción orgánica residual procedente del proceso de compostaje de los residuos es depositada en fosos de almacenamiento; donde a través de dos puentes grúa provistos de un pulpo, serán dispuestos en el alimentador.

#### **3.4.2. Alimentación de RSU**

El material se dosifica desde el foso, a tres alimentadores de placas que lo transporta a tres líneas. Los voluminosos son retirados de los alimentadores de placas por medio de brazos hidráulicos y enviados a un triturador de voluminosos (cizalla), desde donde se recircula el producto triturado de nuevo al foso. Para esto, la cizalla de voluminosos estará especialmente diseñada para la reducción del volumen de aquellos residuos que por su forma y tamaño pueden causar problemas en el caso de ser alimentados y posteriormente transportados hacia el proceso de combustión a través de las tolvas de carga.

#### **3.4.3. Clasificación primaria**

La fracción gruesa continúa a la etapa de molienda a través de cintas transportadoras y la fracción fina se recupera para realizar una clasificación secundaria.

#### **3.4.4. Clasificación secundaria**

La fracción fina es enviada a un foso regulador de la etapa de secado. Por otro lado, la fracción gruesa se conduce hacia la molienda mediante unas cintas en las que se realiza una trituración para su posterior mezclado con la fracción fina.

#### **3.4.5. Trituración**

La fracción gruesa se muele en tres molinos de martillos de disposición vertical y posteriormente mediante una cizalla. En la entrada de los molinos se separan los inertes pesados (pilas, cascotes, etc) por medio de un separador balístico. En la salida se separan las partículas metálicas por medio de un separador magnético tipo "overband" y el producto es enviado a unos trómeles que recirculan todo el material que no ha alcanzado el tamaño deseado hacia la alimentación de los molinos. La fracción de tamaño adecuado es enviada a la etapa de mezclado.

#### **3.4.6. Secado de la fracción fina**

El material húmedo se traslada a dos secaderos donde la corriente de gases procedente de los motores de cogeneración lo seca hasta un 20-35% de humedad. Los vapores del secado se depuran por medio de ciclones y torres de lavado de gases. A la salida de los secaderos existen unos trómeles que separan la fracción muy fina de la fina.

#### **3.4.7. Mezclado**

La fracción muy fina separada con posterioridad al secado se envía a unas mesas densimétricas para la separación de la materia inerte residual. Los flujos de fracciones gruesas, fina y muy fina se mezclan sobre cinta, homogeneizando el conjunto para su envío al almacén de Combustible Derivado de Residuos (CDR).

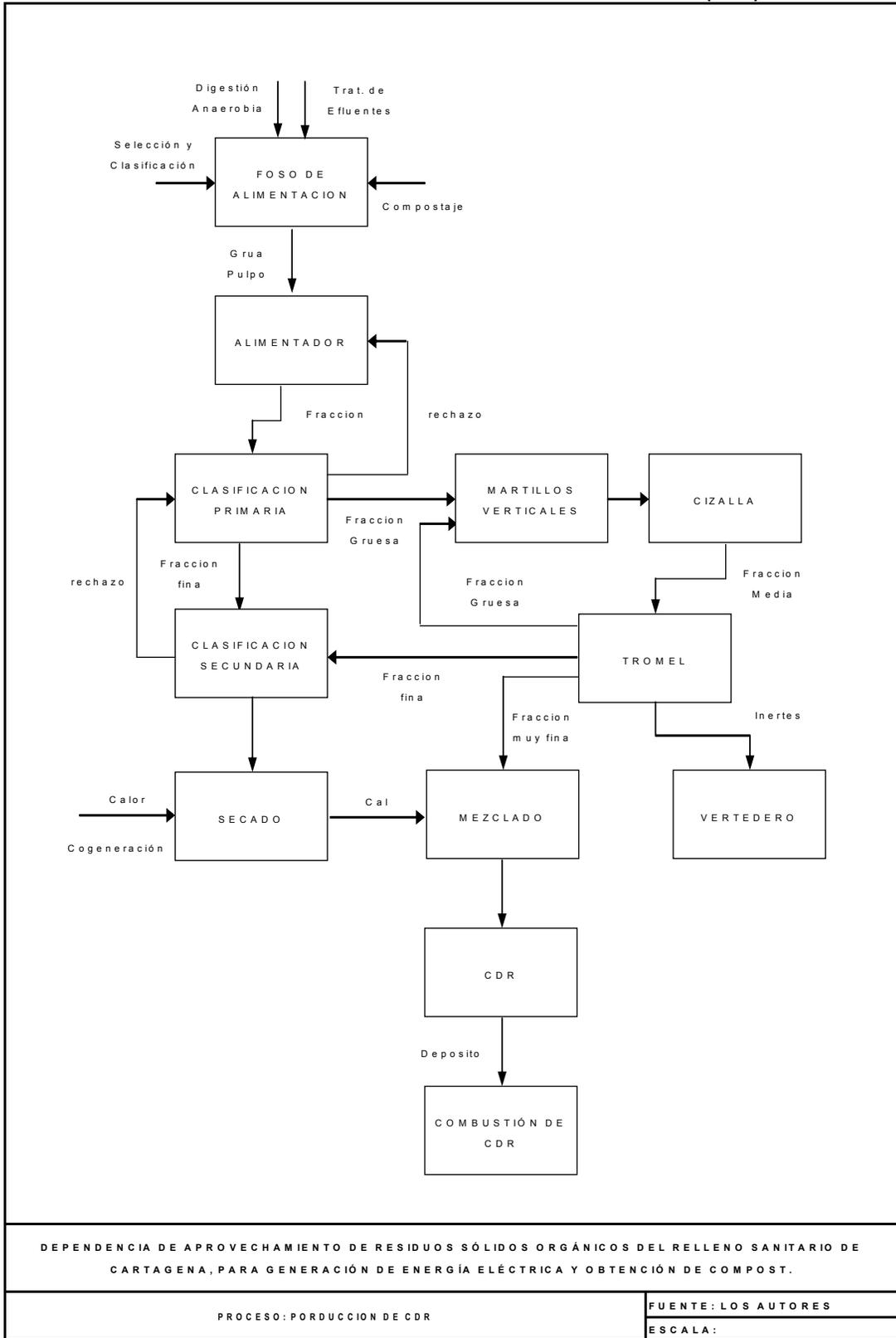
#### **3.4.8. Almacenamiento de CDR**

Dispone de tres alternativas de operación, tales que permiten una conexión directa PRTE-Caldera, un almacenamiento a corto plazo y un almacenamiento a medio/largo plazo (estacional). Su capacidad de almacenamiento será suficiente para permitir el funcionamiento de la planta termoeléctrica durante ocho días

#### **3.4.9. Depósito temporal**

Una pequeña proporción de los residuos que entran en la Planta no pueden ser recuperados o reciclados. Para esta mínima fracción para la que actualmente no existen procesos adecuados de tratamiento se ha previsto su almacenamiento temporal. Una prensa reduce su volumen antes de ser enviados al depósito de rechazos.

**Grafica 11: Proceso de Producción de Combustible Derivado de Residuos (CDR).**



### 3.5. COMBUSTIÓN DE LA FRACCIÓN INORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS (CDR) CON RECUPERACION DE ENERGIA.

Cuando los residuos sólidos o la biomasa se incineran, se efectúa una reacción química que combina su carbono con oxígeno del ambiente, formándose dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y combinando el hidrógeno con oxígeno formándose vapor de agua. Cuando la combustión es completa, o sea la biomasa se quema totalmente, todo el carbón contenido se transforma en  $\text{CO}_2$ . Sin embargo, los árboles y plantas que están creciendo capturan nuevamente el  $\text{CO}_2$  de la atmósfera, y, al usar la biomasa en forma sostenible, en términos netos, no se agrega  $\text{CO}_2$  a la atmósfera<sup>61</sup>.

La incineración de residuos requiere una gran atención al nivel de dominio de las condiciones de combustión. Una buena combustión se rige por la regla de las "3T": temperatura, tiempo de residencia y turbulencia. Estos parámetros generalmente se fijan en el momento de la concepción del horno, pero el que lo explota conserva el dominio de la temperatura haciendo variar la carga térmica, y el dominio del caudal de aire de combustión. La mala regulación de uno de estos parámetros puede generar condiciones inadecuadas de funcionamiento.

Debido a la composición heterogénea de la basura doméstica, el proceso de combustión se desarrolla en condiciones de exceso de aire. Durante la combustión, el carbono que contiene la basura se transforma en  $\text{CO}_2$ . De esta forma, un defecto de oxígeno podrá generar monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) por combustión incompleta del carbono. De la misma forma, un exceso de oxígeno provocará la generación de partículas inquemadas y productos incompletos de combustión (PIC).

En el proceso de incineración de residuos, se empleará la tecnología de lecho fluido, debido principalmente no solo por su eficiencia térmica y rendimiento termodinámico, sino por la eficacia en la protección del medio ambiente a través de la destrucción térmica de los contaminantes orgánicos contenidos en los residuos, principalmente de los compuestos formados por furanos y dioxinas, aplicando una técnica controlada de incineración sin regiones frías, ligada con la regulación de la potencia de la combustión a temperaturas superiores a los  $850^\circ\text{C}$ .

---

<sup>61</sup> Manuales sobre energía renovable: Biomasa/ Biomasa Users Network (BUN-CA). -1 ed. -San José, C.R.: Biomass Users Network (BUN-CA), 2002. pag 16

### 3.5.1. Fases en el proceso de incineración.

La incineración es un proceso de combustión controlada que transforma los RSU en materiales inertes (cenizas) y gases. El proceso de incineración consta de las siguientes fases<sup>62</sup>:

- Alimentación: los residuos pueden alimentarse de forma directa al horno o sufrir un proceso previo de separación de materiales inertes. La alimentación se puede realizar de forma discontinua o continua.
- Cámara de combustión: donde tiene lugar la incineración de residuos en exceso de aire a una temperatura entre los 800 y 1000°C. En ella existen elementos de soporte y recogida de cenizas.
- Cámara de post-combustión: su misión es la combustión completa de los gases de salida antes de que pasen al circuito de tratamiento de gases. A la salida de la cámara de post-combustión se permite el enfriamiento de los gases para evitar condensaciones.
- Tratamiento de gases: los gases de salida en la mayoría de los casos necesitan un tratamiento para eliminar contaminantes.

En resumen, los elementos que configuran el proceso de incineración del CDR son los siguientes:

- zona de descarga y almacenamiento
- zona de alimentación del horno
- zona del horno y cámara de combustión para una completa destrucción de los compuestos orgánicos
- zona de recogida y extracción de escorias
- sistema de refrigeración y caldera para la recuperación de energía
- zona de depuración de los gases de combustión
- zona de almacén de escorias y cenizas, u otros productos recogidos en los procesos de depuración
- zona final de evacuación de los gases depurados a la atmósfera

Adicionalmente, se deben instalar en el horno entradas de aire de combustión (aire primario), de aire secundario y en su caso, terciario; todas ellas ubicadas de forma estratégica y en condiciones de presión y temperatura adecuadas.

#### 3.5.1. Descarga y almacenamiento

El CDR es descargado en una fosa de almacenamiento temporal, en depresión atmosférica respecto al exterior, siendo suficiente que el aire de combustión se aspire de él, asegurando de esta forma evitar la

---

<sup>62</sup> La Incineración de Residuos: ¿Es una alternativa? - <<http://www.estrucplan.com.ar/Articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=287#?>>

aparición de malos olores en las zonas próximas a la instalación Adicional se dispondrá en la cota de la plataforma, junto al foso de almacenamiento, de una fosa de vertido. Para la carga de tolvas de alimentación a los hornos, se dispondrá de dos puentes grúa (uno en operación y otro en reserva) equipados con cucharas de doble cadena tipo pulpo especial para residuos urbanos.

### **3.5.2. Alimentación del horno**

La alimentación del CDR se realizará a través de 3 alimentadores por caldera mediante tolvas con forma de pirámide invertida, los cuales son conducidas hasta el conducto de carga por donde descienden los residuos, sin formar bóvedas e impidiendo la entrada de aire falso al horno; en donde se quemarán a una temperatura mínima de 850 °C, durante al menos 2 segundos, en presencia de un 6% de oxígeno, como mínimo después de la última inyección de aire de combustión, y la del aire de combustión necesario por medio de un ventilador de tiro forzado y otro de aire primario. Para la recirculación del gas se utiliza un ventilador por línea.

El conducto de carga incorporará una compuerta basculante destinada a aislar el horno de la zona del foso de descarga. La cual se cerrará durante las operaciones de puesta en marcha y parada para evitar la entrada de aire al horno. La unión entre el conducto y el horno dispondrá de un alimentador hidráulico de carrera variable cuya misión es regular el flujo de residuos al horno de incineración. Todos estos elementos estarán refrigerados por agua como protección frente al calor radiante del fuego del lecho.

### **3.5.3. Zona de horno y combustión de CDR**

El horno no sólo constituye el elemento soporte de la combustión, sino que también, produce el avance de las basuras y su volteo, permitiendo la mezcla del aire primario con los residuos a fin de garantizar una buena mezcla del combustible y del comburente.

En la zona del horno se pueden considerar tres fases:

- fase de secado, su duración depende del calor radiactivo existente, del grado de mezcla de la basura y de su aeración
- fase de combustión propiamente
- fase de terminación o postcombustión.

La cámara de postcombustión tiene como funciones principales:

- permitir la mezcla íntima entre el aire y los gases parcialmente quemados, a fin de obtener una combustión completa.

- por radiación, calentar y secar las basuras y permitir, por su gran inercia térmica, el mantenimiento de la temperatura necesaria para la correcta combustión de los gases.

Para el diseño de la cámara de combustión se deben contemplar medidas para impedir las adherencias de cenizas fundidas en las paredes del horno, la distribución correcta de los aires de combustión y la recolección de los finos y metales fundidos que se producen en la incineración. Debajo de cada zona de combustión, se han previsto unas tolvas para la recogida de los finos y metales fundidos. Por medio de un transportador de cadena en baño de agua se transportarán hasta el pozo de escorias en el extractor. Sin embargo, la función principal de estas tolvas será la distribución del aire primario de combustión a cada una de las zonas de combustión.

Son esencialmente dos los factores que determinan el aprovechamiento del calor generado en proceso de incineración:

- La recuperación del calor para la generación de la corriente eléctrica, de vapor de producción o de vapor de calefacción con el fin preliminar de recuperar el potencial energético que tienen ciertos residuos y además reducir los costes de explotación de la propia planta.
- El enfriamiento de los gases de combustión producidos en el horno a temperaturas aceptables para su depuración y descontaminación posteriores.

El diseño del horno deberá permitir el flujo regular de los residuos y una homogeneización mediante el reparto uniforme del aire de combustión en toda su superficie. Es así, como el calor generado en el horno se transportará a la caldera por medio de los gases de combustión.

#### **3.5.3.1. Aire de combustión**

El suministro del aire de combustión dispondrá de dos sistemas independientes: sistema de aire primario y sistema de aire secundario.

Para asegurar unas condiciones óptimas de combustión, es necesario aportar los caudales necesarios en cada sistema y al mismo tiempo, conseguir una relación óptima entre la cantidad de aire primario y secundario. El aire primario se aspirará de la parte alta del foso de residuos, mientras que el aire secundario se aspira del ambiente, en la parte alta del edificio de calderas.

Para un proceso óptimo de combustión, se ha previsto de un proceso de precalentamiento del aire de combustión primario hasta una temperatura de unos 150°C, mediante un precalentador de clavetas de by-

pass alimentado con vapor sobrecalentado. Los purgadores de vapor recogen los condensados producidos y los recirculan hacia el tanque de condensados para su reutilización.

El diseño de la salida del horno hacia la caldera produce una alta turbulencia que asegura una mezcla intensiva de los gases de combustión. En este punto se inyectará a alta velocidad el aire secundario que asegura una correcta mezcla en las condiciones de combustión.

#### **3.5.4. Zona de caldera**

Los gases resultantes del proceso de combustión llegan a la caldera donde se presentarán los siguientes procesos:

- Recuperación de los gases en forma de vapor sobrecalentado
- Enfriamiento de los gases, hasta una temperatura aproximada de 170°C
- Retención de parte de las cenizas volantes.

El calor producido en el horno es transportado hacia la caldera por medio de los gases de combustión. En las paredes de las cámaras, radiantes, sobrecalentadores, haces colectivos y economizadores, se transfiere el calor al agua de la caldera, convirtiéndose en calor. Posteriormente, el vapor producido se extrae de la caldera mediante una tubería para llevarlo al colector principal para su posterior utilización.

La caldera estará diseñada para la producción de vapor sobrecalentado y estará formada por cámara radiante, pantalla, sobrecalentador, banco de convección y economizadores. La cámara radiante deberá ser construida mediante paredes tipo membrana, con aletas soldadas situadas entre tubos adyacentes, lo que garantiza una óptima estanqueidad y minimiza el empleo de refractarios. La baja velocidad de los gases en su recorrido a través de la cámara radiante, hace que gran parte de las cenizas volantes caigan directamente al fondo del horno. Los sobrecalentadores estarán formados por paneles colgados de la estructura. El vapor circulará a contracorriente con los gases, sistema que produce el máximo intercambio de calor con la mínima superficie de calefacción.

El banco de convección esta formado por paneles similares a los del sobrecalentador, esta orientado a prevenir una vaporización del agua en su interior, manteniendo la temperatura del agua a la salida a unos 25°C por debajo de de la saturación. Como medida de precaución, el último paso del agua, donde el riesgo de vaporización es mayor, se debe rediseñar con un flujo ascendente, de modo que una eventual vaporización no ocasione un sellado por vapor en el circuito.

La caldera será de circulación natural, lo cual se produce debido a las diferencias de densidad de la mezcla agua-vapor en las diferentes zonas, con lo que no es necesario mantener un consumo energético adicional para producir la circulación.

El funcionamiento normal de la caldera con residuos requiere la utilización de quemadores auxiliares de gas, debido al alto poder calorífico de los residuos y a la temperatura de combustión requerida para el proceso. En un principio estos quemadores serán alimentados con gas natural, para luego ser alimentados por biogás.

#### **3.5.4.1. Quemadores auxiliares**

Para la puesta en marcha del horno, se realizará mediante quemadores auxiliares, hasta conseguir que la cámara de post-combustión alcance una temperatura de 850°C. Una vez que la cámara ya haya alcanzado la temperatura, se podrá alimentar el CDR al horno. Igualmente tan pronto como la combustión de CDR permita mantener la temperatura de los gases, se podrá reducir la carga de los quemadores y dirigir el excedente de combustible al proceso de cogeneración. El horno está provisto de dos quemadores iguales con una potencia total, entre ambas, equivalente al 60% de la máxima capacidad térmica del horno.

#### **3.5.5. Depuración de los gases de combustión**

Este proceso será explicado más ampliamente en la sección 3.8.

#### **3.5.6. Recogida y extracción de escorias**

En cada línea de combustión, las cenizas recogidas en las distintas tolvas de descarga del horno, así como las escorias (cerámicas, tierras, vidrio, objetos metálicos, etc.) que se forman como producto del proceso de incineración de los residuos, son conducidas a un canal formado por un depósito de plancha de acero en el que se mantiene una circulación de agua de refrigeración. Un rascador con cadena mediante tornillos sin fin o transportadores de paletas extrae las escorias y, tras conducir las por una rampa de escurrido, las entrega sobre una cinta transportadora en un depósito de almacenamiento. La escoria resultante no férrica se puede aprovechar para aglomerados asfálticos y la escoria férrica (chatarra) para usos industriales.

#### **3.5.7. Tratamiento de escorias**

El proceso de tratamiento de las escorias tiene como objeto la extracción de las fracciones valorizables contenidas en las escorias; que son la chatarra férrica y el aluminio. Esto a su vez permite obtener una

escoria final que después de un periodo de maduración se convierte también en fracción aprovechable como material de relleno para el sector de la construcción.

### **3.5.7.1. Separación de metales contenidos en escorias.**

El extractor de escorias bajo el horno de incineración descargará las escorias en una cinta transportadora en cuyo extremo se situará un separador magnético tipo overband, situado longitudinalmente a la cinta, encargado de separar los metales de gran tamaño contenidos en las escorias. Previo a su acumulación en un troje, los férricos separados se limpiarán de las escorias pegadas a ellos en una criba vibrante. El resto de las escorias no separadas en el overband se almacenarán durante unos 5 días en un troje de hormigón, periodo en el cual se producirá un secado de las escorias, necesario previo a su alimentación al proceso. Con ello se pretende minimizar las adherencias y atascos producidos por las escorias húmedas recién salidas del desescoriador.

Una pala cargadora se encargará de alimentar las escorias secas a la tolva de una criba de barras con una luz entre barras de 250 mm para separar aquellos elementos de gran tamaño no separados por el overband previo, y que no son deseables en el proceso. La descarga del material acumulado en las barras de la criba se realizará mediante un dispositivo hidráulico que inclinará a la sección cribante hasta que los gruesos caigan por su propio peso en un contenedor listo para su expedición a un vertedero.

La corriente no separada por la criba de barras caerá sobre un transportador reforzado encargado de dosificar el material al sistema de alimentación del tromel de clasificación por tamaños. Este tromel incorpora una serie de placas internas que voltean las escorias realizando no solo un correcto cribado de las mismas sino además, por abrasión, una limpieza de la chatarra presente.

- fracción no cribada o rebose del tromel. Compuesta básicamente por chatarra.
- Fracción cribada, compuesta básicamente por fracción mineral, vidrio y chatarra de pequeño tamaño.

#### **3.5.7.1.1. Fracción rebose del tromel**

Se descarga sobre un transportador de banda el cual pasa por debajo de un separador automático de chatarra férrica (overband) situado transversalmente a la cinta. La chatarra recogida es enviada a una cinta común de férricos que entrega sobre un contenedor. El resto de escoria no férrica se alimenta a una criba vibrante de barras con una luz de 60 mm.

La fracción menor de 60mm se une a la fracción < 40 mm recogida del tropel a través de 2 cintas transportadoras.

La fracción mayor de 60 mm se descarga en un contenedor listo para su expedición al vertedero.

#### **3.5.7.1.2. Fracción hundida o cribada del tromel.**

En cuanto a la corriente cribada del tromel, se somete a un proceso de extracción automática de chatarra férrica y no férrica.

En primer lugar se dispondrá de una cinta transportadora que recibirá la corriente directamente desde la descarga del tromel y sobre la cual se realizará una separación de chatarra férrica mediante un separador electromagnético (overband) situado transversalmente sobre la mencionada cinta más un tambor magnético de imán permanente en lugar del tambor de cabeza de la cinta. El conjunto de chatarra magnética seleccionada por el overband y el tambor magnético se dirige mediante un conjunto de cintas transportadoras al contenedor común de férricos.

El material no separado por el overband se descargará sobre una cinta que alimenta una criba vibrante con malla de 10 mm de luz. La función de la criba vibrante es limpiar de finos a la fracción de metales no férricos, además de distribuir los no finos por todo lo ancho de la cinta de alimentación del separador de corrientes de inducción (foucault) y mejorar así la eficacia de la separación.

La fracción de aluminio separada es transportada por cinta hasta un contenedor de almacenamiento de aluminio. La fracción no separada en el foucault se une mediante cinta a los finos < 10 mm en la cinta común de escorias con destino a maduración.

#### **3.5.8. Tratamiento de cenizas**

Las cenizas recogidas en el silo tras la etapa de depuración, se descargan en un transportador de tornillo y se dosifican volumetricamente a un mezclador-humectador. En este, las cenizas se humectan, se amasan y se descargan en un transportador de banda.

Las cenizas entran por la boca superior del mezclador, mientras que el agua se dosifica mediante una lanza con una boquilla especial para el buen reparto de esta con las cenizas. La mezcla se consigue por fluidificación mecánica de los productos, generada por un conjunto de palas mezcladoras a lo largo del equipo

atornilladas a un eje de rotación. El diseño de las palas permite el avance del material para su descarga, una vez mezclado, por la boca de descarga.

Un transportador de banda apoyado sobre rodillos recoge el material mezclado. Su funcionamiento es intermitente, actuando además de dosificador de equipo de prensado, como acumulador de ruptura entre el proceso de mezcla (continuo) y el proceso de mezclado (por cargas). Durante la maniobra de prensado, expulsión y colocación del saco, las cenizas se irán depositando en el acumulador que avanzará de forma intermitente para lograr una mayor acumulación de las cenizas. Esta banda transportará la ceniza de forma continua hasta un cajón alimentador que estará provisto de un nivel de paletas. Cuando la ceniza alcanza el nivel prefijado el alimentador avanzará vertiendo las cenizas en el alimentador hidráulico.

La cámara de prensado irá provista de un cajón capaz de alojar un big-bag donde se recepcionarán las cenizas, y de una mesa vibrante donde se apoyará el big-bag para conseguir un mejor asentamiento del material. Al alcanzar un volumen de cenizas en el big-bag, determinado por el número de cargas realizado por el alimentador, descenderá un plato prensador que realizará la compactación de las cenizas. Una vez producido el prensado, el plato subirá y el cajón que aloja el big-bag bajará, una vez desenganchado el saco mediante un expulsor se empujara el big-bag hasta una pista de rodillos que se pondrá en marcha automáticamente, donde se acumularán los big-bags.

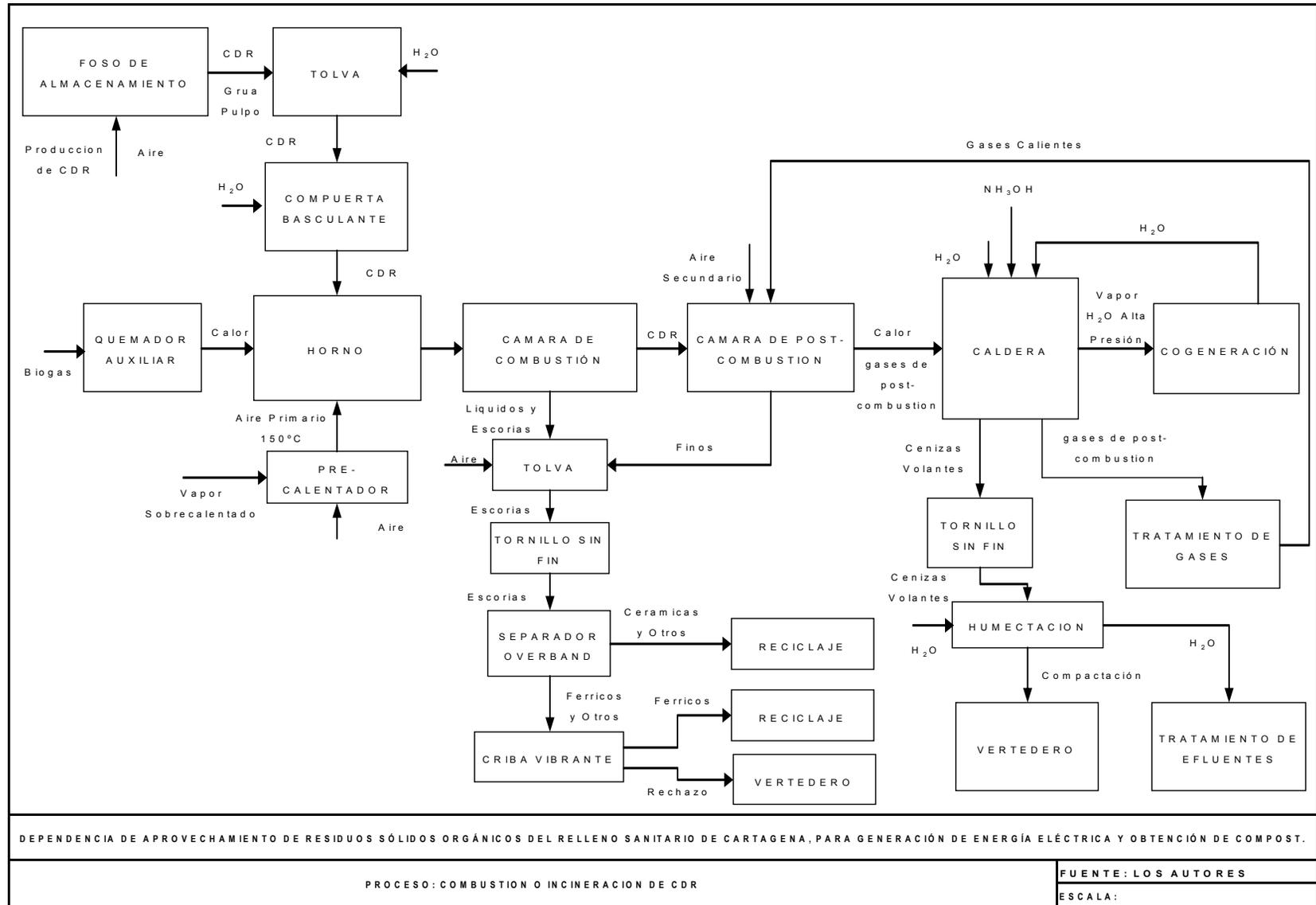
El expulsor retrocederá y ya estará listo para colocar un nuevo big-bag. Una vez situado el cajón subirá para repetir el ciclo de alimentación de cenizas. Durante el tiempo de prensa y extracción del big-bag, el transportador de banda, que irá dotado de un detector de nivel, ira avanzando a impulsos, llenándose. Una carretilla elevadora transferirá los big-bags al camión de expedición con destino a un depósito controlado de residuos especiales.

Dado que las exigencias del agua de humectación no son elevadas, las aguas utilizadas para el proceso de humectación procederán al depósito de aguas usadas.

### **3.5.9. Evacuación de gases depurados**

Los gases de combustión depurados serán extraídos hacia el sistema de ventilación de la planta por medio de dos ventiladores de tiro inducido.

**Grafica 12: Proceso de Combustión o Incineración de CDR.**



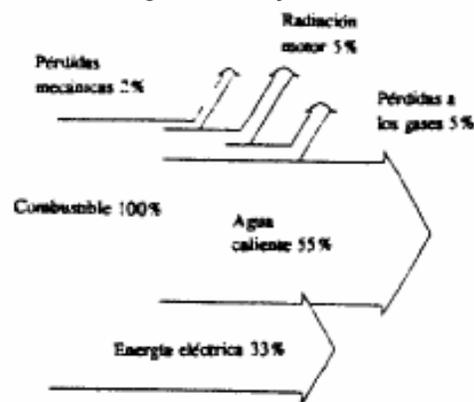
### 3.6. COGENERACIÓN ELECTRICA

El proceso técnico en la cogeneración eléctrica esta basado en los mismos principios de toda generación energética. La combustión de un recurso que permite el movimiento de sistemas y mecanismos capaces de producir energía para ser aprovechada por el ser humano en la aplicación de trabajo. Por cada 100 unidades de combustible, un motor genera entre 30 y 43 de electricidad, a la vez que aprovecha 55 y 42 unidades para usos térmicos. En esta tesitura, el rendimiento energético global es del 85%, valor infinitamente superior al de cualquier central eléctrica.

Requiere de un elemento base de consumo llamado combustible, un proceso de extracción de energía del elemento, usualmente un proceso de combustión, un sistema de convertibilidad de energía que permita su aprovechamiento mecánico y luego todo un equilibrado sistema de distribución para el uso propiamente dicho.

En el proceso de preparación y secado del combustible derivado de residuos (CDR), la humedad puede ser contrarrestada con un subproducto, clasificado como desecho sobrante del proceso de fábrica mismo, con impacto negativo sobre el ambiente, pues se maneja como desperdicio de fabricación: El vapor; el cual puede utilizarse como elemento base en la producción de energía a través de la combustión del CDR. Es así como la función del proceso de cogeneración es generar calor para el secado del CDR y energía eléctrica para consumo propio.

**Figura 2: Modelo de funcionamiento de una unidad de Cogeneración y sus emisiones.**



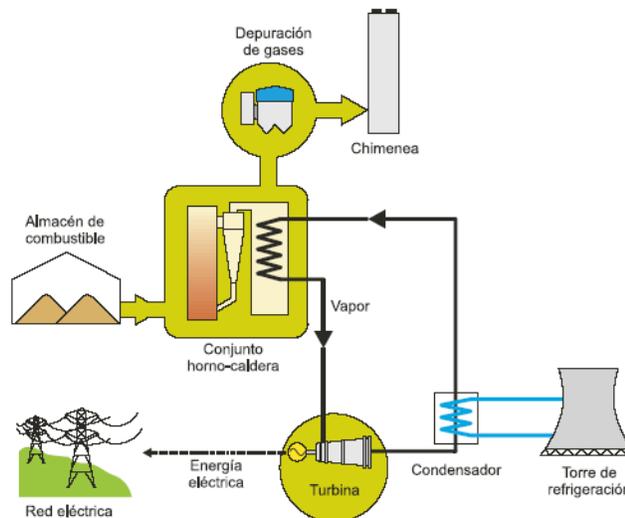
La figura superior expone un modelo clásico de funcionamiento de una unidad de cogeneración con un motor alternativo. Estos tienen una gran flexibilidad de funcionamiento en función de la demanda eléctrica y una gran posibilidad de usar gases residuales. Una característica de los motores es que los efluentes, gases de escape y agua de refrigeración de las camisas, salen a temperaturas moderadas.

### 3.6.1. Valorización o recuperación energética.

Los procesos de conversión energética a partir de los RU, de la biomasa o de cualquier combustible procedente de los residuos en general, consisten en romper las largas cadenas, a fin de eliminar la toxicidad y recuperar el calor. La energía generada por la biomasa procede, en última instancia, de la energía solar captada por los vegetales en el proceso fotosintético que dio origen a la reducción del carbono mineral y permitió el que se formaran los distintos tipos de moléculas orgánicas a través de los complejos mecanismos metabólicos de los seres vivos.

Por lo tanto, para llevar a cabo la valorización se emplean procesos de conversión energética realizados normalmente a través de la incineración mediante la conversión de un combustible sólido o líquido en gas. En el proceso de incineración, el calor producido en el horno se transfiere a la caldera por medio de los gases calientes de la combustión que transmite el calor al haz tubular para producir vapor recalentado a alta presión. Posteriormente este vapor puede utilizarse para alimentar a industrias cercanas, para suministrar calor y agua sanitaria a hospitales, colegios, ciudades o para producir energía eléctrica para el consumo propio en las instalaciones complejo, y el excedente enviarlo a la red eléctrica de distribución.

**Figura 3: Sistema de incineración con recuperación de energía.**



Fuente: BERMUDEZ AVITE, Jaime. La Gestión de los Residuos Sólidos Urbanos: Situación actual y perspectivas futuras. SOGAMA. 2004. 23p

En el caso de producir energía eléctrica, el vapor es conducido por un colector de alta presión desde la caldera hasta la turbina de vapor que mueve el alternador que genera energía eléctrica. El proceso de incineración con recuperación de energía está formado por otros elementos básicos del proceso como son el

condensador-refrigerador de vapor, el equipo desmineralizador de agua, el desgasificador, la depuración y evacuación de gases de la caldera.

### **3.6.2. Proceso de cogeneración eléctrica.**

El proceso de cogeneración esta integrado por 5 grandes pasos, los cuales se identifican a continuación:

- El primer paso es lo concerniente a la preparación del combustible, su acceso al proceso de preparación, y los mecanismos de ingreso a la combustión.
- Luego, en los hornos, que son los elementos que queman el CRD, éste se incinera produciendo calor y presión, se producirá con ello el vapor en la caldera, que es la base de la generación.
- Una vez transformado el CDR en vapor, éste es conducido al área de generación o de turbogeneradores, que como su nombre lo indica es el lugar donde se genera la energía.
- De ahí se conduce la energía a los transformadores, que son los elementos eléctricos que ordenan el flujo de electricidad, lo preparan para el servicio y lo conducen al sector de despacho o distribución.
- A partir de ahí, la electricidad se reparte en un bloque para el consumo interno (autoconsumo) y un bloque para la venta o servicio de terceros.

Previamente al proceso de cogeneración eléctrica, en el proceso de combustión, la energía contenida en el combustible derivado de residuos (CDR), nos permitirá realizar transformaciones de la energía contenida en los residuos la cual será procesada y transformada posteriormente. Este CDR se quema en un horno-caldera y la energía interna se transfiere en forma de calor al agua que circula por una extensa red de tubos que tapizan las paredes de la caldera, para posteriormente transportar la energía en forma de vapor de agua, el cual posteriormente será utilizado en el proceso de cogeneración.

### **3.6.3. Sistema de ciclo combinado**

Para el proceso de cogeneración eléctrica de la planta, se ha establecido la necesidad de un sistema de cogeneración de ciclo combinado (un ciclo combinado permite absorber el vapor generado en el ciclo simple, mejorando la recuperación térmica, mediante el funcionamiento de una segunda turbina de contrapresión), mediante la utilización de turbinas a gas y turbinas a vapor para producir electricidad, principalmente debido a que el proceso generaría un mejoramiento significativo en la eficiencia de la conversión eléctrica, a través de la recuperación y utilización del residuo caliente de alta calidad de las turbinas de gas en una caldera de

calentamiento de residuo. Este residuo caliente sería utilizado para producir vapor y posteriormente generar electricidad en las turbinas de vapor. El uso del residuo caliente que se genera en las turbinas de gas reduce el volumen de Gas de Residuo Sólido (GRS) requerido en el boiler.

Dentro del proceso de cogeneración, donde se utilizará un sistema de turbinas en ciclo combinado, se presentan los siguientes procesos.

### **3.6.3.1. Ciclo agua vapor y generación de energía**

La caldera se alimenta principalmente con los condensados que se obtienen de los evaporadores y calentadores que por lo general se hacen pasar por un desareador con el objeto de expulsar aire y otros gases disueltos que pudieran causar corrosión en la caldera y tuberías.

El aumento de la temperatura del agua que circula a través de la caldera, es tal que pasa al estado gaseoso en forma de vapor a alta presión (el agua se encuentra en un circuito cerrado). Lugar donde ocurre el primer proceso de transformación energética: la energía interna del combustible se ha transformado en energía interna del vapor de agua.

Las funciones de los equipos integrantes del ciclo de agua vapor son:

- Utilizar el vapor producido en el horno- caldera para la producción de energía
- Suministra vapor, procedente de la extracción de la turbina, a los distintos consumidores (precalentadores de aire, desgasificador, etc.)
- Recuperar los condensados y con ellos alimentar de nuevo a la caldera cerrando de este modo el ciclo.

El ciclo de vapor esta optimizado para conseguir la máxima producción posible de energía eléctrica, compatible con los criterios de alta disponibilidad de la instalación y coste económico aceptable para el servicio a que se destina la instalación.

- características de vapor sobrecalentado producido en la caldera: 45 bar y 400°C
- turbina con una extracción no regulada, con una presión mínima de 4 bares, destinada a la primera etapa de precalentamiento del aire, al precalentamiento de los condensados y a la desgasificación.
- Precalentamiento del aire de combustión en dos etapas: primera con vapor a 4 bar hasta 100°C, segunda hasta 150°C (si es necesario) con vapor extraído del calderón de la caldera a 51 bar.

La puesta en marcha de la planta desde la situación inicial (turbina parada, suministro eléctrico externo) implica el arranque progresivo de la caldera. Durante las primeras etapas del arranque no se produce vapor en condiciones adecuadas para alimentar la turbina. En este caso se envía el vapor al colector principal y de este al sistema de by-pass de la turbina y al condensador. De este modo el vapor se recupera evitando el coste de su pérdida a la atmósfera.

#### **3.6.3.1.1. Colector principal**

El colector principal ejerce, además de las funciones propias de un colector, las de separador de condensados por medio de un purgador. El vapor en el colector principal tiene una temperatura de 400°C y una presión aproximada de 44 bares.

El sistema de control de la turbina mantiene constante la presión del colector. En caso de turbina parada, la presión se controla a través de la válvula de by-pass de la turbina.

Del colector principal salen 4 tuberías, una hacia la turbina, la segunda hacia la válvula de by-pass de la turbina, la tercera alimenta de vapor a los eyectores del grupo de vacío del aerocondensador y la última alimenta al vapor del colector secundario en caso de que la turbina esté disparada o a baja carga. En esta última tubería existe una estación reductora de presión-temperatura en la que la presión del vapor se reduce desde los 44 bar hasta 4 bar, y la temperatura se reduce desde los 400°C hasta los 180°C. La reducción de temperatura se consigue mediante inyección de agua tratada procedente de la línea de tanque de agua de alimentación (130°C).

#### **3.6.3.1.2. By-pass de turbina**

La tubería de by-pass de la turbina va desde el colector principal al aerocondensador e incorpora una estación reductora de presión-temperatura en la que la presión del vapor se reduce desde los 44 bar hasta 0.8 bar, y la temperatura se reduce desde los 400°C hasta los 120°C. La reducción de temperatura se consigue mediante la inyección de agua tratada procedente de la línea de agua de alimentación (130°C). La estación reductora de presión tiene una capacidad de admisión del 100% del vapor producido en la caldera en el punto MCR.

Durante el arranque y cuando las condiciones de vapor no son las adecuadas para su admisión en la turbina, o cuando la turbina no se encuentra en funcionamiento, se abre el by-pass reduciéndose la presión hasta valores admisibles por el condensador.

### **3.6.3.1.3. Generadores de energía**

Para la generación de energía eléctrica, se hace necesaria de la operación de maquinaria especial, cuyo trabajo consiste en transformar la energía contenida en los vapores producto del proceso de combustión y del biogás producto de la digestión anaerobia (biometanización) de la fracción orgánica de los residuos.

En consecuencia, se hace necesaria la implementación de turbinas a vapor, turbinas a gas y de generadores de energía a gas.

#### **3.6.3.1.3.1. Turbina a gas**

El funcionamiento de la turbina de gas, acompañado del funcionamiento de la turbina a vapor, resulta la mejor combinación en el proceso de conversión eléctrica. Mediante la recuperación y valorización del vapor caliente de alta calidad generado a partir del funcionamiento de la turbina de gas, es posible recalentar los vapores inducidos a la turbina de vapor, aumentando el caudal de presión de los gases, produciendo una mejora en la eficiencia de generación eléctrica tanto para la turbina de vapor como para la turbina de gas.

Para ello, la turbina de gas funcionara en un principio, alimentada de gas natural, para posteriormente sustituir el gas natural por biogás generado del proceso de biometanización de los RU. Dentro de la turbina se quemará el biogás con grandes excesos de aire, lo que provocará la salida de los gases de combustión a gran velocidad. Generando electricidad gracias a la transformación de la energía cinética de los gases en energía mecánica que hace girar el rotor generando energía eléctrica. Así mismo, los gases producto de la combustión serán insumo aprovechado para el funcionamiento de la turbina a vapor.

#### **3.6.3.1.3.2. Turbina a vapor**

La turbina a vapor (de tipo reacción, multietapa y de condensación) será capaz de admitir la cantidad máxima continua de vapor producida por la línea de incineración (MCR 100%: maximum continuous rate), considerando un precalentamiento del aire de combustión a 100°C y de los vapores generados de la caldera gracias a la acción del gas caliente procedente de la turbina a gas.

En el proceso de combustión, las calderas convierten el calor producido por la incineración del CDR en vapor. Este vapor vivo sobrecalentado producido en las calderas es transportado a través de tuberías donde entra a gran presión en los primotores que producen trabajo y descargan este vapor a presiones reducidas. Estos primotores son por lo general turbinas (turbogeneradores) de condensación de tipo multietapa constituidas por

tres extracciones de vapor, y su expansión hace girar los álabes (paletas curvas) de la misma; donde ocurre la segunda transformación energética: la energía interna del vapor de agua se ha transformado en movimiento, es decir, en energía cinética o mecánica.

La turbina, directamente acoplada a un generador eléctrico, es donde tiene lugar la última transformación energética. El generador está constituido por un alternador síncrono donde se efectúa el proceso de transformación final: Cuando una bobina de cobre gira en el seno de un campo magnético, generado por un imán o electroimán, se genera energía eléctrica. Aunque, en realidad, no son las bobinas que lo contienen las que giran sino los electroimanes. El giro de los electroimanes en el alternador se produce gracias a la turbina ya que el eje o rotor de la misma, mediante unos multiplicadores de revoluciones, está unido al rotor del alternador. Es la tercera transformación energética: la energía mecánica del eje de la turbina-rotor se ha transformado en energía eléctrica.

Después de accionar las turbinas, el vapor que sale se aspira por medio de 3 bombas de condensado donde se enfría y pasa a la fase líquida (para su reutilización) en el condensador, capaz de condensar 162 Tm/hora; lugar de la última transformación energética ya que la energía interna del vapor de agua se transforma, en última instancia, en energía interna del medio ambiente. Para esto es necesario llevarla hasta un desgasificador de condensados capaz de desgasificar 200 Tm/hora a 140 grados centígrados aportando 2,4 Tm/s de agua de refrigeración por medio de las bombas de agua de circulación. Esta agua se enfría por medio de 5 torres de tiro forzado que, a través de las correspondientes bombas de alimentación, se introduce en el economizador, para posteriormente mediante bombas de recirculación, regresarlas a la caldera.

El vapor de escape, usualmente con presiones de 0.8 a 1.7 Bars, se usa en el proceso mismo de la fabricación del CDR, y en calentar el agua que alimenta las calderas en el desareador. Todos los sobrantes de vapor vivo que se dan por momentos y los de escapes no aprovechados se descargan a la atmósfera, los cuales forman parte de la pérdida energética que tiene lugar en el proceso y constituyen en energía interna del medio ambiente.

#### **3.6.3.1.3.2.1. Funcionamiento de la turbina**

La turbina funcionará en dos modalidades:

- a. En control de velocidad. Sincronismo: Cuando el alternador está sincronizado con la red, suministrando la energía neta producida por la planta de incineración, la turbina puede admitir todo el vapor que no exceda los límites físicos del turbogrupo.

- b. En isla, cuando no es posible exportar los excedentes eléctricos: En esta situación, la turbina genera la energía correspondiente al consumo eléctrico interno de la planta. El exceso de vapor se despresuriza y enfría hasta las condiciones de trabajo del aerocondensador.

Funcionando en sincronismo el sistema de control de turbina es capaz de admitir el cambio de carga desde el MCR hasta la condición de isla sin parar el grupo por sobrevelocidad, sobretensión u otras causas.

La potencia generada por la turbina, se transforma en electricidad mediante un alternador síncrono trifásico, conexionado en estrella. El alternador lleva incorporado equipos para excitación, sincronización, y protecciones adecuadas para poder interconectar en paralelo con la red exterior, mediante un transformador – elevador de tensión con tal de exportar a la red el excedente energético generado por la planta.

#### **3.6.3.1.4. Colector secundario.**

El colector secundario, al igual que el principal, dispone de un purgador para separar los condensados que se acumulan en él. El vapor en su interior se halla a una presión de 5,6 bar y 181 °C (con la instalación al 100% de la carga). Del colector secundario parten dos tuberías principales, una a los precalentadores de aire y otra alimenta al desgasificador.

#### **3.6.3.1.5. Precalentador de aire.**

El vapor procede del colector secundario y entra en el precalentador en su segundo cuerpo. Los condensados del segundo cuerpo del precalentador se recogen en el depósito de expansión del precalentador. Desde el cual pasan al primer cuerpo del precalentador, donde se enfrían hasta unos 70°C y son conducidos hasta el depósito de condensados.

#### **3.6.3.1.6. Aerocondensador.**

La instalación de condensación comprende los equipos y complementos necesarios para condensar el vapor de escape de la turbina o el procedente de las calderas de vapor por el by-pass y empleando únicamente aire como medio refrigerante.

la instalación consta básicamente de los intercambiadores vapor/aire dispuestos en forma de tejado a dos vertientes, con los extremos cerrados por paredes de chapa formando un recinto, en cuya parte inferior se alojan los grupos motoventiladores y que impulsan el aire al interior de aquel, obligándole a atravesar los haces tubulares aleteados a corriente cruzada.

El aerocondensador es de ventilación forzada y se ha diseñado para una presión de trabajo de 0.1 bar y una temperatura del aire ambiente de 26°C que corresponde a la temperatura media de las máximas. Otros componentes principales de la instalación son las bombas y el depósito de condensados, los grupos generadores de vacío y las regulaciones de nivel y presión/temperatura ambiente. El vapor procedente de la tubería general se distribuye a los elementos condensadores a través de un colector único a modo de cabezal común.

Los intercambiadores son dos tipos distintos y están conectados en serie de forma que en los primeros elementos condensadores (circulación vapor-condensado equicorriente) la condensación es parcial, completándose en los segundos elementos, donde el vapor circula a contracorriente con el condensado, recogiendo estos en un colector inferior desde donde se conduce al depósito de condensados. La cámara superior de los segundos elementos se conecta al sistema de vacío por eyectores para la extracción de gases inertes (incondensables).

Los condensados son recogidos por unos colectores y llevados al depósito de condensados. Estos condensados son impulsados mediante dos bombas hacia el desgasificador, pasando con anterioridad por el condensador del vapor del equipo de vacío del aerocondensador y por el condensador de vapor de cierres de turbina, antes de llegar al tanque de alimentación.

Las variaciones de temperatura ambiente y caudal de vapor se controlan por cambio de velocidad (dos velocidades) de los motores de los ventiladores, manteniendo constante la presión de condensación, estableciéndose en consecuencia en cada momento la marcha de mínimo consumo eléctrico de los motores para que la presión se mantenga constante.

El equipo de condensación, es suficiente para la condensación del vapor producido en una línea de incineración. El diseño tiene en cuenta la situación más desfavorable de la llegada de vapor que es aquella en que el turbogenerador está parado.

#### **3.6.3.1.7. Desgasificador y tanque de agua de alimentación.**

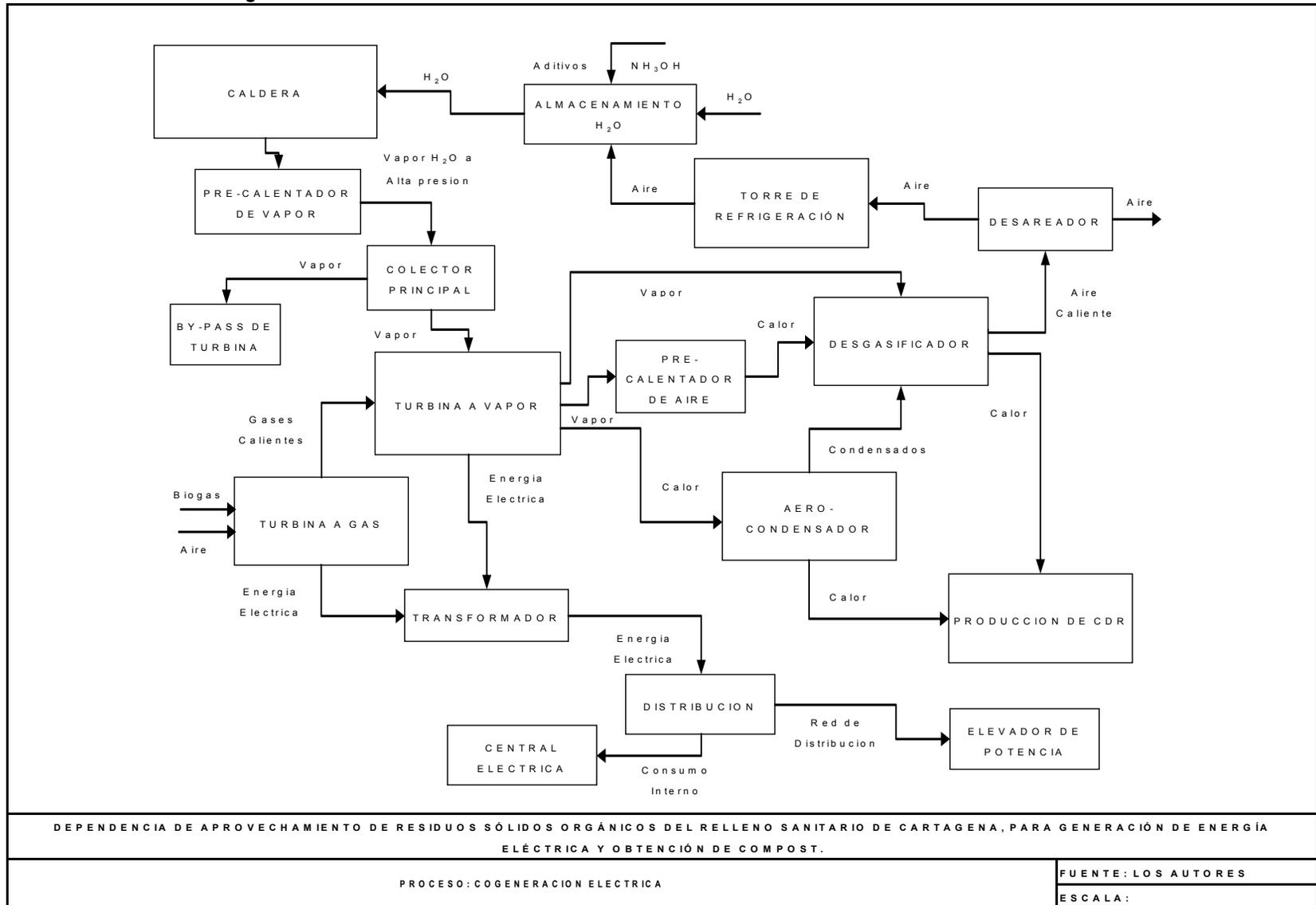
Este equipo es el “pulmón” del circuito del agua, vapor y condensados, pues en él convergen todos los equipos directa o indirectamente. En un mismo equipo se integra el desgasificador y tanque de agua de alimentación. El desgasificador, en la parte superior, del equipo, recibe la aportación necesaria de vapor, al objeto de desgasificar y mantener la temperatura de 130°C del agua de alimentación. El vapor utilizado procede del colector secundario y se utiliza para desgasificar las aportaciones de agua tratada nuevas y los condensados procedentes del aerocondensador.

#### **3.6.3.1.8. Bombas de agua de alimentación.**

La caldera se alimenta con el agua tratada procedente del tanque de agua de alimentación, la cual se halla a una temperatura de 130°C. Se instalan dos bombas centrífugas con motor eléctrico, cada una para el 100% de capacidad de la caldera. Estas bombas elevan la presión del agua del tanque de alimentación y la impulsan a las calderas. Durante el recorrido y antes de su llegada a la caldera, el agua es aditivada con secuestrantes de O<sub>2</sub> e inhibidores de incrustaciones (hidracina, fosfatos o similares).

Es preciso aclarar que dentro de este proceso, no es la única pérdida energética que tiene lugar, otra pérdida energética se produce, por ejemplo, en la caldera: la energía interna del orujillo no se transforma completamente en energía interna del vapor de agua ya que el medio ambiente que rodea a la caldera también aumenta su temperatura, es decir, su energía interna. Al final del proceso, toda la energía interna del CDR se ha transformado en otras formas de energía: entre un 20 y un 30% se ha transformado en energía eléctrica, mientras que el resto pasa a ser fundamentalmente energía interna del medio ambiente.

Grafica 13: Proceso de Cogeneración Eléctrica.



DEPENDENCIA DE APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS DEL RELLENO SANITARIO DE CARTAGENA, PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y OBTENCIÓN DE COMPOST.

PROCESO: COGENERACION ELECTRICA

FUENTE: LOS AUTORES

ESCALA:

### **3.7. TRATAMIENTO DE EFLUENTES, LÍQUIDOS DE PRECOLACIÓN O LIXIVIADOS**

En la Planta se generarán aguas residuales procedentes de diferentes procesos (lixiviados del depósito de rechazos, excedentes en la deshidratación de la materia orgánica, aguas de limpieza, etc.). Antes de ser vertidas a la red de saneamiento de la ciudad o a los cuerpos de agua, deben pasar por un proceso de depuración, en la que se someten a una combinación de tratamientos físicos y biológicos que eliminan su potencial contaminante.

Pero antes, para el tratamiento de los efluentes procedentes del proceso de digestión anaerobia, se hace necesario analizar la posibilidad de realizar previamente un análisis químico del efluente, evaluando los contenidos de DBO (demanda bioquímica de oxígeno) y los sólidos solubles totales (SST) para determinar sus propiedades nutricionales y su potencial para ser utilizado como biofertilizante y aplicarse en las áreas dedicadas a la producción de pasto.

De igual manera, para aquellos efluentes que no puedan ser utilizados como biofertilizantes, es necesario tratarlos mediante un proceso físico-químico de coagulación-floculación con deshidratación final de fangos, realizando un pretratamiento de los efluentes provenientes de las purgas de los lavados de gases de secaderos y de los lixiviados de los fosos de recepción de los residuos sólidos. Posteriormente se ejecuta un tratamiento secundario biológico y un terciario de afinamiento, constituido por uno de fino y una osmosis inversa a través de la dosificación de aditivos y reactivos.

Para mas detalle, el proceso por el que pasa el agua en la planta es el siguiente:

#### **3.7.1. Tratamiento de efluentes**

##### **3.7.1.1. Tratamiento físico de desbaste**

Elimina suspensiones gruesas y hojarascas, mediante la utilización de rejas automáticas, situadas en serie. Estas rejillas estarán dotadas de un sistema de lavado que mantiene constante la limpieza de su fina malla. Posteriormente a través de bombas hidráulicas, se transportará el agua hasta el siguiente paso.

##### **3.7.1.2. Decantación – floculación**

En este proceso se realizan dos pasos diferentes; La floculación es la agrupación de las partículas al ponerse en contacto unas con otras, agrupación que es favorecida por productos especiales: los floculantes. De esta

forma, las partículas, ya de mayor tamaño, sedimentan y pueden ser recogidas posteriormente. En el fondo de los decantadores se acumulan los fangos, que son extraídos automáticamente.

### **3.7.1.3. Filtración**

En este proceso el agua tratada traspasa unos filtros especialmente diseñados para captar las partículas en suspensión que permanezcan luego del proceso de decantación. Posteriormente se realiza un lavado con aire y agua.

### **3.7.1.4. Deshidratación de fangos**

Los fangos procedentes de la decantación, son transportados hacia la zona de deshidratación, donde el proceso es realizado mediante bacterias anaerobias, produciendo biogás que será transportado al gasómetro de la central. El residuo resultante será transportado a la zona de elaboración de CDR para su posterior valorización.

### **3.7.1.5. Dosificación y adición de reactivos**

Un último paso en el tratamiento del agua consiste en la adición de una serie de reactivos que acaban de dejar el agua en condiciones óptimas. La dosificación es automática en función del volumen de agua. Los productos que se utilizan son: cloro, sulfato de alúmina al 8 % y polielectrolito.

En cuanto al aire generado de todos los procesos, es depurado por un biofiltro. Este equipo consta de un relleno vegetal de corteza de pino tratada sobre la que se desarrolla una biopelícula que elimina las partículas y sustancias causantes de olores

## **3.7.2. Tratamiento de aguas de condensación**

### **3.7.2.1. Condensación y refrigeración**

El vapor de la turbina, o en su caso el derivado, se condensa en un intercambiador enfriado con agua, la cual se recircula a través de un sistema de refrigeración en donde se disipa el calor de condensación. El ciclo térmico se cierra mediante el conjunto de colectores, moto-bombas, depósitos y una planta de desmineralización de agua que, junto con tuberías de vapor, agua y condensados, de lugar a un ciclo cerrado con unas pérdidas de agua mínimas.

### 3.7.3. Tratamiento de aguas residuales

La formación de las incrustaciones es sumamente perjudicial y peligrosa, ya que disminuye la conductividad y presenta riesgo de explosión, puesto que al disminuir el paso de calor por unidad de superficie y tiempo, ha de forzarse la combustión para mantener un nivel de temperatura y presión en el vapor producido.

En las calderas multitubulares, en las cuales el riesgo de explosión es mínimo por no existir grandes acumulaciones de agua, presentan la particularidad de la reducida sección de los tubos de agua, que exigen una pureza de la misma suficiente para eliminar la más remota posibilidad de formación de depósitos.

### 3.7.4. Tratamiento de aguas de alimentación

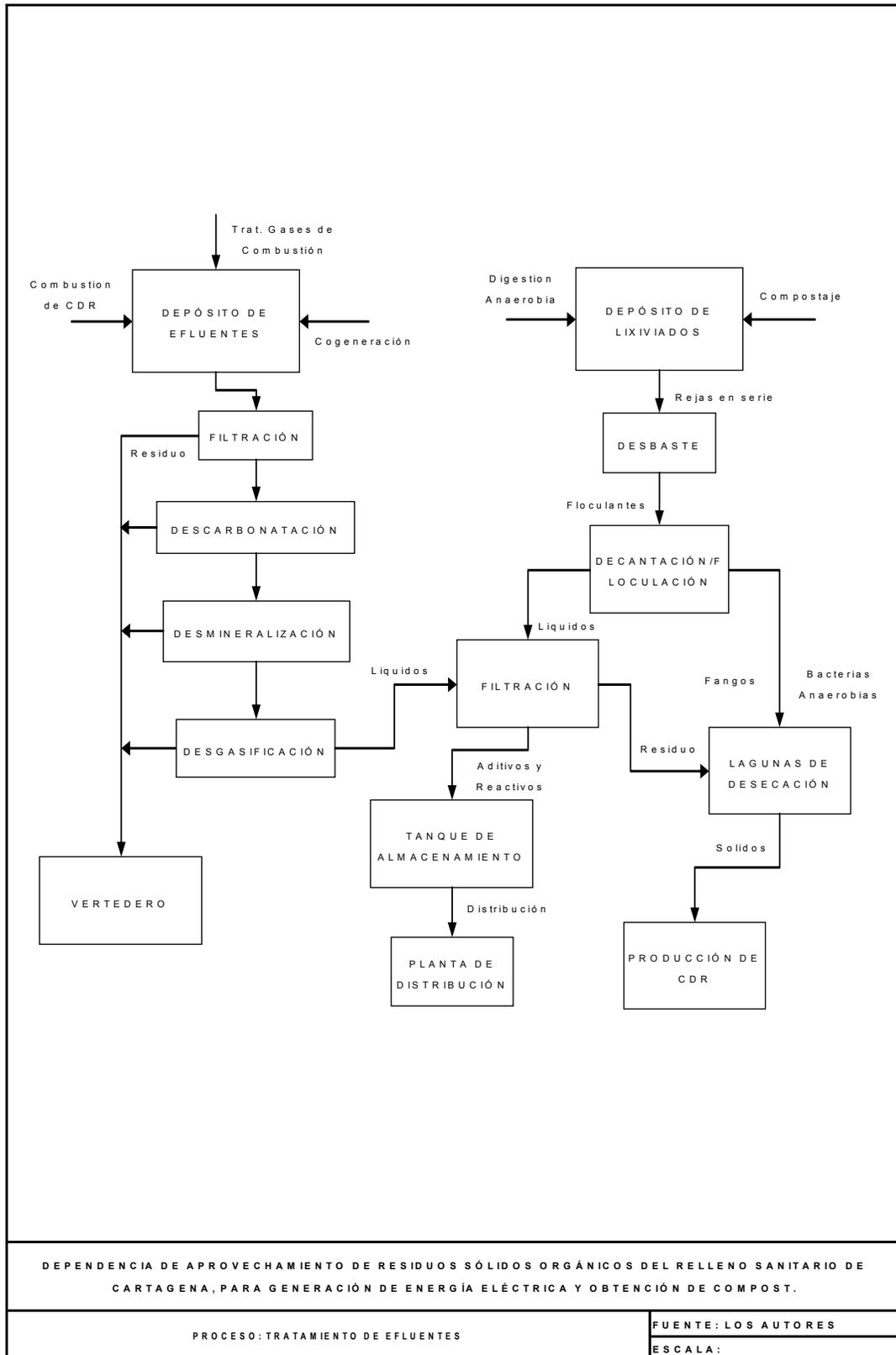
La preparación del agua destinada a la alimentación de las calderas se compone de varios procesos que podemos resumir como sigue:

- Tratamiento inicial: Filtración
  - Eliminación-descarbonatación
  - Eliminación de sustancias orgánicas
- Depuración-desmineralización
- Tratamiento final: desgasificación

Por esta razón, el proceso de desmineralización de agua llevará tres cambiadores en serie, uno catiónico, otro aniónico y el tercero desilicante, teniendo en cuenta el carácter muy débil del ácido silícico. La desgasificación de las aguas destinadas a la alimentación de las calderas se conoce con el nombre de desaireación, ya que los gases que se tratan de eliminar son los del aire disueltos en el agua. Ésta se realiza principalmente por procedimientos mecánicos y térmicos:

- En los procedimientos mecánicos, se pulveriza o se bate el agua en un recipiente en el que se mantiene un pequeño vacío. El desprendimiento del aire se favorece con una ligera elevación de temperatura del agua.
- En los procedimientos térmicos, aunque similares, interviene como factor principal la temperatura. El agua se lleva hasta ebullición a 95 C° en los desgasificadores en los que existe una ligera depresión. La ebullición se mantiene durante breve tiempo.

**Grafica 14: Proceso de Tratamiento de Efluentes.**



### 3.8. TRATAMIENTO DE GASES DE COMBUSTIÓN

Posteriormente al proceso de combustión de la fracción inorgánica (CDR) de los residuos sólidos, se producen gases producto del proceso de incineración, dentro de los cuales se pueden encontrar:

- gases tales como el CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub> y el oxígeno no utilizado en la combustión;
- metales pesados (plomo, cadmio, arsénico y mercurio).
- compuestos orgánicos (clorobenzenos, clorofenoles, hidrocarburos poliaromáticos (PAH) y dioxinas)
- partículas de polvo más o menos finas cuya concentración antes de su depuración es del orden de 5 a 10 g/Nm<sup>3</sup>. Estas partículas de polvo están constituidas esencialmente por sales minerales o metálicas, y en ocasiones por partículas inquemadas.
- gases procedentes de la composición de los residuos incinerados, principalmente se trata de cloro, ácido clorhídrico, óxidos de azufre y de nitrógeno.

Uno de los mayores problemas en la conversión térmica de residuos es la liberación de contaminantes orgánicos. Es por ello que, estos contaminantes tienen que ser mantenidos en un mínimo, y además, no deben exceder un límite. El límite se expresa como equivalente tóxico T.E.<sup>63</sup> para permitir una aplicación general de evaluación de varios isómeros de dioxinas y furanos en términos de toxicidad.

Las modernas técnicas de tratamiento de gases actualmente en uso logran una medida de emisiones de dioxinas muy inferior a 0,1 ng TE m<sup>3</sup>. Para ello estos procesos de tratamiento deben extenderse desde la fase primaria (incineración) al filtro de control al final del tratamiento de gases aguas arriba de la chimenea a través de la optimización de la zona de fuego mediante el control de la combustión de forma que niveles muy bajos de dioxinas sean detectables en el gas caliente puro.

En la actualidad, la mejor tecnología ambiental disponible para el tratamiento de gases consiste en: precipitadores electrostáticos y filtros húmedos para la eliminación de los metales pesados, ácido clorhídrico y dióxidos de azufre, y un sistema catalítico de depuración de gases de combustión que reduce los óxidos de nitrógeno (NOx), las dioxinas y furanos con un alto grado de eficacia.

Para la elección del sistema de tratamiento de gases a implementar, se evaluaron las distintas características de cada sistema, identificando sus costes de instalación, costes de operación, la eficiencia en la captación de

---

<sup>63</sup> Reinman, Dieter O. Director del departamento de gestión de residuos del estado de Bamberg. Tecnología de Eliminación de Dioxinas. SOGAMA.

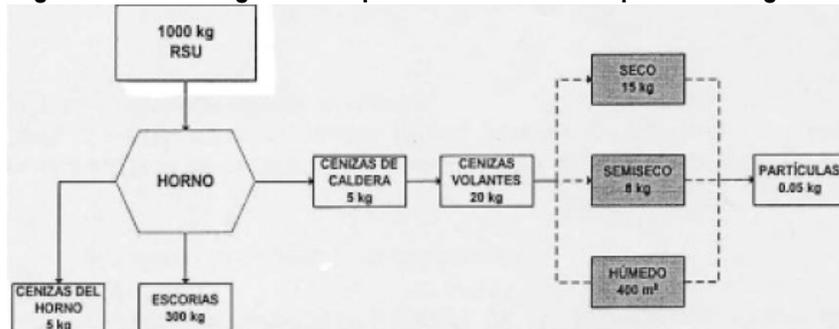
dioxinas, furanos y otras sustancias tóxicas, y el potencial de calor de los gases tratados. En la siguiente tabla se resumen las diferentes características evaluadas.

**Tabla 29: Principales características de los sistemas de tratamiento de gases.**

	SECO	SEMISECO	HUMEDO
<b>COSTE DE INVERSIÓN</b>	Bajo	Medio	Medio-Alto
<b>COSTE DE OPERACIÓN</b>			
Consumo de cal	Medio	Bajo	Bajo
Consumo de sosa	Nulo	Nulo	Nulo
Consumo de energía	Bajo	Medio	Medio
Necesidad mantenimiento	Muy baja	Baja	Media
<b>EFICIENCIA CAPTACIÓN</b>			
Polvo	Muy alta	Muy alta	Alta
HCl + HF	Muy alta	Muy alta	Muy alta
SOx	Media	Media	Baja
NOx	Baja	Baja	Nula
Metales pesados	Muy alta	Muy alta	Media
Hidrocarburos	Muy alta	Muy alta	Media
<b>POTENCIAL DE CALOR</b>	Alto	Medio	Muy alto

Fuente: ELIAS, Xavier. La Incineración de Residuos y su Adecuación a la Resolución 0058. 2º parte. Impacto Ambiental, Medidas Correctoras y Legislación Comparada. p22.

**Figura 4: Residuos generados por los sistemas de depuración de gases**



Fuente: ELIAS, Xavier. La Incineración de Residuos y su Adecuación a la Resolución 0058. 2º parte. Impacto Ambiental, Medidas Correctoras y Legislación Comparada. p26.

Para los propósitos de funcionamiento de la planta, se empleará un sistema de reducción de NO<sub>x</sub> basado en un sistema de recirculación parcial de los gases de combustión en el horno a 850°C y un sistema de reducción no catalítica selectiva (SNRC), apoyado en un sistema de lavado semi-seco; ya que, a igualdad de rendimiento, genera la menor cantidad de residuos.

### **3.8.1. Sistema de reducción de NO<sub>x</sub>**

Para las cantidades de NO<sub>x</sub> contenidas en los gases de escape procedentes de la combustión de CDR, serán tratadas y eliminadas mediante la incorporación de dos sistemas complementarios para la reducción de NO<sub>x</sub>:

- Recirculación parcial de los gases de combustión una vez depurados
- Reducción no catalítica selectiva de los óxidos de nitrógeno

#### **3.8.1.1. Recirculación de los gases de combustión.**

El proceso de recirculación de los gases de combustión consiste en una extracción parcial de gases (entre un 10% y un 15% del caudal total de los gases) a la salida del ventilador de tiro inducido y su posterior inducción, por medio de un ventilador de recirculación, en la cámara de post-combustión justo por encima del punto de inyección de aire secundario. Por medio de este sistema, se logra reducir aproximadamente un 10% de la cantidad de aire de combustión requerido, y en consecuencia la aportación de N<sub>2</sub> al sistema.

#### **3.8.1.2. Reducción no catalítica selectiva de los óxidos de nitrógeno (snrc)**

El proceso SNRC esta basado en la reducción no catalítica selectiva de los óxidos de nitrógeno (NO y NO<sub>2</sub>) a elevadas temperaturas (950-1000°C) utilizando entre otros reactivos posibles, una solución acuosa de amoníaco (25%), como agente reductor. El sistema estará compuesto por:

##### **3.8.1.2.1. Estación de recepción y descarga.**

El proceso de descarga se inicia con la conexión de la estación de descarga a las bridas del sistema (manguera de líquido y de retorno de vapor), que por seguridad deberá estar puesta a tierra antes de iniciar la operación. Ambas mangueras irán conectadas al tanque de almacenamiento. La zona de conexión de mangueras a la cisterna dispondrá de una losa rebajada que servirá como bolsa de retención de posibles derrames de amoníaco.

Antes de iniciar el proceso de descarga, la presión de vapor en la cisterna ha de ser controlada. En el caso de superarse la presión establecida en el set point, la sobrepresión se eliminará a través de la válvula de alivio del tanque. Una bomba de descarga trasvasa la solución de amoníaco de la cisterna al tanque de almacenamiento.

#### **3.8.1.2.2. Almacenamiento de amoniaco.**

El almacenamiento de la disolución de amoniaco (al 25%) se realiza en un tanque de acero inoxidable.

- en caso de sobrepresión, los vapores de amoniaco van a un absorbedor. Este consta de un tanque con agua desionizada.
- En caso de depresión, entraría aire del exterior del tanque.

Un área cubierta y cerrada por tres de los cuatro vientos protegerá el tanque de la acción directa del sol, permitiendo además una ventilación adecuada evitando acumulaciones de vapor.

#### **3.8.1.2.3. Dosificación de amoniaco.**

El sistema de dosificación está formado por dos bombas, una de ellas en reserva, ambas dotadas con variador de frecuencia para ajustar la cantidad de amoniaco a inyectar en función de la concentración de NOx en la chimenea.

#### **3.8.1.2.4. Inyección de amoniaco.**

La inyección del amoniaco en la caldera se realiza a través de unas lanzas de inyección ubicadas en uno o varios niveles (de 1 a 3 en función de la tecnología seleccionada). Estos niveles se sitúan en el punto de la caldera en el cual la temperatura de los gases de combustión se sitúa en el rango entre los 950-1000°C. Para la determinación de este punto es necesario un estudio de modelización de perfiles de temperatura y distribución de gases en el horno-caldera.

El número de lanzas por nivel también depende de la tecnología escogida (entre 4 y 12). El control de nivel de inyección se realiza en función de la temperatura, lo que permite trabajar siempre en el rango óptimo de temperaturas de gases, y consecuentemente optimizar el consumo de amoniaco. En el caso de las tecnologías con un único nivel de inyección, suplen varios niveles por uno con lanzas motorizadas que actúan sobre la inclinación de las lanzas (de -30° a +30° respecto a la horizontal).

La inyección de y atomización de amoniaco en la caldera puede realizarse con vapor de baja (4-6 bar) o bien con aire comprimido (5-6 bar). El fluido atomizador es inyectado continuamente independientemente del aporte de amoniaco, puesto que también actúa como refrigerante de las lanzas alargando de este modo su vida útil. En este caso, se adopta como fluido de atomización el aire comprimido para así optimizar la generación de energía eléctrica en la turbina.

#### **3.8.1.2.5. Extractor de escorias.**

Este equipo es de accionamiento hidráulico y esta formado por una carcasa de chapa de acero con refuerzos suficientes y chapas de desgaste recambiables. Las paredes laterales están provistas de bocas de hombre de mínimo 500 mm de paso. El extractor funciona en baño de agua, formando un cierre hidráulico con el horno. El nivel de agua se mantiene de modo que no se produzca rebose y por lo tanto efluentes de aguas. De igual manera el extractor recibe los finos y metales fundidos eventualmente recogidos en las tolvas bajo el sistema de combustión. El equipo esta separado del suelo a fin de facilitar la limpieza y dotado de la trampilla hidráulica de evacuación de objetos voluminosos que obstruyan el paso.

#### **3.8.1.2.6. Central hidráulica**

La central hidráulica permite el movimiento de:

- la claveta de cierre del conducto de caída de residuos al alimentador del horno.
- El alimentador de residuos
- Los elementos móviles del horno
- El extractor de escorias

La central consta de un depósito de aceite de chapa con su instrumentación y un grupo de presión uno para cada servicio. El equipo de control de la combustión, regula la velocidad de los elementos móviles del horno y la aportación de aire de combustión, para asegurar la combustión completa de los residuos.

#### **3.8.2. Depuración de gases con lavado semi-seco**

El proceso de depuración de gases previsto es del tipo semi-seco, en el que los reactivos (hidróxido de calcio y carbón activo) se inyectan en la corriente de gases en forma de polvo. Los gases a la salida de la caldera son enfriados en una torre de acondicionamiento por medio de la evaporación del agua inyectada en la misma. A la salida de la torre de acondicionamiento los gases pasan a un reactor de contacto donde se inyectan el hidróxido de calcio y el carbón activo. Igualmente puede utilizarse bicarbonato sódico como reactivo en lugar de hidróxido de calcio.

El reactivo se descompone y reacciona con los componentes ácidos de los gases formándose las sales correspondientes. Al mismo tiempo, el carbón activo capta por absorción los contaminantes de las familias de los furanos, dioxinas y metales pesados (mercurio). La cantidad de reactivos se regula en función del contenido de cloruro de hidrogeno en los gases medida en la chimenea. En el fondo del conjunto torre-reactor

se recogen una parte de las partículas que arrastran los gases, cenizas volantes y productos de la reacción. La mayoría de sólidos abandonan el reactor junto con los gases para entrar en el filtro de mangas.

Los residuos producidos por la depuración de los gases están formados por las cenizas volantes arrastradas por la masa de gases a la salida de la caldera, los productos de las reacciones descritas en el párrafo anterior y el exceso de hidróxido de calcio no reaccionado. Tanto las cenizas como los productos de reacción, junto con el reactivo y el carbón activo sin reaccionar son posteriormente separados por el filtro de mangas. Las partículas recogidas en las tolvas del filtro de mangas son evacuadas, una parte hacia el silo de almacenamiento de residuos, y otra parte se recircula hacia el reactor de contacto con el objeto de agotar al máximo el reactivo. Las cenizas recogidas en las tolvas de la parte convectiva de la caldera, se transportan directamente al silo de almacenamiento de residuos de depuración, con una capacidad para siete días de almacenamiento en plena carga del horno.

El gas limpio producido a la salida del filtro es ventilado a la atmósfera por medio del ventilador de tiro inducido y su correspondiente chimenea.

#### **3.8.2.1. Torre de acondicionamiento**

Torre de flujo descendente con pulverizadores aire/agua. Consiguiendo una atomización del agua a gotas por debajo de 50 micras mediante aire comprimido a 7,5 bar. Mediante un termopar a la salida de la torre se controla la temperatura y la aportación de agua al proceso asegurando la temperatura óptima para una correcta neutralización a la vez que se protege el tejido de las mangas del filtro.

La cantidad de agua de enfriamiento de gases inyectada en la torre de acondicionamiento se dosifica en función de la temperatura de los gases a la entrada del reactor. La bomba de agua de enfriamiento esta redundada, al igual que las rampas de pulverización. El caudal de aire comprimido se regula en función del caudal del agua aportada para asegurar un funcionamiento eficaz de la pulverización.

#### **3.8.2.2. Reactor de contacto**

El reactor de contacto es de tipo seco y es vertical. La misión de este equipo es mezclar convenientemente el hidróxido de calcio y el carbón activo, que son los reactivos empleados en la depuración, con los gases de combustión salientes de la torre de refrigeración.

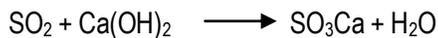
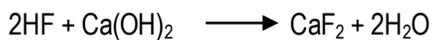
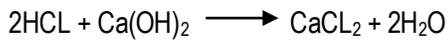
Los reactivos empleados son: cal apagada ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) en forma pulverulenta y seca para la neutralización de los componentes ácidos, y el carbón activo para la captación de dioxinas, furanos y metales pesados como el mercurio.

La cantidad de hidróxido de calcio inyectada en el reactor se dosifica por medio de un transportador de tornillo con variador de frecuencia en función de la concentración de HCL detectada en la chimenea. La soplante del sistema de inyección del hidróxido de calcio al reactor esta redundada.

La cantidad de carbón activo inyectada en el reactor viene determinada por el sistema de depuración de gases. La reacción de las moléculas de gases ácidos sobre el reactivo tiene lugar en dos fases:

- adsorción en superficie del reactivo de las moléculas de los gases.
- reacción de las moléculas de gas desde la superficie al interior del grano de reactivo.

Las reacciones químicas que tiene lugar son las siguientes:



La captación de las moléculas de dioxinas y furanos se realiza mediante una adsorción en superficie sobre el carbón activo.

Los parámetros que influyen el rendimiento de la depuración y el ahorro de consumo de reactivos son:

- superficie de contacto (es inversamente proporcional al diámetro de las partículas obtenidas en la atomización)
- turbulencia (numero de Reynolds de los gases en su estancia en el reactor)
- tiempo de residencia del gas y el reactivo (debe ser suficiente para permitir el desarrollo de las reacciones descritas anteriormente)
- Temperatura de reacción (las bajas temperaturas favorecen la absorción de los metales y las altas favorecen las reacciones químicas).

### 3.8.2.3. Filtro de mangas

Los gases procedentes del reactor conteniendo las partículas de la incineración, las sales de la reacción, carbón activo e hidróxido cálcico aun sin racionar, se dirigen hacia el filtro de mangas. El filtro dispone de cuatro celdas de elementos filtrantes, aislables, de modo que es posible operar con un mínimo de tres de

ellas, mientras se efectúan revisiones o mantenimiento en la restante. Las celdas funcionan en paralelo. El número de celdas en la operación normal es de cuatro.

El tejido filtrante está compuesto por: soporte PTFE + fibra p-84 + tratamiento PTFE, composición adecuada para temperaturas hasta 250°C en funcionamiento continuo (temperatura superior a la máxima de salida de caldera). De este modo el filtro resiste sin problemas un fallo de adición de agua a la torre de refrigeración y una emergencia eléctrica o de otro tipo que lleve gases calientes al equipo, ahorrando instalaciones de refrigeración de emergencia.

Dentro del filtro de mangas, se efectúa la retención de partículas de polvo y metales pesados a través de partículas de carbón activo residentes en el filtro de mangas. Para evitar choques térmicos, el filtro lleva incorporado un circuito de recirculación de aire con baterías de calefactores para calentar las celdas antes de la puesta en marcha con gases de caldera. El sistema de recirculación y precalentamiento se pone en marcha antes del arranque de la planta y en paros de corta duración, el gas se aspira del conducto de salida y se reintroduce en el de entrada. El filtro se calienta hasta 125°C aproximadamente.

La limpieza de las mangas se consigue mediante descargas de aire comprimido (3-4 bar). Este circula en sentido contrario al de los gases e hincha momentáneamente las mangas, con lo cual se desprende la torta de filtración, cayendo a las tolvas.

Las tolvas de recogida de cenizas llevan traceado eléctrico en las paredes para evitar la condensación de la humedad de las cenizas y su posterior apelmazamiento. La extracción de las cenizas se efectúa mediante transportadores de cadena y válvula rotativa.

#### **3.8.2.4. Ventilador de filtro y chimenea.**

Los gases depurados son aspirados e impulsados mediante un ventilador de tiro a la atmósfera a través de una chimenea metálica resistente a la corrosión de los mismos soportada en estructura de hormigón. El ventilador está accionado por motor eléctrico con variador de frecuencia controlado por la presión en el interior del horno-caldera.

En caso de fallo eléctrico u otra circunstancia que obligue al paro de la planta, se ha optado por dotar al grupo diesel de emergencia de potencia suficiente para accionar el ventilador de tiro, a carga reducida, con el fin de evacuar a través del filtro los restos de gases de combustión evitando cualquier emisión de partículas a la atmósfera.

En caso de un disparo general de la planta, por cero eléctrico, se detiene los ventiladores de aire de combustión y la entrada de residuos. La combustión cesa de inmediato pero la generación de los gases se mantiene por unos minutos si bien el caudal disminuye rápidamente.

#### **3.8.2.5. Analizador de gases.**

Se instalará un sistema de análisis continuo de emisiones, será redundante y estará ubicado en la chimenea.

Los componentes analizados serán los siguientes:

- Partículas totales
- TOC (carbono orgánico total)
- Cloruro de Hidrogeno (HCL)
- Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)
- Monóxido de nitrógeno (NO) y dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>), expresado como dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>)
- Monóxido de carbono (CO)
- Amoniacó (NH<sub>3</sub>)

Así mismo se deberán realizar mediciones continuas de los siguientes parámetros:

- Concentración de O<sub>2</sub>
- Presión
- Temperatura
- Contenido de vapor de H<sub>2</sub>O en los gases de escape

#### **3.8.2.6. Almacenamiento y dosificación de reactivos (hidróxido de calcio y carbón activo).**

El sistema de depuración de gases se completa con los silos de almacenamiento de hidróxido de calcio y de carbón activo con sus sistemas de dosificación mediante vías sin fin con variador de frecuencia. La inyección de los reactivos en la corriente de gases se efectúa por medio de transporte neumático. Las soplantes de dichos sistemas de transporte están redundados.

La capacidad de los silos es de 90 m<sup>3</sup> para el hidróxido de calcio y de 10 m<sup>3</sup> para el carbón activo. Los silos serán cilíndricos con fondo cónico provistos de extractor con sistemas rompebvedas. El suministro de reactivos a la planta se realizará por medio de camiones cisterna con descarga neumática y compresor incorporado en el propio camión. Los silos estarán provistos de filtros de mangas con sistema de limpieza

automática en la cubierta para evacuar el aire de transporte neumático evitando los vertidos de polvo a la atmósfera.

#### **3.8.2.7. Transporte, almacenamiento y descarga de residuos.**

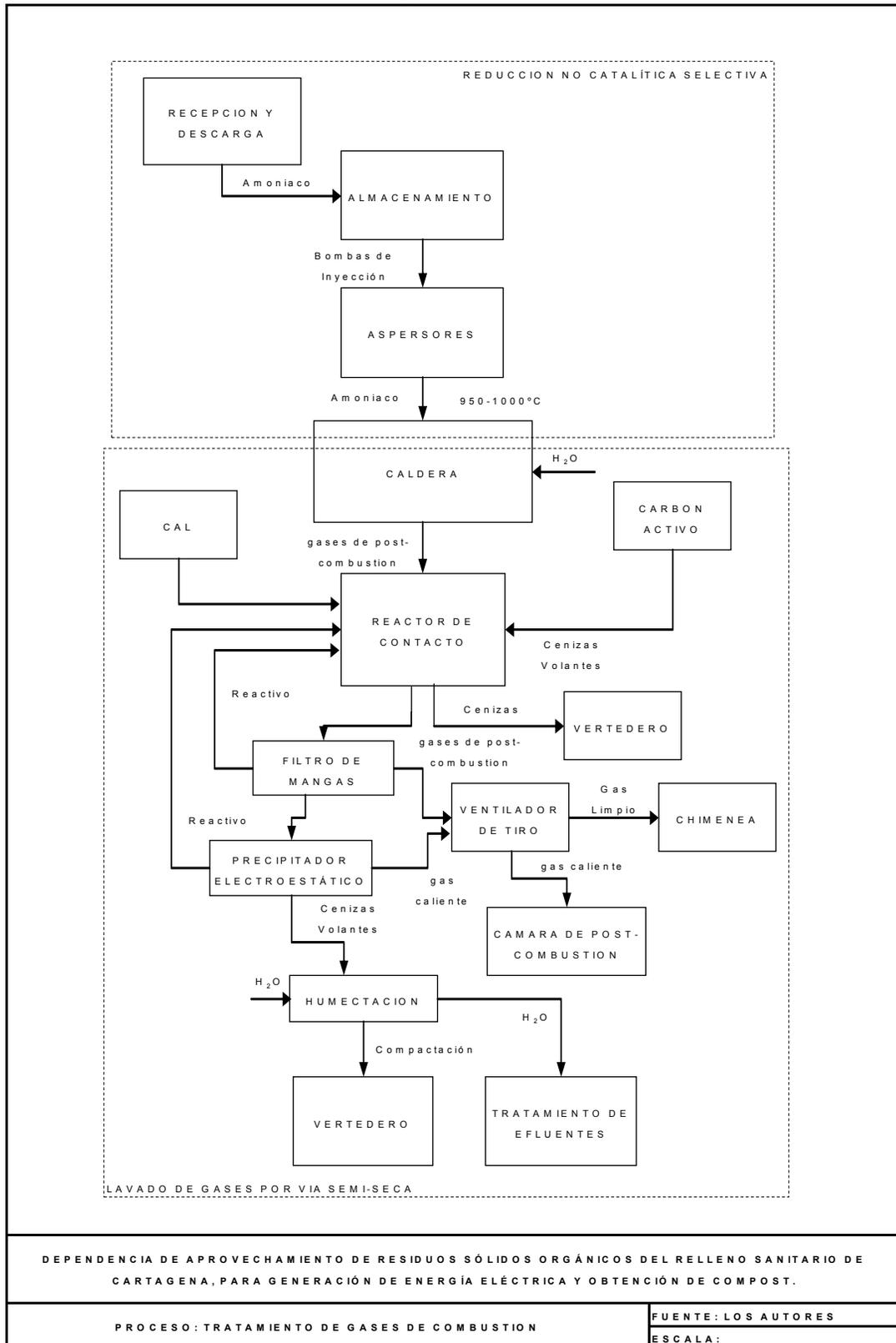
Las cenizas y los productos de reacción recogidos en el fondo del conjunto torre de acondicionamiento - reactor de contacto y en las tolvas del filtro de mangas son transportados por medio de un transportador de cadena hasta el silo de residuos. Una parte del producto recogido en las tolvas del filtro de mangas es recirculado e inyectado de nuevo en el reactor de contacto por su contenido en hidróxido de calcio no reaccionado. La capacidad de este silo de residuos es de 140 m<sup>3</sup> que permite una autonomía de una semana.

El silo será cilíndrico con fondo cónico provisto de extractor variante y con sistema de rompebovedas por inyección de aire comprimido. Igualmente estará provisto de un filtro de mangas con ventilador extractor y sistema de limpieza automática en la cubierta para evacuar el aire desplazado por el llenado, evitando los vertidos de polvo a la atmósfera. La cubierta estará diseñada para inspeccionar y hacer el mantenimiento de los filtros y dispondrán de las plataformas, escaleras y barandillas necesarias. En la parte inferior del silo estará instalado el sistema de humectación, compresión y ensacado de cenizas.

#### **3.8.2.8. Sistema centralizado de aspiración**

En el área de depuración de gases se ha previsto un sistema centralizado de aspiración para la limpieza de los derrames de cenizas, cal, carbón activo, etc. El sistema consiste en una serie de tomas conectadas a una red de aspiración centralizada. Estas partículas se separan en un filtro de mangas antes de la entrada a la soplante. La descarga de los sólidos se efectúa por medio de dos válvulas de membrana en el transportador general de residuos que los transporta hasta el silo de cenizas.

**Grafica 15: Proceso de Tratamiento de Gases de Combustión.**



### 3.9. PROCESO DE RECICLAJE DE RESIDUOS.

#### 3.9.1. Tratamiento de los plásticos.

Los envases de plástico pueden someterse a tres tipos de procesos.

1. Reciclado mecánico.
2. Reciclado químico.
3. Valorización energética.

El primero consiste en trocear el material para introducirlo posteriormente en una máquina extrusora-granceadora para moldearse después por los métodos tradicionales. Solamente puede aplicarse a los termoplásticos, que son aquellos que funden por la acción de la temperatura. Presenta dos problemas fundamentalmente: El primero es que el plástico ya utilizado pierde parte de sus propiedades lo que obliga a emplearlos en la fabricación de otro tipo de productos con menos exigencias. El segundo es la dificultad para separar los distintos tipos de plásticos. Para ello se han desarrollado diversos sistemas.

El segundo, reciclado químico se utiliza cuando el plástico está muy degradado o es imposible aislarlo de la mezcla en que se encuentra. Se define como la reacción reversible de la polimerización hacia la recuperación de las materias primas. Según el tipo de polímeros se distinguen dos clases de procesos:

1. Polímeros de adición. Por dos procedimientos diferentes :
  - Vía térmica. Se usan los siguientes sistemas :
    - Pirólisis.
    - Gasificación.
    - Cracking.
  - Vía catalítica. Con los siguientes :
    - Hidrogenación.
    - Hidrocracking.
    - Cracking.
2. Polímeros de condensación. Se aplican los siguientes :
  - Hidrólisis.
  - Metanólisis.
  - Glicólisis.
  - Otros.

Por último la valorización energética es un tratamiento adecuado para plásticos muy degradados. Es una variante de la incineración en la que la energía asociada con el proceso de combustión es recuperada para generar energía. Las plantas en las que se realiza se asemejan a una central térmica pero difieren en el combustible que en este caso son residuos plásticos.

### **3.9.2. Tratamiento del vidrio.**

Los envases de vidrio se pueden reciclar sin que el material pierda ninguna de sus propiedades. Una vez recogidos son triturados formando un polvo grueso denominado calcín, que sometido a altas temperaturas en un horno, se funde para ser moldeado nuevamente en forma de botellas, frascos, tarros, etc. que tienen exactamente las mismas cualidades que los objetos de que proceden. El proceso supone un ahorro de materias primas y de energía muy considerable.

### **3.9.3. Tratamiento del papel y cartón.**

Consiste en la recuperación de las fibras de celulosa mediante separación en soluciones acuosas a las que se incorporan sustancias tensioactivas con el fin de eliminar la tinta. La tinta queda en la superficie del baño y se puede separar con facilidad. Una vez retirada la tinta, se somete la suspensión de las fibras a un secado sobre una superficie plana, para recuperarlas. Después se las hace pasar por unos rodillos que las aplanan y compactan, saliendo finalmente la lámina de papel reciclado.

### **3.9.4. Tratamiento de los metales.**

Los envases de acero estañado, más conocidos como hojalata, son perfectamente reciclables, se emplean en la fabricación de otros envases o como chatarra en las fundiciones siderúrgicas después de haber sido desestañada la hojalata. Todo el acero recuperado se recicla por las necesidades de las acerías. El proceso de reciclado de la hojalata reduce el consumo energético de forma muy notable.

Los envases de aluminio se consideran materia prima en los mercados internacionales. Su reciclado supone un elevado ahorro energético y los materiales obtenidos mantienen sus propiedades al fundirse repetidas veces. Para separarlos del resto se utiliza un mecanismo de corrientes inducidas de Foucault que proyecta hacia fuera de la cinta transportadora los envases de aluminio, pega a ésta los férricos y deja igual a los demás. En combinación con sistemas de electroimanes sirve para completar la separación de los metales.

### 3.9.5. Tratamiento del tetrabrik.

Se reciclan de dos maneras:

- Reciclado conjunto. Dando lugar a un material aglomerado denominado Tectán®.
- Reciclado por separado. Los componentes se aprovechan de modo independiente.

En éste último se separan las fibras de celulosa del polietileno y del aluminio en un hidropulper por frotamiento. Tras finalizar el proceso se vacía el hidropulper por su parte inferior a través de un filtro que deja pasar el agua y la fibra de celulosa.

Con la recuperación de ésta se ha reciclado un 80% en peso del envase. Para aprovechar el resto se puede recuperar de forma conjunta obteniéndose una granza de polietileno reforzada por el aluminio. Este resto también se usa como combustible en las cementeras, ya que el polietileno es buen combustible y el aluminio oxidado sule a la bauxita, ingrediente del cemento.

Por último para separar el polietileno del aluminio se pueden usar disolventes, recuperando de la disolución el polietileno. También se puede recuperar el aluminio por combustión.

### 3.9.6. Otros residuos

Los neumáticos pueden sufrir diferentes procesos:

- Recauchutado: Con lo que puede volver a utilizarse. Consiste en volver a realizar el dibujo gastado.
- Corte: Para que mediante un fundido a presión se puedan fabricar felpudos, zapatillas, etc.
- Trituración. Con dos variantes:
  - Trituración a temperatura ambiente.
  - Trituración criogénica: Ésta última utiliza bajas temperaturas por debajo de su temperatura de transición vítrea convirtiéndolo en un material frágil y quebradizo. Se obtiene así un grano fino y homogéneo.
- Triturado: se emplea en :
  - Como caucho asfáltico. Mejora el drenaje de la capa asfáltica así como prolonga la duración del pavimento y reduce su fragilidad.
  - Como hormigón de asfalto modificado.

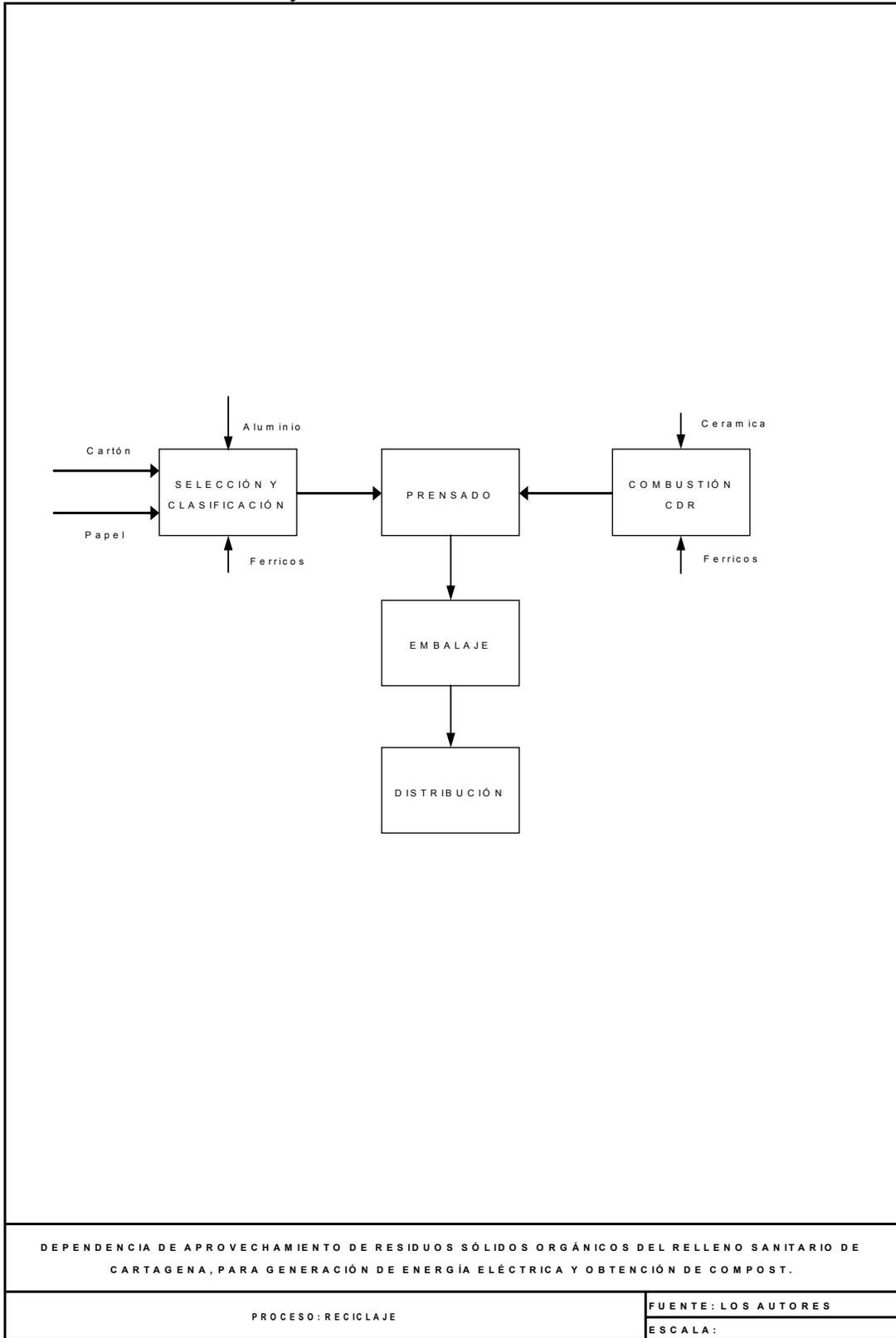
- Como combustible en grano. El caucho compuesto por un 83% de carbono en peso tiene una capacidad calorífica de 35MJ/kg. La combustión debe estar muy controlada porque los neumáticos contienen azufre.
- Pirólisis.
- Utilización en el compostaje de fangos. El neumático triturado se utiliza para favorecer la oxigenación y el compostaje.

Las pilas presentan diversos grados de potencial contaminante. Según su composición y tipo tendrán como destino el reciclado o el depósito controlado en un depósito de seguridad. Son reciclables las pilas botón de óxido de mercurio, óxido de plata y las de níquel-cadmio. El mercurio se recupera mediante un proceso de destilación.

Los aceites de automoción usados son residuos peligrosos. Contienen productos de la degradación de los aditivos que se les añaden como fenoles, compuestos de cloro, hidrocarburos polinucleares aromáticos clorados (PCB), compuestos de plomo, etc. Son procesados por destilación que permiten obtener nuevamente aceites de una calidad comparable a los obtenidos del crudo petrolífero.

Por último los residuos voluminosos como muebles, electrodomésticos son recuperados por particulares y asociaciones que los reparan y revenden o utilizan. Hay que hacer la salvedad de que ciertos electrodomésticos de línea blanca como frigoríficos deben tratarse para su desguace por personal especializado por contener CFC, PCB, etc. Igualmente el material electrónico debe ser tratado de forma especial para evitar que dañe el medio ambiente.

Grafica 16: Proceso de Reciclaje.



### **3.10. RECUPERACION Y APROVECHAMIENTO DE BIOGAS DE VERTEDEROS.**

Para efectos del aprovechamiento de los residuos sólidos depositados en el vertedero, se ha concebido la opción de un sistema de recolección de gases de descomposición de los residuos. La vida productiva de proyectos de captación y aprovechamiento de biogás de rellenos sanitarios, especialmente los proyectos de GEGRS, hace que sean muy vulnerables a los cambios regulatorios, más aún cuando las normas se enfocan directamente sobre aspectos relacionados con el establecimiento voluntario de reducciones de emisiones de gases de efecto de invernadero (GHG)<sup>64</sup>.

Durante la construcción del relleno sanitario se coloca un sistema de tubos de extracción los cuales serán utilizados para extraer el biogás, producido a lo largo de la vida útil del relleno sanitario. Estos tubos están cubiertos por una capa de grava, que sirve de filtro. En la parte superior, el tubo de extracción está cubierto por un sello de arcilla para evitar fugas de biogás. Todo este sistema de tubos de extracción está conectado a un sistema de recolección de biogás el cual conduce el combustible a los motores de combustión y a los generadores. La capacidad de generación estará en función del tamaño del relleno sanitario, así como de la composición de la basura. Una vez que el relleno sanitario ha llegado a su límite de capacidad, se coloca una capa de arcilla para confinar la basura y se da inicio al proceso de descomposición y producción de biogás y lixiviados. Generalmente la vida útil de estos proyectos es de alrededor de 15 años a partir del confinamiento de la basura.

A lo largo de la vida útil del proyecto, la capacidad de generación es variable. Esta capacidad se incrementa durante los primeros años y en los últimos años se va reduciendo toda vez que la basura tiende a estabilizarse, con lo que deja de producir biogás. El sistema de recolección de gas de vertedero se explica más a fondo en el Anexo 4.

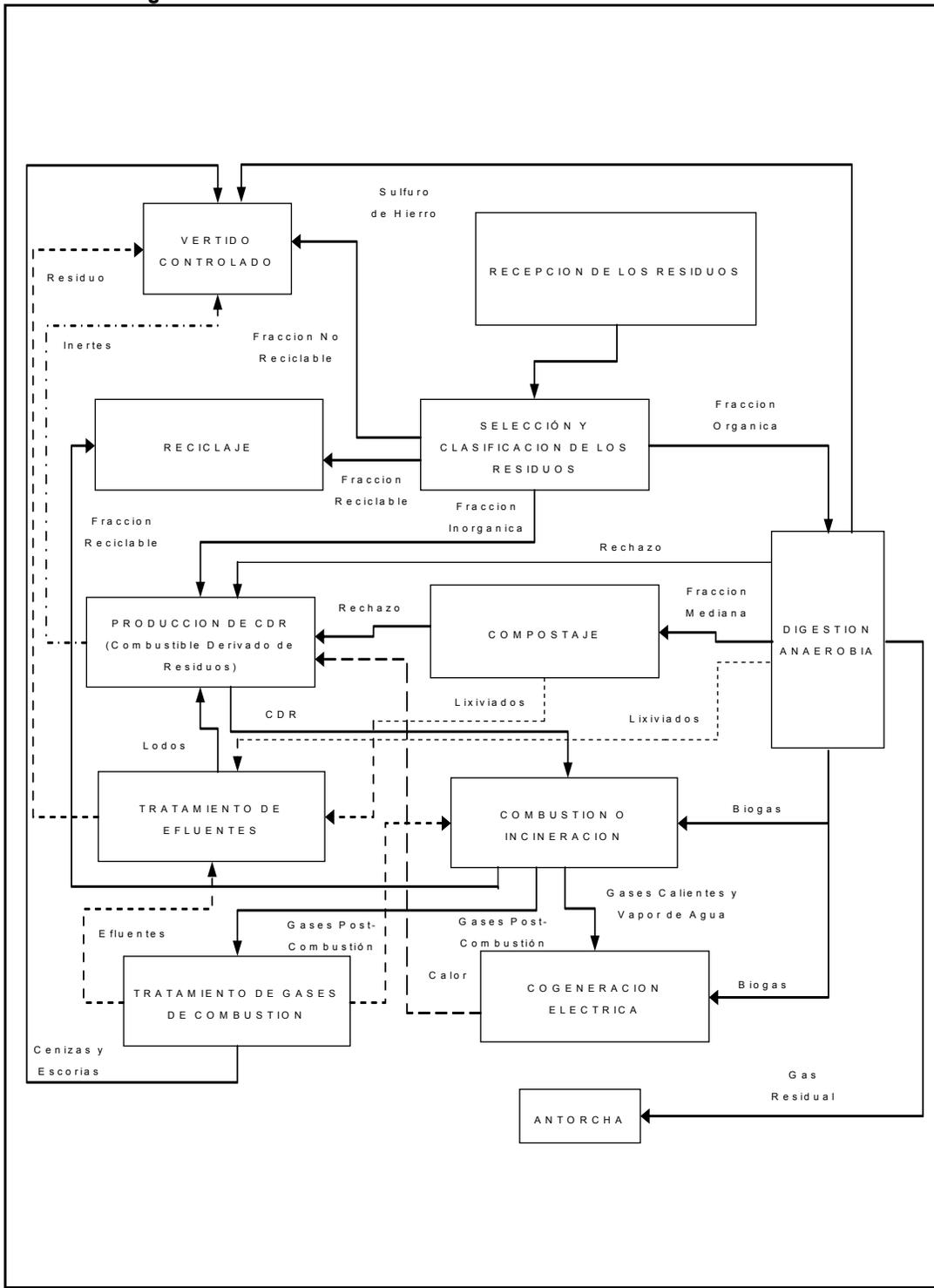
### **3.11. DIAGRAMACIÓN GENERAL DE LOS PROCESOS.**

Se presenta a continuación el Diagrama General de Procesos de la planta de valorización de residuos y el Balance General de Materia/Energía resultante de los procesos efectuados, teniendo en cuenta los datos obtenidos de los análisis de generación de residuos y de transformación efectuados en el capítulo 2.

---

<sup>64</sup> GHG: Green House Gases: Gases de Efecto de Invernadero.

**Grafica 17: Diagrama General de Procesos**



DEPENDENCIA DE APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS DEL RELLENO SANITARIO DE CARTAGENA, PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y OBTENCIÓN DE COMPOST.

DIAGRAMA GENERAL DE PROCESOS

FUENTE: LOS AUTORES  
ESCALA:



## **4. LOCALIZACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE PLANTA DE VALORIZACIÓN Y COGENERACIÓN ELÉCTRICA**

Posterior a la selección y diagramación de los procesos a implementar en la valorización energética de los residuos, se hace necesario realizar la distribución física de los diferentes procesos que se ejecutarán, así mismo la localización de la planta dentro del espacio territorial de la ciudad de Cartagena, siguiendo la normatividad vigente establecida mediante el Plan de Ordenamiento Territorial y en el Reglamento del Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS 2000).

### **4.1. LOCALIZACIÓN**

De acuerdo a lo promulgado por la Dirección del Agua Potable y Saneamiento Básico, y el Plan de Ordenamiento Territorial de la ciudad de Cartagena<sup>65</sup>, se han establecido los lineamientos bajo los cuales se ha determinado la ubicación de planta de valorización energética y obtención de compost orgánico en la ciudad.

Según el Reglamento Técnico Del Sector Del Agua Potable Y Saneamiento Básico Ras 2000<sup>66</sup>, en el Título F: Sistemas de Aseo Urbano, los siguientes son los criterios a tener en cuenta para localización de la unidad de aprovechamiento de residuos sólidos urbanos:

#### **“F.4.2.3 Localización de la unidad de aprovechamiento**

Los siguientes criterios deben considerarse en la localización de la unidad de residuos sólidos aprovechables.

1. Debe estar cerca al área y rutas de recolección.
2. Las vías de acceso deben ser diseñadas para minimizar el impacto del tráfico en el medio ambiente.
3. Debe construirse en sitios ambiental y estéticamente aceptables. Debe ser ambientalmente aceptable respecto al tráfico, ruido, olor, polvo, vuelo de materiales, descargas líquidas y control de vectores; para cumplir con este requisito el diseño arquitectónico de la zona operativa debe ser cerrado a fin de no generar los impactos negativos sobre el área de influencia.
4. Debe tenerse en cuenta los usos del suelo y el plan de desarrollo del municipio.
5. Debe localizarse en una zona industrial y simultáneamente debe cumplir con el requisito de aislamiento que satisfaga la aceptación de la comunidad y se puedan mantener zonas de seguridad adecuadas alrededor de la instalación.

El proceso de localización puede constituirse de las siguientes fases:

1. Fase I Planeamiento

---

<sup>65</sup> Decreto No. 0977 por medio del cual se adopta el Plan de Ordenamiento Territorial del Distrito Turístico y Cultural de Cartagena de Indias

<sup>66</sup> Ministerio de Desarrollo Económico. Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico. REGLAMENTO TECNICO DEL SECTOR DEL AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BASICO RAS 2000. Bogota D.C., Noviembre de 2000.

- a) Identificación del problema. Reconocer el crecimiento del volumen de residuos a manejar.
  - b) Diseño y estrategia de localización. Debe tenerse en cuenta los siguientes aspectos: planeamiento e integración de la comunidad, riesgos de comunicación, mitigación y actividades de evaluación.
  - c) Evaluación de alternativas. Debe tenerse en cuenta los siguientes aspectos: búsqueda, debate y selección de opciones: reciclaje, reducción en la fuente, incineración y disposición.
  - d) Criterios factibles de selección del sitio. Debe tenerse en cuenta los siguientes aspectos: estudio de densidad de población, condiciones hidrológicas y características socio-económicas.
2. Fase II Selección del sitio y diseño de la unidad.
- a) Selección del sitio
  - b) Diseño de la unidad. Debe tenerse en cuenta los siguientes aspectos: selección de tecnologías, dimensiones, características de seguridad, restricciones, planes de mitigación y construcción.
3. Fase III Implementación
- a) Operación. Debe tenerse en cuenta los siguientes aspectos: monitoreo de recepción de residuos, manejo de la disposición de residuos, control de ruido, desorden y olor.
  - b) Manejo. Debe tenerse en cuenta los siguientes aspectos: operación de monitoreo y seguridad, ejecución de pruebas aleatorias de caracterización de residuos.
  - c) Cerramiento y uso futuro del terreno. Debe tenerse en cuenta los siguientes aspectos: cerramiento y aseguramiento de la unidad, decisión sobre el uso futuro del terreno y realización de monitoreo continuo.
  - d) Monitoreo de calidad ambiental. Debe tenerse en cuenta los siguientes aspectos: generación de olores, ruido, contaminación de aguas, aire y suelos, y riesgos asociados a la labor que se realice”.

De la misma manera, según el Plan de Ordenamiento Territorial de la Ciudad de Cartagena, encontramos dentro del componente general, capítulo 3, los siguientes criterios a tener en cuenta para localización de la unidad de aprovechamiento de residuos sólidos urbanos:

#### **“3.5.2.3. La actividad industrial.**

El uso industrial así mismo de acuerdo a su impacto ambiental, social y urbanístico se clasifica en grande, pequeña y mediana.

Para efectos de manejo y de acuerdo a la actividad predominante, la industria se divide en extractiva y transformadora. La industria extractiva por su alto impacto ambiental, no es considerada como apta para el suelo urbano. En consecuencia, se debe prohibir su existencia al interior de dichos suelos. Las industrias extractivas existentes en suelo urbano o de expansión urbana, pueden seguir funcionando con el objeto de recuperar la morfología del terreno, dentro de unas condiciones concertadas con la entidad competente alrededor del plazo y las características de la recuperación, que permitan el desarrollo de usos urbanos posteriormente.

La industria transformadora es aquella destinada a la transformación, elaboración, ensamblaje y manufactura de productos. Por lo general, se denomina complejo industrial o ciudadela industrial, a las urbanizaciones o zonas

específicamente previstas para este uso. De acuerdo al impacto ambiental y urbanístico que genera, se clasifica en liviana, mediana y pesada. La actividad industrial pesada cuenta con un área para su adecuado funcionamiento en el sector de Mamonal.

Así la actividad industrial se divide en tres grupos:

#### **Actividad industrial 1.**

Establecimientos considerados de bajo impacto ambiental y urbanístico. Se pueden ubicar en espacios habilitados para tal efecto dentro de edificaciones comerciales o vivienda unifamiliar, con las siguientes características:

- Manufactura artesanal (manual) de productos o con equipos caseros en horarios diurnos. El abastecimiento debe ser adelantado mediante vehículos pequeños o medianos, que no demanden especificaciones del espacio público diferentes a la de los sectores residenciales; no requieren condiciones especiales de infraestructura, ya que no producen ruidos, olores ni efluente contaminantes. Máximo 3 empleados.
- Fabricación de dulces caseros, repostería.
- Cestería, cerámica.
- Actividades de edición, encuadernadoras.
- Talleres de modistería, orfebrería, tapicería de muebles, ortopedia.

#### **Actividad industrial 2.**

Por su alto impacto ambiental y mediano impacto urbanístico, es complementaria del uso comercial, no es compatible con el uso residencial y puede ubicarse en locales o bodegas independientes, en áreas con uso principal comercial.

Son aquellas que por las características de las materias primas utilizadas o procesadas, dan lugar a desechos sólidos, líquidos o gaseosos en concentraciones y cantidades tales que puedan causar molestias pero que con manejo y controles adecuados minimizan los impactos en la salud y/o el ambiente.

Preparación de carnes frías, jamones, tocinetas, embutidos, chicharrones y demás elaboraciones no enlatadas, en pequeña escala; fabricación de productos lácteos, que no generen residuos orgánicos; envase de conserva de frutas y legumbres, no enlatados; molinos y transformación industrial de harinas; fábrica de galletas, chocolates y confites; industria de confección y similares; tostadoras de Café; fabricación de salsas, condimentos, vinagre, almidón y sus derivados, levaduras y pastas alimenticias; fábrica de cigarrillos y cigarros; fábrica de vinos, gaseosas y bebidas en general; fábrica de estructuras metálicas; industrias de prefabricados que no produzcan residuos de cementos y se prevén un control adecuado para evitar el polvo; fabricación de artículos eléctricos y similares; fabricación de artículos de cuero, excepto el curtimiento; fabricación de artículos de madera y corcho; fabricación de piezas para maquinarias, productos alimenticios en menor escala, artículos de tocador, artículos eléctricos; fábrica de vestidos; fábrica de chicles; productos fotográficos; reciclaje.

#### **Actividad industrial 3.**

Es aquella que por su alto impacto ambiental, urbanístico y magnitud considerable debe localizarse distante a los sectores residenciales y comerciales y presentan las siguientes características:

- Requieren para su buen funcionamiento edificaciones especializadas y elementos o equipos para el control de contaminación por ruidos, olores, vapores o efluentes líquidos contaminantes.

- Requieren condiciones de espacio público especiales que faciliten la circulación de vehículos pesados y provean las necesarias franjas de protección ambiental y aislamientos.

- Requieren formas específicas de infraestructura y prestación de los Serv. Púb. Para su buen funcionamiento y control de efluentes contaminantes.

Son incompatibles con las demás actividades urbanas debido a su alto impacto, solo se permiten en sectores especializados denominados agrupaciones o complejos industriales.

Son aquellas que utilizan materia prima que, por sus propiedades físicas, biológicas, térmicas y/o radioactivas, después de ser procesadas y/o manipuladas, dan lugar a desechos sólidos, líquidos o gaseosos en concentraciones y cantidades suficientes a ser susceptible de causar perjuicio a la salud de la comunidad, la ciudad o el ambiente.

Cervecería; procesadoras de pescado; Procesadoras de sal y azúcar; Ácalis e industria de cloro; Textiles; Destilerías; Industrias lecheras; Fábrica de grasas y jabones; Industria de papel y pulpa; Industria de cuero; Fabricación de metales; Lavanderías; Fabricación de cementos; Plaguicidas; Mataderos; Ensamble de automóviles; Fabrica de pinturas; Fábrica de plásticos; Fábrica de colas y pegantes; Fabricación de vidrios y productos de vidrio en general; Industrias de aluminio; Industria de fertilizantes Nitrogenados; Asbesto; Acero; Explosivos; Plantas de Energía con carbón; Planta de energía nuclear; Descerezación y fermentación de café; Muelles carboníferos; Productos farmacéuticos; Grasas y jabones; Fabricación de llantas; Plantas de Coque; Refinería de petróleo”<sup>67</sup>.

De igual manera, dentro del componente urbano, hacen referencia a los sitios de disposición final establecidos en anteriores ocasiones, mencionando sus ventajas y desventajas en cuanto a su uso, disposición e impacto en la comunidad.

### **“3.7.3 Disposición final de Residuos Sólidos.**

Las dos opciones para seleccionar el sitio para el sistema de disposición final de residuos en el distrito son:

- Decidir un lote al sureste de Pasacaballos

Las ventajas radican en que, de acuerdo con los estudios preliminares, el área muestra condiciones técnicas apropiadas, aunque faltan los estudios de detalle que definan su factibilidad.

La desventaja estriba en el rechazo ya planteado desde la época en que se hicieron los estudios, por parte de la comunidad de Pasacaballos. A esto se suma que los grupos de recicladores ya manifestaron que se trasladarán con el relleno, lo que plantea la resolución de estos dos problemas sociales diferentes, mientras que simultáneamente debe continuarse la atención a la situación técnica y social del relleno de Henequén clausurado.

- Promover la participación en un relleno regional

La existencia de un terreno apropiado en Turbana propicia esta solución, sin excluir la posibilidad durante la vigencia del plan de que el distrito pueda participar en soluciones con otros municipios.

La ventaja radica en contar con el visto bueno de la Alcaldía de Turbana y los permisos ambientales.

---

<sup>67</sup> Decreto No. 0977 por medio del cual se adopta el Plan de Ordenamiento Territorial del Distrito Turístico y Cultural de Cartagena de Indias. Componente Urbano. P 45

La desventaja aparente está en un mayor costo de operación. Debe considerarse que este proyecto no tendría los mismos problemas sociales que deben resolverse en las otras dos alternativas, pero podría presentar otros respecto a los recicladores; de todas maneras deberá seguirse atendiendo el relleno clausurado en Henequén y su evolución hasta un Parque Distrital.<sup>68</sup>

Con base en lo anterior, y atendiendo lo expuesto en el plan de ordenamiento territorial de la ciudad de Cartagena, sobre lo expuesto en materia al uso del suelo urbano, se proponen los siguientes sitios de localización de la planta de valorización energética y producción de compost orgánico:

Cartagena dispone actualmente del parque ambiental Loma de los Cocos (ubicado en Pasacaballos), lugar de disposición final de los residuos sólidos, el cual cuenta con los permisos ambientales e instrumentos necesarios para el tratamiento y disposición final de residuos, lo que permitiría un mejor planteamiento de cada una de las etapas del desarrollo del proyecto. Además, el parque ambiental loma de los cocos cuenta con el desarrollo de técnicas de recolección de biogás proveniente de los residuos en descomposición mediante un sistema de chimeneas de conducción de biogás.

Por otra parte, el relleno sanitario de henequén aun espera su clausura y post-clausura, con lo cual permitiría el estudio de aprovechamiento de los gases producidos (biogás) mediante la instalación de tuberías de canalización para el biogás producido por los residuos sólidos y luego conducirlo hasta unos depósitos para su posterior disposición. La composición del biogás es de aproximadamente 50% por metano y 50% por dióxido de carbono<sup>69</sup>, y es considerado un potente gas de efecto invernadero (GHG, por sus siglas en inglés), el cual es producido por la degradación de los residuos depositados durante más de 30 años. Es preciso aclarar que la producción de biogás en un vertedero no es continua, debido en primera medida a la composición de los residuos sólidos depositados, dado a que la descomposición orgánica de los residuos es la que determina la producción de todos los gases de residuos sólidos (GRS), y en segunda medida a la naturaleza heterogénea del residuo que lo produce y a las características cambiantes del mismo con el paso del tiempo. Estas condiciones determinan la capacidad de producción de biogás, la cual se incrementa durante los primeros años y en los últimos años se va reduciendo toda vez que los residuos tienden a estabilizarse lo que conlleva a una reducción en la producción de biogás con el paso del tiempo.

---

<sup>68</sup> Ibid. Componente General. p 34

<sup>69</sup> UNDP/World Bank Energy Sector Management Assistance Programme (ESMAP). MANUAL PARA LA PREPARACION DE PROYECTOS DE GENERACION DE ENERGIA A PARTIR DEL GAS DE RELLENOS SANITARIOS EN AMERICA Y EL CARIBE. Abril 2004.

Dadas las condiciones planteadas, se hace necesaria la ubicación de la planta de valorización energética y de producción de compost en predios adyacentes al actual sitio de disposición final de residuos, en gran medida debido a las facilidades de ubicación y así mismo, al aprovechamiento del proceso de disposición final llevado a cabo en el parque ambiental loma de los cocos. En un principio, se podrán presentar impactos negativos, los cuales serán de carácter transitorio y estarán relacionados principalmente con la etapa de construcción de la planta, por lo que tendrán un alcance limitado y debieran desaparecer al concluir la misma. Gran parte de los impactos negativos estarán relacionados con los siguientes aspectos:

- Movimientos de suelo.
- Acopio de materiales
- Tránsito vehicular
- Calidad del aire (nivel de polvo y gases del parque automotor)
- Ruido
- Valor del inmueble
- Circulación vehicular

Todos ellos de carácter reversible (una vez que finalice la fase de construcción de la obra, cesarán los mismos y se volverá a las condiciones originales) y con un alcance puntual o en las cercanías inmediatas a la Planta. Para atenuar dichos impactos se tendrá en cuenta la topografía natural y no se modificarán las condiciones planialtimétricas ni pluviales; se realizará una cortina forestal con especies autóctonas de talla elevada bordeando todo el perímetro de la Planta; se harán controles a los vehículos que ingresen a la Planta y fundamentalmente se tendrá en cuenta la localización del proyecto, que al ser en una zona industrial se minimizarán así todos los impactos negativos anteriormente descritos.

Sin embargo para identificar correctamente los impactos potenciales del proyecto sobre el medio afectado se deberá realizar un Estudio de Impacto Ambiental, que tendrá en cuenta para el caso de los impactos negativos medidas de mitigación y/o corrección garantizando de este modo una adecuada protección del ambiente y de la salud de la comunidad.

De todas maneras se plantea la posibilidad de estudiar la factibilidad de la implementación de sistemas de recolección del biogás producido para la generación de energía en el relleno sanitario de henequén, o en su defecto, para su posterior combustión.

## 4.2. DISTRIBUCIÓN

Para la distribución de los distintos procesos dentro de la planta de valorización energética y compostaje de residuos sólidos, es necesaria la organización de todos los procesos, atendiendo la secuencia de cada uno de los procesos, sin alterar el ciclo del tratamiento de los residuos sólidos.

Para el proceso de recepción y clasificación de los residuos sólidos, se ha catalogado como el punto de partida para la obtención de compost, y posterior valorización energética de los residuos. Los procesos que se ejecutarán en la planta de selección de residuos sólidos son:

Planta de selección de residuos sólidos

- Proceso de recepción y clasificación de residuos
  - Recepción y descarga
  - Transporte
  - Selección o triaje
  - Prensado y almacenamiento

Posteriormente a la selección y clasificación de los residuos sólidos, lugar donde se ha separado la fracción orgánica de la fracción inorgánica de los residuos, se procede a realizar el proceso de biometanización. En este proceso solo se procederá a tratar la fracción orgánica de la cual mediante una serie de reacciones en ausencia de oxígeno por parte de bacterias anaerobias, se obtendrá gas rico en metano, denominado biogás. La duración de la fracción orgánica dentro de los biodigestores será de aproximadamente 20 a 30 días, tiempo en el cual se ha liberado la mayor parte del contenido de biogás procedente de los residuos orgánicos.

Igualmente, dentro de la planta de biometanización de la fracción orgánica de residuos, se ha establecido el tratamiento de efluentes, subproductos del proceso de compostaje como los lixiviados o líquidos de percolación, los cuales deben tener un tratamiento para eliminar cualquier grado de toxicidad que puedan contener para posteriormente, ser reutilizados o dispuestos de conformidad a lo establecido por la CRA. Los procesos que se ejecutarán en la planta de biometanización de la fracción orgánica son:

Planta de tratamiento de la fracción orgánica: preparación de la materia orgánica para la biometanización.

- Digestión anaerobia de la fracción orgánica de los residuos
  - Recepción de residuos
  - Pretratamiento mecánico
  - Digestión anaerobia (fermentación mediante biodigestores)
  - Almacenamiento de biogás

- Disposición de la fracción residual
- Eficiencia del proceso de digestión anaerobia
- Filtro para la captación del sulfuro de hidrogeno
- Recepción y tratamiento de efluentes (líquidos de precolación o lixiviados)
  - Tratamiento físico de desbaste
  - Decantación-floculación
  - Filtración
  - Deshidratación de fangos
  - Dosificación y adición de reactivos

Después de efectuar la digestión anaerobia o biometanización de la fracción orgánica y el tratamiento de los lixiviados, corresponde efectuar el proceso de compostaje. Para ello es necesario recoger la fracción orgánica procedente de la biometanización, a través de tolvas de descarga las cuales serán transportadas hasta la planta de compostaje. Posteriormente obtendremos compost orgánico, que podrá ser utilizado en la recuperación de terrenos agotados por la siembra continua de cultivos, por medio de la fertilización, posibilitando la captura de hidrogeno y otros nutrientes. Los procesos que se ejecutarán en la planta de tratamiento de la fracción orgánica son:

Planta de tratamiento de la fracción orgánica: elaboración del compostaje en fase aerobia

- Compostaje de la fracción orgánica de los residuos
  - Recepción de la fracción orgánica de los residuos
  - Selección manual
  - Recepción de la fracción vegetal y trituración
  - Mezcla y homogenización
  - Disposición en pilas
  - Volteado de pilas y control de condiciones ambientales
  - Recogida de lixiviados y aguas residuales
  - Cribado de compost maduro
  - Obtención de compost
- Biofiltro: instalación que elimina los olores de la fermentación orgánica

Después de procesado anaeróbicamente y aeróbicamente la fracción orgánica mediante los procesos de digestión anaerobia y compostaje, respectivamente, se procede a procesar la fracción orgánica que no pudo tratarse en los procesos anteriormente efectuados, junto a la fracción inorgánica no susceptible de ser aprovechada mediante procesos de reciclaje, en la elaboración del combustible derivado de residuos o CDR.

Este material procesado será almacenado en un depósito temporal para posteriormente ser utilizado como combustible para la posterior valorización energética de los residuos mediante la combustión y la cogeneración eléctrica. Los procesos que se ejecutaran en la planta de elaboración de combustible derivado de residuos son:

Planta de elaboración de combustible derivado de residuos (CDR)

- Recepción de RSU
- Alimentación de RSU
- Clasificación primaria
- Clasificación secundaria
- Trituración
- Secado de la fracción fina
- Mezclado
- Almacenamiento de CDR
- Deposito temporal
- \*Proceso de residuos animales

Adicionalmente al proceso de elaboración de combustible derivado de residuos, se ha propuesto el aprovechamiento de los residuos animales, los cuales serian procesados y posteriormente utilizados en la elaboración de CDR.

Es en la planta de combustión donde se empieza el proceso de valorización energética de los residuos sólidos, mediante la incineración del CDR por medio del biogás generado de la biometanización de la fracción orgánica de los residuos sólidos. El proceso de combustión se desarrolla en unas calderas a donde es transportado el CDR hacia el horno de incineración dentro del cual suceden transformaciones de energía química en energía calórico procedente del CDR hacia unos conductos por donde circula agua la cual será la encargada posteriormente en forma de vapor de producir energía eléctrica. Dentro del proceso de incineración, se producen gases producto de la combustión del CDR, que deben ser tratados y depurados eliminando cualquier grado de toxicidad que pueda presentarse en el proceso, para luego de ser depurados totalmente, puedan ser liberados sin ningún riesgo a la atmósfera. Dentro de esta planta de incineración de residuos, se efectuaran los siguientes procesos:

Planta de Incineración de Residuos: combustión de la parte inorgánica de los residuos

- Descarga y almacenamiento
- Zona del horno

- Alimentación del horno
- Aire de combustión de CDR
- Zona de caldera
  - Quemadores auxiliares
- Depuración de gases de combustión
- Recogida y extracción de escorias
- Tratamiento de escorias
  - Separación de metales contenidos en las escorias
- Tratamiento de cenizas
- Evacuación de gases depurados

El siguiente proceso a la valorización energética de los residuos, es la cogeneración eléctrica. Es en este proceso donde propiamente se ven los resultados de todo el tratamiento de los residuos. Donde por medio de turbinas, se encargan de convertir la energía potencial del vapor de agua en energía cinética en forma de movimiento donde por medio de un alternador, se generará energía eléctrica, asimismo, una fracción del biogás generado en el proceso de biometanización de los residuos orgánicos será empleada como combustible en el funcionamiento de motores a gas, los cuales generarán así mismo energía eléctrica, la cual será llevada a una central eléctrica para su procesamiento y distribución, tanto para el consumo propio de la planta, como para la venta a las distintas distribuidoras eléctricas. Es así, como en la planta de cogeneración, se ejecutarán los siguientes procesos:

#### Planta de Cogeneración de energía

- Sistema de ciclo combinado
  - Almacenamiento de biogás
  - Ciclo agua vapor y generación de energía
  - Tratamiento de aguas de condensación

Culminando el proceso de valorización energética y obtención de compostaje de los RSU, se puede recuperar la parte susceptible de ser aprovechada, productos como el papel, el vidrio y los metales, mediante el reciclaje, para su posterior reincorporación a la actividad industrial. En la planta de reciclaje de residuos, se efectuaran los siguientes procesos:

#### Reciclaje de Residuos

- Almacenaje previo del vidrio, papel y chatarra para su posterior traslado a las plantas de reciclaje.

Adicionalmente al proceso de valorización energética de los residuos sólidos y la obtención de compostaje, es posible obtener biogás a través de la biometanización de los residuos sólidos acumulados en los vertederos y botaderos a cielo abierto, ya que estos son considerados como unos grandes reactores donde suceden diferentes reacciones mediante las cuales son liberadas grandes cantidades de metano y otros gases de efecto de invernadero, que son susceptibles de ser aprovechados en la generación de energía o, de no ser posible su aprovechamiento energético, se procedería su incineración, mediante técnicas controladas, reduciendo notablemente los niveles de emisión de gases de efecto invernadero, contribuyendo a la conservación del medio ambiente.

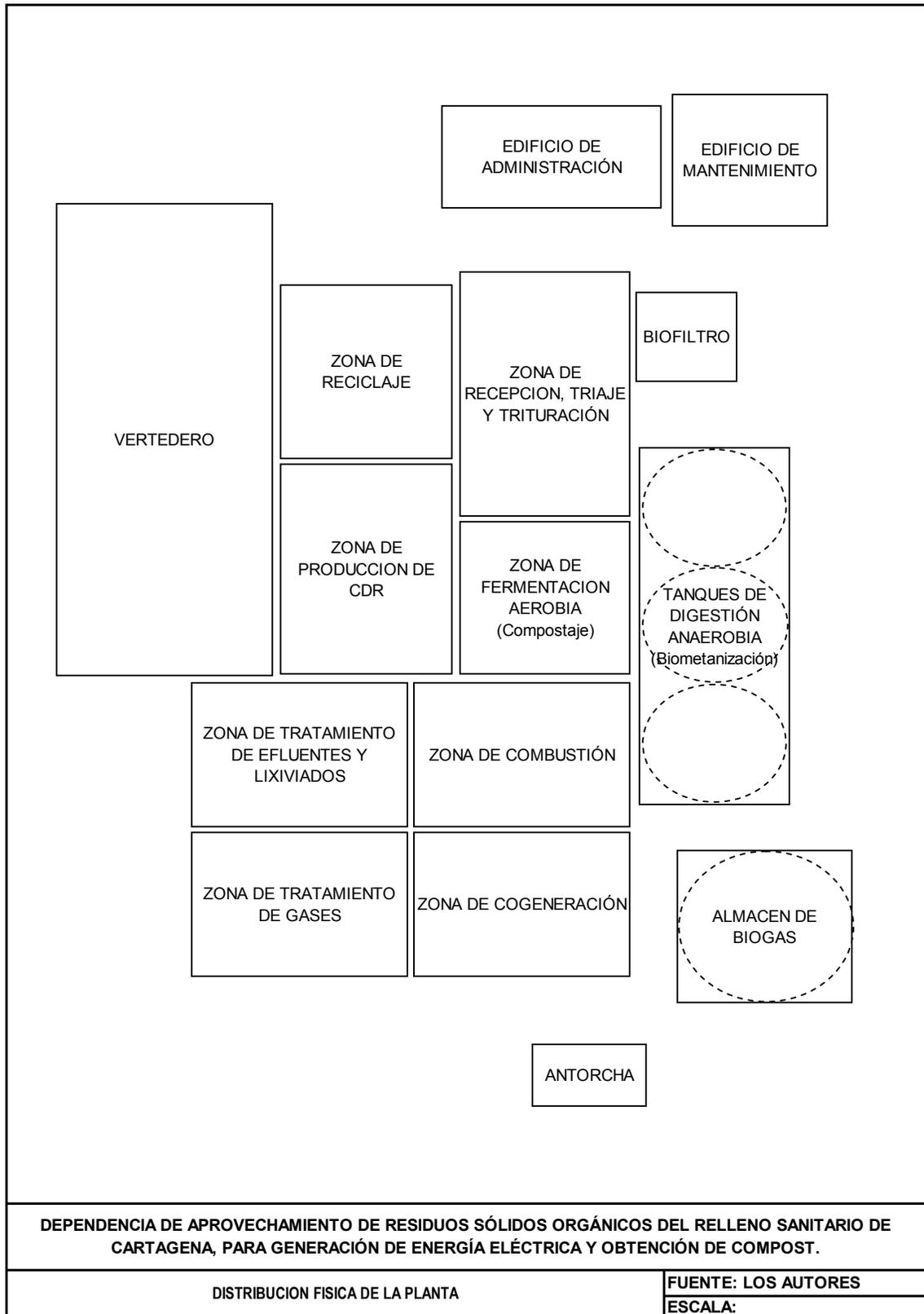
Los procesos que se llevarían a cabo de manera adicional en la valorización de los residuos son:

\* Planta de recuperación de biogás procedente de vertederos

- Almacenamiento de biogás
- Transporte hacia la planta de combustión y cogeneración eléctrica.

De manera grafica, se presenta la distribución física de los distintos procesos integrados en la planta de valorización energética de residuos y obtención de compost.

**Grafica 19: Distribución Física de la Planta.**



## 5. CONSIDERACIONES OPERATIVAS, ECONOMICAS, PERSPECTIVAS Y APLICACIONES FUTURAS

### 5.1. CONSIDERACIONES OPERATIVAS.

En relación a las necesidades de operación de la planta, se hace necesario el establecimiento de la capacidad de planta necesaria para el funcionamiento y operación adecuada de la planta, así mismo, de los equipos que han de ser necesarios para el funcionamiento y operación de los procesos integrados.

#### 5.1.1. Capacidad de la planta

Mientras el relleno sanitario se mantiene en operación, y la planta de cogeneración se mantenga en funcionamiento, será necesario establecer una capacidad de procesamiento de unas 700t de residuos diarios, donde se tratarán aproximadamente 443.912,36kg de residuos orgánico, con lo que sería necesario un tratamiento de alrededor de 52.381.658,69lt diarios de biogás y 133.173,71kg diarios de compost orgánico. Igualmente se espera captar 162.215,98kg de residuos potencialmente reciclables y aprovechables, y un aproximado de 22.755,95kg en cuanto a residuos no aprovechables se refiere. Las anteriores cifras pueden aumentar dado el crecimiento que pueda presentar la población de Cartagena, y en igual medida, de la tasa de producción per cápita de residuos sólidos. Para la planta de cogeneración eléctrica se contarán con turbogeneradores a gas y a vapor, con los cuales se espera contar con una capacidad instalada de 22Mw.

**Tabla 30: Capacidad de la planta (diaria)**

	<b>Residuos Sólidos</b>	<b>Residuos Orgánicos</b>	<b>Residuos Reciclables</b>	<b>Residuos Aprovechables</b>	<b>Generación de Biogás</b>	<b>Generación de Compost</b>
<b>Presupuestada</b>	700 ton	450 ton	140 ton	31 ton	52'381.658,69 lt	180 ton
<b>Proyectada</b>	1000 ton	760 ton	230 ton	52 ton	88'772.823,08 lt	310 ton

Fuente: los autores.

#### 5.1.2. Presupuesto de equipos

Para el diseño físico y la operación de los diferentes procesos, se hace necesaria la consolidación de la maquinaria y equipos necesarios para el montaje de la planta de aprovechamiento. A continuación se presenta un listado con los equipos a requerir por parte de cada proceso operativo.

##### 5.1.2.1. Selección y clasificación de los residuos sólidos

Foso receptor  
Tolvas de carga.

Cintas o bandas transportadoras  
Dispositivos abre-bolsas  
Ciclón para separación de bolsas  
Pincho para botellas PET  
Prensas diferenciadas para embalado de materiales ligeros o metales  
Trómeles de 25 m de largo, 3,5 m de diámetro.  
Separador OverBand (electroimán)  
Corriente de Foucault  
Separador balístico  
Criba Vibratoria  
Silos de almacenamiento

#### **5.1.2.2. Digestión anaerobia de la fracción orgánica de los residuos**

Foso de recepción  
Puente Grúa con cuchara de cadena tipo pulpo  
Tolva de alimentación  
Trituradores  
Cribas Rotatorias  
Digestores Anaeróbicos  
Bombas aspiradoras de gas  
Gasómetro  
Compresor de Gas  
Depurador de Biogás  
Filtro para captación del sulfuro de hidrogeno del biogás

#### **5.1.2.3. Tratamiento de efluentes, líquidos de percolación o lixiviados**

Planta desmineralizadora de aguas  
Filtro de carbón activo  
Columna de lecho mixto de resina catiónica y aniónica  
Tanque pulmón de agua desmineralizada.  
Rejillas de captura de sólidos  
Bombas verticales 4000 l/seg.  
Tanques decantadores  
Turbina inversa de 3.6 CV.  
Silo de almacenamiento de aditivos  
Biofiltro para depuración de gases

#### **5.1.2.4. Compostaje de la fracción orgánica de los residuos**

Trommel con criba cilíndrica para separación de residuos  
Electroimán  
Pala mecánica  
Volteadora  
Tamiz

#### **5.1.2.5. Producción de combustible derivado de residuos (CDR)**

Puentes grúa  
Alimentadores  
Brazos mecánicos  
Triturador de voluminosos  
Cintas transportadoras  
Foso regulador  
Separador magnético (overband)  
Molinos de martillos de disposición vertical  
Secaderos  
Mesas densimétricas

#### **5.1.2.6. Combustión de la fracción inorgánica de residuos (CDR)**

Foso receptor  
Tolvas de carga.  
Horno de lecho fluido circulante 23 t/h  
Caldera de recuperación del calor 98 t/h de vapor recalentado a 43 bares y 450°C  
Ventiladores de tiro forzado  
Centrales hidráulicas  
Puentes grúa con cucharas tipo pulpo  
Quemadores de combustible auxiliar  
Extractores de escorias y cenizas volantes,  
Cámara de combustión.  
Circuito de agua  
Tornillo sin fin para eliminación de cenizas  
Transportadores de paletas  
Circuito agua-vapor  
Zona de enfriamiento  
Sobrecalentadores  
Evaporador  
Economizador  
Desmineralizador de agua  
Desgasificador  
Tolvas para recogida de finos  
Transportador de cadena en baño de agua  
Pozo de escorias  
Precalentador de clavetas de by-pass  
Quemadores auxiliares.

#### **5.1.2.7. Cogeneración eléctrica**

Líneas de vapor sobrecalentado  
Tanque de aguas de caldera

Pre calentadores de aire  
Líneas de condensado  
Desgasificador  
Purgadores de vapor  
Turboalternador de 22Mw de potencia  
Aerocondensador.  
Boiler  
Gasómetro  
Desareador  
By-pass  
Turbina a gas  
Turbina a vapor  
Multiplicador de Revoluciones  
Bombas de condensado  
Ventiladores  
Torre de enfriamiento de tiro mecánico  
Bombas de recirculación  
Condensadores  
Torres de enfriamiento  
Bombas de alimentación de la caldera  
Motores alimentados con gas natural de 3.544 mwe cada uno  
Transformador – elevador de tensión

#### **5.1.2.8. Tratamiento de gases de combustión**

Línea de depuración de gases  
Absorbedor de tipo seco  
Separador de partículas tipo filtro de mangas  
Ventilador de tiro forzado  
Chimenea con equipos de análisis en continuo de emisiones.  
Silo de cal apagada  
Silo de carbón activo  
Silo de las cenizas volantes y sales producidas en el proceso seco de neutralización.  
Ventiladores axiales

#### **5.1.2.9. Reciclaje de residuos**

Cinta transportadora

### **5.1.3. Características de los equipos y procesos.**

#### **5.1.3.1. Microturbinas**

Las microturbinas pueden usar GRS de grado bajo con una capacidad de calentamiento tan baja como 350 Btu/scfm. Estas turbinas pueden normalmente proporcionar hasta 75 kW de energía eléctrica y 85 kW de calor en aplicaciones combinadas de energía y calentamiento. Los sistemas típicos de microturbinas están

compuestos de un compresor, un recuperador, un combustor, una turbina, y un generador magnético permanente; y adicionalmente requieren poco espacio para operar. La baja capacidad de estas unidades hace que sean las más adecuadas para aplicaciones en sitios pequeños y remotos con bajas tasas de producción de GRS<sup>70</sup>.

### **5.1.3.2. Motores de combustión interna a gas**

Los motores de combustión interna que usan GRS de grado medio como combustible se pueden adquirir fácilmente como unidades modulares o dentro de un paquete integrado con el generador. Estos motores se consiguen en varios tamaños con salidas de energía que oscilan entre 0.5 MW y más de 3.0 MW por unidad, tienen un costo de capital por KW comparativamente bajo, y dan una mayor eficiencia que la mayoría de turbinas de gas en ciclo simple. Además, la naturaleza modular de estos motores permite flexibilidad para las expansiones progresivas que pueden ser necesarias debido a las incertidumbres asociadas a la futura producción de GRS.

Estas unidades pueden adicionarse en etapas incrementales más pequeñas que las de turbinas de gas, pero tienen como desventaja el hecho de que los costos de mantenimiento son más altos, y requieren personal de mantenimiento más calificado. Adicionalmente, los gases de combustión pueden contener ciertos productos de combustión incompleta, y por lo tanto requerir una provisión extra para la disposición del aceite residual dado el alto consumo de aceite lubricante de sus unidades.

### **5.1.3.3. Turbinas de gas**

Las turbinas de gas se encuentran disponibles como sistemas integrados y modulares, pueden tener alguna aplicación en sitios con tasas de producción de GRS más altas y estables. Estas unidades son por lo general más grandes que los motores de combustión interna y tienen una salida de energía eléctrica que oscila entre 1MW y 8MW por unidad. Las turbinas de gas ofrecen también la facilidad de expansión modular para acomodarse a los cambios en la producción de GRS, aunque las etapas incrementales son más grandes que en los motores de combustión interna. Las turbinas de gas usualmente tienen un costo de capital más elevado asociado a la puesta en marcha inicial y, en cierta forma, a las eficiencias de conversión de energía más bajas, en comparación con los motores de combustión interna. No obstante, estas unidades generalmente ofrecen unas mejores características de las emisiones de escape, menores costos de operación y

---

<sup>70</sup> Environment Canada, 2002

mantenimiento y mayor flexibilidad operacional (referida a la capacidad de mantener una eficiencia razonable a pesar de las fluctuaciones que se presenten en el flujo y características del GRS) que los motores de combustión interna. Adicionalmente, estas unidades ofrecen también flexibilidad para adaptarse directamente a la opción de ciclo combinado cuando hay garantía de producción del GRS.

#### 5.1.3.4. Captación de biogás en vertederos

Los costos de instalación de pozos de captación vertical de gas pueden variar considerablemente en función de los costos locales de materiales (agregados, tuberías y mortero llenante); disponibilidad de contratistas; tipo y capacidad de equipo disponible; y características específicas del diseño del pozo. Los ciclos de reemplazo o reparación de los pozos pueden variar sustancialmente de acuerdo con el diseño y las condiciones específicas del sitio.

Los siguientes son algunos rangos típicos de costos de instalaciones de recolección del GRS:

**Tabla 31: Rangos Generales de Costos de Pozos Verticales**

Descripción	Rango Bajo (US\$/metro vertical)	Rango Alto (US\$/metro vertical)	Comentarios
100 a 150 mm de diámetro de pozos (<15 metros de profundidad)	\$150	\$250	
100 a 150 mm de diámetro de pozos (>15 metros pero menos de 30 metros de profundidad)	\$200	\$350	
900 mm de diámetro de pozos ( cualquier profundidad)	>\$500		Estos pozos no se recomiendan puesto que no son rentables. Presentan un problema común de obstrucción a medida que avanza la perforación, lo cual puede ocasionar un gran aumento su costo.

Fuente: UNDP/World Bank Energy Sector Management Assistance Programme (ESMAP). MANUAL PARA LA PREPARACION DE PROYECTOS DE GENERACION DE ENERGIA A PARTIR DEL GAS DE RELLENOS SANITARIOS EN AMERICA Y EL CARIBE. Abril 2004.

## 5.2. CONSIDERACIONES ECONOMICAS

Con respecto a algunos aspectos económicos del proyecto, los ingresos presupuestados de la planta serán generados por la venta del excedente de energía producido en la central de cogeneración (exportándola a la red eléctrica), la venta de Reducciones Certificadas de Emisiones (CER`s) de Gases de Efecto Invernadero (GHG`s), determinados por la duración, el tipo de proyecto y el precio de los CER`s (U\$4, U\$5, o U\$6 por

tonelada de CO<sub>2</sub> eq). Así mismo se planea vender el excedente de producción de biogás como gas combustible para el consumo en general, y la producción del compost orgánico generado en la planta.

Para una mayor comprensión, las CER's son generadas por la combustión de gas metano, que compone de un 50% a un 70% del biogás generado de los rellenos sanitarios y del proceso de biometanización de la fracción orgánica de los residuos. Es sumamente importante conocer que el gas metano tiene un potencial de calentamiento global 21 veces mayor que el Dióxido de Carbono. Por lo tanto, la captura, combustión y transformación final del gas metano a dióxido de carbón vía quemador, generador, calentador u otro dispositivo resulta ser una reducción significativa de las emisiones de gases invernaderos.

Para este proyecto, se suman para fines del mecanismo de desarrollo limpio (MDL):

- Las emisiones reducidas por mitigar el CH<sub>4</sub> de la disposición final de los residuos en el vertedero, mediante a aplicación de procesos como el compostaje y la digestión anaerobia.
- La sustitución de combustibles fósiles por combustibles biológicos, como el caso del combustible derivado de residuos (RDF), obtenido del procesamiento mecánico de los residuos sólidos urbanos.
- La reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> resultantes de reemplazar la generación de electricidad con diesel o compra de energía de la red, por la generación autónoma con biogás.

En este proyecto se requiere una inversión importante, pero el monto no está fuera del alcance. Las tecnologías aplicadas dentro del proyecto han sido comprobadas en el mundo en poca escala y se encuentran funcionando con efectividad y eficiencia. Por otra parte, las tecnologías aplicadas en materia de transformación y valoración de los residuos sólidos en fuente de energía, contribuyen aún más con la mitigación del problema del cambio climático, al reducir o eliminar las emisiones fósiles. Esta opción puede cubrir el 100% de las necesidades energéticas, permitiendo a la planta autogenerar toda la energía necesaria para la producción, y generar excedentes de energía que podría ser vendida a la red, comunidades vecinas o industrias en la región utilizando energía renovable y limpia, permitiendo la reducción de costos por la eliminación en la compra de energía, bien sea del costo del diesel y su transporte, o de la compra de energía de la red. Su desarrollo y uso minimiza el costo de obtención de electricidad por KWh, maximiza la reducción de emisiones de GEI, la generación de energía renovable, calor y vapor utilizando los abundantes flujos de biogás. Adicionalmente, las emisiones locales de material particulado, SO<sub>2</sub>, y CO son más limpias y se reducen notablemente al usar biogás en comparación con la generación con diesel. Igualmente, se generaría un incremento en los ingresos por CER, esta opción aumenta la rentabilidad porque reduce o elimina el costo de comprar y transportar diesel, o de comprar energía costosa de la red interconectada.

Por otra parte, la viabilidad del proyecto de cogeneración desde la perspectiva financiera aumenta, especialmente cuando se toman en cuenta las reducciones de costo de compra de diesel y la reducción en costo por KWh generado.

En materia de inversiones en infraestructura, principalmente se enfocarán en el área de los hornos, calderas, maquinaria y equipos de potencia: turbina(s) para generar electricidad con vapor. Así mismo se requerirán calderas modernas para incrementar la eficiencia energética, con lo cual se elimina la necesidad de compra del diesel y/o electricidad de la red.

Para efectos favorables del proyecto, el aumento de dos variables claves puede mejorar notablemente la viabilidad financiera de esta opción.

- Si el precio de venta de energía a terceros sube en el futuro por encima de US¢3/kWh con un precio de venta de CER de US\$ 6, podría ser rentable hacer esta inversión para consumir energía a bajo costo y vender el excedente.
- Si el precio de venta de CER sube por encima de los U\$13, se podrán obtener ingresos suficientes para justificar la inversión, aún con el precio de venta de energía actual de US¢2. Esto será posible si EEUU entra en el mercado internacional del carbono de la manera en la que lo ha hecho la Unión Europea.

### **5.2.1. Ingresos proyectados por venta de cer`s**

#### **5.2.1.1. Reducción de emisiones de gases invernadero**

Para el proyecto, se han estimado las reducciones de emisiones de gases invernadero (CER`s) asociadas con un proyecto de recuperación de biogás (en unidades de toneladas métricas de metano por año y en toneladas métricas de CO<sub>2</sub> equivalente por año, utilizando un factor de equivalencia de metano/CO<sub>2</sub> de 21) para el período de evaluación.

Las proyecciones asumen que todo el biogás recuperado será quemado para generar electricidad, como combustible para iniciar la combustión de CDR o en un aparato de control y considera las reducciones de emisiones de gases invernadero por el reemplazo de otros combustibles para generar electricidad.

A un precio internacional de U\$ 5 por tonelada de CER, según los datos obtenidos a partir de las cantidades de biogás producido, se obtendrían los anteriores ingresos relacionados. Al cabo del año 2030, se obtendrían

unos ingresos acumulados por U\$ 55.116.874,69. Se debe tener en cuenta que actualmente el precio de las CER's oscila entre los U\$4, U\$5 y U\$6 por tonelada de CO<sub>2</sub>eq. Los datos se presentan a continuación.

**Tabla 32: ingresos proyectados por venta de CER's (Año 2005-2030)**

Años	Biogas (lt/Día)	Biogas (lt/Año)	Metano (ton/año)	Toneladas CO <sub>2</sub> eq(año)	Venta CER's año (U\$5)
2005	52.381.658,69	19.119.305.422,98	15.044,70	315.938,69	1.579.693,44
2006	53.780.951,07	19.630.047.141,53	15.446,59	324.378,49	1.621.892,43
2007	55.194.096,74	20.145.845.311,46	15.852,47	332.901,84	1.664.509,20
2008	56.622.250,15	20.667.121.303,70	16.262,65	341.515,71	1.707.578,56
2009	58.064.586,68	21.193.574.139,00	16.676,91	350.215,13	1.751.075,64
2010	59.520.336,72	21.724.922.903,40	17.095,02	358.995,45	1.794.977,25
2011	60.806.548,86	22.194.390.334,42	17.464,44	366.753,21	1.833.766,03
2012	62.198.969,57	22.702.623.892,58	17.864,36	375.151,56	1.875.757,79
2013	63.591.390,28	23.210.857.450,74	18.264,28	383.549,91	1.917.749,54
2014	64.983.810,98	23.719.091.008,89	18.664,20	391.948,26	1.959.741,30
2015	66.376.231,69	24.227.324.567,05	19.064,12	400.346,61	2.001.733,06
2016	67.768.652,40	24.735.558.125,21	19.464,05	408.744,96	2.043.724,81
2017	69.161.073,11	25.243.791.683,37	19.863,97	417.143,31	2.085.716,57
2018	70.553.493,81	25.752.025.241,53	20.263,89	425.541,67	2.127.708,33
2019	72.266.795,19	26.377.380.245,47	20.755,97	435.875,40	2.179.377,00
2020	73.776.163,02	26.928.299.501,46	21.189,48	444.979,12	2.224.895,58
2021	75.287.428,47	27.479.911.393,19	21.623,54	454.094,28	2.270.471,38
2022	76.799.417,66	28.031.787.445,80	22.057,80	463.213,80	2.316.069,01
2023	78.310.931,29	28.583.489.922,32	22.491,93	472.330,46	2.361.652,29
2024	79.820.746,12	29.134.572.333,33	22.925,57	481.436,87	2.407.184,35
2025	81.327.616,37	29.684.579.974,81	23.358,36	490.525,52	2.452.627,60
2026	82.830.275,32	30.233.050.493,53	23.789,94	499.588,77	2.497.943,86
2027	84.327.436,93	30.779.514.479,14	24.219,95	508.618,86	2.543.094,32
2028	85.817.797,49	31.323.496.082,03	24.648,00	517.607,94	2.588.039,69
2029	87.300.037,41	31.864.513.656,02	25.073,72	526.548,03	2.632.740,16
2030	88.772.823,08	32.402.080.424,87	25.496,72	535.431,10	2.677.155,51

Fuente: los autores.

## 5.2.2. Ingresos proyectados por venta de energía eléctrica

En relación a la venta de energía eléctrica generada a partir del proceso de cogeneración, es necesario explicar brevemente la conformación del sector de la industria eléctrica, así como las bases para establecer el precio venta del Kwh generado.

### 5.2.2.1 Sector de la industria eléctrica en Colombia

A principios del 2003<sup>71</sup>, Colombia tenía la capacidad de producir 13,700 Megavatios (MW) de electricidad. Las plantas hidroeléctricas representan aproximadamente un 73 por ciento de la capacidad eléctrica. El restante

<sup>71</sup> Banco Mundial. ESTUDIO DE PRE-FACTIBILIDAD PARA LA RECUPERACION DE BIOGAS Y PRODUCCION DE ENERGIA RELLENO SANITARIO EL CARRASCO BUCARAMANDA, COLOMBIA. Preparado por SCS Engineers. Junio de 2005. File N°02204055.03. p40.

27 por ciento es producido por plantas de energía térmica utilizando gas natural y carbón como combustible. Durante la pasada década, la capacidad de generación de Colombia aumento un 50 por ciento reflejando el incremento de la demanda de energía del país.

Después de la sequía severa de los 1990s, Colombia ha apoyado el desarrollo de la capacidad de generación de energía por métodos no hidroeléctricos con la meta de tener por lo menos un 20 por ciento de la energía generada por carbón y gas natural. Colombia tiene planeado aumentar la capacidad de generación de energía térmica en un 50 por ciento de la capacidad total para el año 2010<sup>72</sup>.

**Tabla 33: Resumen de precios mayoristas de energía en Colombia. Año 2004.**

<b>Mes</b>	<b>Precio Promedio, Pesos Colombianos por kWh</b>	<b>Venta de Energía (GWh)</b>
<b>Feb-04</b>	81.05767	2547.16137
<b>Mar-04</b>	81.97543	2761.25142
<b>Abr-04</b>	80.80381	2599.90037
<b>May-04</b>	79.94568	2672.34624
<b>Jun-04</b>	75.75634	2584.38684
<b>Jul-04</b>	77.01251	2657.22599
<b>Ago-04</b>	76.39209	2718.86740
<b>Sep-04</b>	77.80804	2624.19616
<b>Oct-04</b>	78.90289	2707.10491
<b>Nov-04</b>	79.69114	2633.22114
<b>Dic-04</b>	79.93459	2817.93263
<b>Ene-05</b>	77.69313	2643.46427
<b>Promedio</b>	<b>78.9144</b>	<b>USD 0.034</b>

Fuente: Banco Mundial. ESTUDIO DE PRE-FACTIBILIDAD PARA LA RECUPERACION DE BIOGAS Y PRODUCCION DE ENERGIA RELLENO SANITARIO EL CARRASCO BUCARAMANDA, COLOMBIA. Junio de 2005. p43.

Estos precios indican el precio promedio de energía en el mes (Enero del 2005, Pesos Colombianos) de todas las transacciones en el mercado mayorista considerando mercado de contratos y venta de punto, calculado como el promedio de 12 meses, cada valor fue ajustado por el índice de precios al consumidor del mes anterior. Esta información indica que el precio promedio de electricidad durante el periodo desde febrero del 2004 a enero del 2005 fue de alrededor de \$0.034kWh<sup>73</sup>.

<sup>72</sup> UPME. Plan de Expansión de Referencia: Generación y Transmisión – 2002-2011. Bogota. 2002.

<sup>73</sup> Banco Mundial. ESTUDIO DE PRE-FACTIBILIDAD PARA LA RECUPERACION DE BIOGAS Y PRODUCCION DE ENERGIA RELLENO SANITARIO EL CARRASCO BUCARAMANDA, COLOMBIA. Junio de 2005. p43

Este precio promedio es un poco más alto que los precios utilizados para estimar las ganancias de venta de electricidad de otros proyectos MDL en Colombia. Dos de estos proyectos incluyen un proyecto de viento en Jeparachi y un proyecto hidroeléctrico en la región de Medellín (Río Amoya), donde se utilizan precios de línea base de \$0.026 y \$0.031 por kWh. Respectivamente, de acuerdo a los Documentos de Evaluación Inicial del Proyecto (PADs). Los autores de los PAD consideraron estos precios de tipo conservativo dado que son basados en datos de un periodo (1998-2012) donde el precio de electricidad había decaído de manera particular en comparación a años anteriores

### 5.2.2.2. Características del servicio de energía en bolívar

El sistema eléctrico de bolívar atiende su demanda interna de aproximadamente 270 MW (Megavatios), a través del sistema de interconexión nacional y de la generación de Termocartagena (180 MW) y Proeléctrica (90 MW), mediante la compra en bloque en la Bolsa de Energía.

En la subestación Ternera que es operada por Transelca, el sistema de Bolívar se conecta a Sabanalarga y Termocartagena a un nivel de tensión de 220 kV, conformando lo que se conoce como anillo a 220 kV.

La localización y demanda de las subestaciones se muestra en el cuadro siguiente:

**Tabla 34: localización y demanda de las subestaciones**

ESTRATOS	USUARIOS	KWH FACTURADOS
1	77.048	118.028.693
2	59.229	150.844.818
3	34.947	116.150.996
4	10.409	42.665.816
5	7.599	39.046.451
6	8.544	50.475.451
TOTAL RESIDENCIAL	197.776	517.212.225
INDUSTRIAL	344	21.838.115
COMERCIAL	9.622	140.788.262
OFICIAL	1.296	88.850.732
NO REGULADOS	62	438.646.047
<b>TOTAL</b>	<b>209.100</b>	<b>1.227.335.381</b>

Fuente: Electrocosta S.A. E.S.P.

### 5.2.2.3. Generación de energía eléctrica

En un primer escenario, donde toda la producción de energía eléctrica será exportada y vendida a la red eléctrica nacional; la potencia presupuestada de la unidad de cogeneración, cuya capacidad se proyecta en 22Mw de energía, la capacidad energética del biogás, la cual es de aproximadamente 0.6492 kWh/día por litro

de biogás generado, y un precio promedio de los mayoristas de U\$0.034 por kilovatio de energía generado, los ingresos proyectados por la venta de energía eléctrica con base en los datos anteriormente descritos, son presentados en la tabla 35.

**Tabla 35: Ingresos proyectados por venta de Energía (Año 2005-2030)**

Años	R. Organicos (kg/día)	Biogas (lt/Día)	kWh/día Energía	kWh/Año Energía	U\$ Vta Energía
2005	443.912,36	52.381.658,69	340.063,98	124.123.352,94	4.220.194,00
2006	455.770,77	53.780.951,07	349.148,25	127.439.110,13	4.332.929,74
2007	467.746,58	55.194.096,74	358.322,45	130.787.694,03	4.446.781,60
2008	479.849,58	56.622.250,15	367.594,08	134.171.840,19	4.561.842,57
2009	492.072,77	58.064.586,68	376.957,79	137.589.594,63	4.678.046,22
2010	504.409,63	59.520.336,72	386.408,59	141.039.133,66	4.795.330,54
2011	515.309,74	60.806.548,86	394.758,73	144.086.936,41	4.898.955,84
2012	527.109,91	62.198.969,57	403.798,38	147.386.410,52	5.011.137,96
2013	538.910,09	63.591.390,28	412.838,04	150.685.884,64	5.123.320,08
2014	550.710,26	64.983.810,98	421.877,70	153.985.358,75	5.235.502,20
2015	562.510,44	66.376.231,69	430.917,35	157.284.832,86	5.347.684,32
2016	574.310,61	67.768.652,40	439.957,01	160.584.306,98	5.459.866,44
2017	586.110,79	69.161.073,11	448.996,66	163.883.781,09	5.572.048,56
2018	597.910,96	70.553.493,81	458.036,32	167.183.255,21	5.684.230,68
2019	612.430,47	72.266.795,19	469.159,14	171.243.086,78	5.822.264,95
2020	625.221,72	73.776.163,02	478.958,02	174.819.678,28	5.943.869,06
2021	638.029,05	75.287.428,47	488.769,22	178.400.766,40	6.065.626,06
2022	650.842,52	76.799.417,66	498.585,12	181.983.569,46	6.187.441,36
2023	663.651,96	78.310.931,29	508.397,93	185.565.245,67	6.309.218,35
2024	676.447,00	79.820.746,12	518.199,72	189.142.896,37	6.430.858,48
2025	689.217,09	81.327.616,37	527.982,38	192.713.569,63	6.552.261,37
2026	701.951,49	82.830.275,32	537.737,71	196.274.263,83	6.673.324,97
2027	714.639,30	84.327.436,93	547.457,35	199.821.931,52	6.793.945,67
2028	727.269,47	85.817.797,49	557.132,83	203.353.483,47	6.914.018,44
2029	739.830,83	87.300.037,41	566.755,60	206.865.792,83	7.033.436,96
2030	752.312,06	88.772.823,08	576.316,98	210.355.699,41	7.152.093,78

Fuente: los autores.

Como se puede apreciar, en el año 2005 se obtendrían ingresos por una cuantía de U\$4'220.194, en el año 2006 se obtendrían U\$4'332.939,74, en el año 2030 estos ingresos proyectados serán de U\$7'152.093,78, por lo que al cabo de 25 años de funcionamiento, se obtendrían ingresos acumulados por un monto aproximado de U\$147'246.230,17. Es preciso recordar que bajo el primer escenario toda la energía generada será vendida a la red eléctrica nacional, lo que acarreará costos adicionales en cuanto a la compra de energía para el abastecimiento energético de la planta.

En un segundo escenario, donde aproximadamente el 10% de la producción de energía eléctrica de la planta será utilizada para el autoabastecimiento de la misma, y el restante 90% será exportado y vendido a la red eléctrica nacional, considerando la potencia presupuestada de la unidad de cogeneración, cuya capacidad se proyecta en 22Mw de energía, la capacidad energética del biogás, la cual es de aproximadamente 0.6492

kWh/día por litro de biogás generado, y un precio promedio de los mayoristas de U\$0.034 por kilovatio de energía generado, se presentan a continuación en la tabla 36 los datos sobre los excedentes anuales de energía y, los ingresos derivados por la venta de energía eléctrica al sistema de interconexión nacional.

**Tabla 36: Ingresos proyectados por venta de Excedente de Energía (Año 2005-2030)**

Años	R. Organicos (kg/día)	Biogas (lt/Día)	kWh/Año Energía	Excedente Energía (90%)	U\$ Vta Exced Energía
2005	443.912,36	52.381.658,69	124.123.352,94	111.711.017,64	3.798.174,60
2006	455.770,77	53.780.951,07	127.439.110,13	114.695.199,12	3.899.636,77
2007	467.746,58	55.194.096,74	130.787.694,03	117.708.924,63	4.002.103,44
2008	479.849,58	56.622.250,15	134.171.840,19	120.754.656,17	4.105.658,31
2009	492.072,77	58.064.586,68	137.589.594,63	123.830.635,17	4.210.241,60
2010	504.409,63	59.520.336,72	141.039.133,66	126.935.220,29	4.315.797,49
2011	515.309,74	60.806.548,86	144.086.936,41	129.678.242,77	4.409.060,25
2012	527.109,91	62.198.969,57	147.386.410,52	132.647.769,47	4.510.024,16
2013	538.910,09	63.591.390,28	150.685.884,64	135.617.296,17	4.610.988,07
2014	550.710,26	64.983.810,98	153.985.358,75	138.586.822,88	4.711.951,98
2015	562.510,44	66.376.231,69	157.284.832,86	141.556.349,58	4.812.915,89
2016	574.310,61	67.768.652,40	160.584.306,98	144.525.876,28	4.913.879,79
2017	586.110,79	69.161.073,11	163.883.781,09	147.495.402,98	5.014.843,70
2018	597.910,96	70.553.493,81	167.183.255,21	150.464.929,68	5.115.807,61
2019	612.430,47	72.266.795,19	171.243.086,78	154.118.778,10	5.240.038,46
2020	625.221,72	73.776.163,02	174.819.678,28	157.337.710,45	5.349.482,16
2021	638.029,05	75.287.428,47	178.400.766,40	160.560.689,76	5.459.063,45
2022	650.842,52	76.799.417,66	181.983.569,46	163.785.212,52	5.568.697,23
2023	663.651,96	78.310.931,29	185.565.245,67	167.008.721,10	5.678.296,52
2024	676.447,00	79.820.746,12	189.142.896,37	170.228.606,74	5.787.772,63
2025	689.217,09	81.327.616,37	192.713.569,63	173.442.212,67	5.897.035,23
2026	701.951,49	82.830.275,32	196.274.263,83	176.646.837,44	6.005.992,47
2027	714.639,30	84.327.436,93	199.821.931,52	179.839.738,37	6.114.551,10
2028	727.269,47	85.817.797,49	203.353.483,47	183.018.135,13	6.222.616,59
2029	739.830,83	87.300.037,41	206.865.792,83	186.179.213,55	6.330.093,26
2030	752.312,06	88.772.823,08	210.355.699,41	189.320.129,47	6.436.884,40

Fuente: los autores.

Como se puede apreciar, en el año 2005 se obtendrían ingresos por una cuantía de U\$4'220.194, en el año 2006 se obtendrían U\$3'899.636,17, en el año 2007 los ingresos estarían alrededor de U\$4'002.103,44. Para el año 2030 estos ingresos proyectados serán de U\$6'436.884,40, por lo que al cabo de 25 años de funcionamiento, se obtendrían ingresos acumulados por un monto aproximado de U\$132'521.607,16.

### 5.2.3. Ingresos proyectados por venta de compost orgánico

A partir de la producción de biogás, y de la cantidad de residuos sólidos tratados, podemos establecer la cantidad de compost que se puede producir en la planta. Teniendo como base un precio de \$150 por kilo de compost<sup>74</sup>, se pueden realizar proyecciones sobre los ingresos procedentes de la venta de compost orgánico. La siguiente tabla 37 es un resumen de los cálculos realizados.

**Tabla 37: Ingresos proyectados por venta de compost (Año 2005-2030)**

Años	Produccion RSU (kg/día)	R. Organicos (kg)	Compost (Kg/Día)	Compost (Kg/Año)	U\$ venta de Compost
2005	628,884.30	443,912.36	133,173.71	48,608,403.62	3,159,125.02
2006	645,683.94	455,770.77	136,731.23	49,906,899.51	3,243,516.00
2007	662,649.90	467,746.58	140,323.97	51,218,250.79	3,328,742.47
2008	679,796.04	479,849.58	143,954.87	52,543,528.74	3,414,874.05
2009	697,112.46	492,072.77	147,621.83	53,881,968.15	3,501,861.01
2010	714,589.92	504,409.63	151,322.89	55,232,854.84	3,589,656.94
2011	730,031.94	515,309.74	154,592.92	56,426,416.10	3,667,228.08
2012	746,749.08	527,109.91	158,132.97	57,718,535.32	3,751,204.64
2013	763,466.22	538,910.09	161,673.03	59,010,654.54	3,835,181.19
2014	780,183.36	550,710.26	165,213.08	60,302,773.75	3,919,157.74
2015	796,900.50	562,510.44	168,753.13	61,594,892.97	4,003,134.29
2016	813,617.64	574,310.61	172,293.18	62,887,012.18	4,087,110.84
2017	830,334.78	586,110.79	175,833.24	64,179,131.40	4,171,087.40
2018	847,051.92	597,910.96	179,373.29	65,471,250.61	4,255,063.95
2019	867,621.49	612,430.47	183,729.14	67,061,136.22	4,358,392.74
2020	885,742.68	625,221.72	187,566.52	68,461,778.39	4,449,422.34
2021	903,886.65	638,029.05	191,408.72	69,864,181.51	4,540,566.39
2022	922,039.30	650,842.52	195,252.76	71,267,256.22	4,631,754.09
2023	940,186.25	663,651.96	199,095.59	72,669,889.63	4,722,913.10
2024	958,312.80	676,447.00	202,934.10	74,070,946.61	4,813,969.67
2025	976,404.00	689,217.09	206,765.13	75,469,271.12	4,904,848.64
2026	994,444.64	701,951.49	210,585.45	76,863,687.70	4,995,473.64
2027	1,012,419.28	714,639.30	214,391.79	78,253,002.91	5,085,767.09
2028	1,030,312.27	727,269.47	218,180.84	79,636,006.99	5,175,650.37
2029	1,048,107.76	739,830.83	221,949.25	81,011,475.40	5,265,043.89
2030	1,065,789.75	752,312.06	225,693.62	82,378,170.57	5,353,867.24

Fuente: los autores.

Como se puede apreciar, en el año 2005 se obtendrían ingresos por una cuantía de U\$3'159.125, en el año 2006 se obtendrían U\$3'243.516, en el año 2030 estos ingresos proyectados serán de U\$5'353.867,24, por lo que al cabo de 25 años de funcionamiento, se obtendrían ingresos acumulados por la venta de compost orgánico por un monto aproximado de U\$110'224.612,81.

<sup>74</sup> Gómez Z, J., 2000. Abonos orgánicos, (Ed.), Santiago de Cali, 107p. EN: MUÑOZ TORRES, José Selimo. COMPOSTAJE EN PESCADOR, CAUCA: TECNOLOGIA APROPIADA PARA EL MANEJO DE RESIDUOS ORGANICOS Y SU CONTRIBUCION A LA SOLUCION DE PROBLEMAS MEDIOAMBIENTALES. Universidad nacional de Colombia, Sede Palmira, 2005.

#### 5.2.4. Costos de instalación

Los costos de una instalación de una planta de cogeneración de ciclo combinado en un sitio adecuado y gran tamaño pueden implicar un costo de capital más bajo por MW instalado de capacidad de generación eléctrica, dada la significativa ganancia en términos de eficiencia de conversión de energía que puede lograrse. Para una mayor comprensión de los costos asociados a los equipos necesarios dentro de la planta, en el anexo F se presenta una tabla con los equipos, precio aproximado en el mercado (en dólares americanos), unidad a la cual se instalará y el costo total. No se incluyen los costos asociados por el montaje general de los equipos.

##### 5.2.4.1. Estimación de los costos de generadores de combustión interna.

El costo inicial presupuestado para implementar una planta de energía de 22 MW de potencia instalada con turbogeneradores de combustión interna (IC) utilizando el vapor generado por el proceso de combustión (turbina a vapor con una potencia de 16MW) y el biogás del proceso de digestión anaerobia (turbina a gas con una potencia instalada de 6MW) como combustible para desplazar autoconsumo de energía y vender la energía en exceso a la red eléctrica será de \$26`783.494 (USD).

**Tabla 38: Resumen de costos para la planta de energía con motores IC**

Concepto	Costo Total (US\$)
Planta de Cogeneración de 22 MW	11.433.494
Interconexión de 0.5 Km.	1.000.000
Construcción de la Planta/Preparación del Lugar	12.100.000
Equipo para mediciones del biogás	350.000
Estudios/Proyectos/Ingeniería/ Contingencia	1900.000
<b>Costo Estimado Total</b>	<b>\$26.783.494</b>

##### 5.2.4.2. Estimado de operación y mantenimiento anual

El costo presupuestal de operación y mantenimiento anual de la planta de energía sería aproximadamente 1.8 cents por kilowatt-hr de electricidad generada o U\$340,000, incluyendo mano de obra y equipo y aquellos relacionados con la operación y mantenimiento del equipo de la planta (mano de obra, mantenimiento rutinario y reparaciones).

**Tabla 39: Costos presupuestales anuales para el mantenimiento de la planta de energía**

Conceptos Incluidos:	
Mano de Obra	
Costos de Equipo de Monitoreo	
Partes, Materiales y Flete	
<b>Total</b>	<b>U\$ 340.000</b>

Fuente: los Autores.

**Tabla 40: Resumen de los costos del proyecto asumidos**

<b>Año</b>	<b>Suposición</b>
2008	Sistema en construcción.
2009	Sistema de colección y combustión arranca el 1/1/09.
2010	Planta de energía arranca 1/1/10.
2010 al 2030	Operación completa del sistema reducción de CER's

Fuente: los Autores.

#### 5.2.6. Ganancias del proyecto

Para la evaluación económica de la planta de energía, los siguientes ingresos fueron considerados:

- La planta de energía produce un total de 111.711 MW/año, los cuales son vendidos a la red pública a \$0.034 USD/kWh basado en los índices promedios mayorista
- Las reducciones certificadas de emisiones de GHG serán vendidas a \$4, \$5, y \$6 USD por tonelada de CO<sub>2</sub> eq, basado en los precios considerados por el Banco Mundial para estos proyectos. Se entiende que el biogás en exceso de la capacidad total de la planta junto al gas extraído durante períodos de mantenimiento o falla será quemado.

El precio de CERs de al menos \$6 USD por tonelada CO<sub>2</sub> eq es necesario para implementar un proyecto de energía si se considera solamente la duración del proyecto hasta el 2012 o 2019. Por lo general, ambos valores del NPV e IRR fueron muy sensitivos a los precios de CERs asumidos. El financiamiento del proyecto aparentemente tiene un efecto mínimo sobre los valores del NPV pero tienen un efecto más significativo (positivo) en los valores de IRR. Para los escenarios con el precio de CER de \$5 por tonelada y una inversión de patrimonio de 25 por ciento, un análisis de sensibilidad del precio de venta de energía fue completado con un margen de 25 por ciento. En la siguiente tabla se presenta un análisis financiero resumido para los siguientes periodos de operación de la planta.

**Tabla 41: Análisis financiero preliminar. (Expresado en U\$)**

Opción: Sistema Completo + MDL	0	1	2	3	4	total
<b>Inversiones</b>	26,783,494-					
<b>Presentación y registro MDL</b>	63,742-					
<b>Producción general</b>						
- Producción de energía (kW h/año)		111,711,018	114,695,199	117,708,925	120,754,656	3,708,374,199
- Producción de compost orgánico (ton/año)		48,608,404	49,906,900	51,218,251	52,543,529	1,613,611,205
- Producción de biogas (lt/año)		19,119,305,423	19,630,047,142	20,145,845,311	20,667,121,304	634,687,074,053
- Producción de metano (ton/año)		15,045	15,447	15,852	16,263	499,426
<b>Ingresos directos e indirectos (U\$)</b>						
- Ingresos por venta de electricidad (90%)	-	3,798,175	3,899,636.77	4,002,103.44	4,105,658.31	126,084,723
- Ingresos por compost orgánico (NPK)	-	3,159,125	3,243,516.00	3,328,742.47	3,414,874.05	104,870,746
- Ingresos por MDL	-	1,579,693	1,621,892	1,664,509	1,707,579	52,439,719
<b>TOTAL ingresos</b>		8,536,993	8,765,045	8,995,355	9,228,111	283,395,188
<b>Egresos Financieros</b>						
- Amortización Deuda a Capital		1,342,362-	1,342,362-	1,342,362-	1,342,362-	26,847,236-
<b>Costos de operación adicional</b>						
- personal de operación, materiales, equipo		340,000-	340,000-	340,000-	340,000-	8,500,000-
- energía		151,927-	155,985-	160,084-	164,226-	5,043,389-
- enzimas		15,000-	15,000-	15,000-	15,000-	375,000-
- reparaciones		13,127-	13,127-	13,127-	13,127-	328,164-
- laboratorio y analysis		1,000-	1,000-	1,000-	1,000-	25,000-
- verificación MDL		6,000-	6,000-	6,000-	6,000-	150,000-
- asesoría		10,000-	10,000-	10,000-	10,000-	250,000-
<b>Costos totales</b>		537,054-	541,112-	545,211-	549,353-	14,671,553-
<b>Total flujo</b>	26,847,236-	6,657,578	6,881,571	7,107,783	7,336,396	241,876,398

Con una tasa de descuento del 10%, la tasa interna de retorno (TIR) del proyecto es del 28%, y el valor presente neto (VPN) del proyecto es de U\$45.216.164. Las inversiones iniciales (U\$26'847.236) serán cubiertas en un periodo de 20 años.

## **5.3. BENEFICIOS Y PERSPECTIVAS FUTURAS**

### **5.3.1. Beneficios del proyecto y contribución al desarrollo sostenible en Cartagena y Colombia**

En el siguiente análisis se han considerado las contribuciones del Proyecto al crecimiento económico, a la protección del medio ambiente y al desarrollo social. Éstos son los tres pilares que soportan el concepto de Desarrollo Sostenible.

#### **5.3.1.1. Crecimiento económico**

Hoy en día, en Colombia existen pocos proyectos centrados en la captura e incineración (o utilización) de biogás. En un principio, fabricantes especialistas extranjeros serán quienes faciliten ciertos equipos claves para esta tarea, tales como antorchas, sopladores, equipos de tratamiento de biogás, instrumentos para la medición del flujo, analizadores de gas, etc. Sin embargo, llevar adelante el proyecto involucraría a profesionales y trabajadores Colombianos que ganarían conocimiento y experiencia en este tipo de emprendimientos, que representa una importante oportunidad para la adquisición de tecnologías, que cumplen con los estándares internacionales relacionados con aspectos de calidad, confianza, seguridad operacional y medioambiente. Este conocimiento adquirido estaría disponible para llevar adelante proyectos similares en otros rellenos sanitarios del país, con mayor participación de componentes nacionales en futuros emprendimientos.

Este tipo de emprendimiento agregaría valor al tratamiento de residuos sólidos, generando empleos especializados y otros. Además, en este proyecto, las inversiones y gastos operativos se solventarían en gran medida con ingresos por la venta de Reducciones Certificadas de Emisiones (RCE).

#### **5.3.1.2. Protección del medio ambiente**

La implementación del proyecto evitará emisiones de gases efecto invernadero por un monto superior a las 12 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>equivalente entre el año 2006 y 2030. Asimismo, el proyecto generará beneficios ambientales relacionados con la posible utilización de energías renovables y la reducción de emisiones de gases peligrosos y contaminantes.

- Reducción de compuestos hidrocarburos, excluyendo a metano, que contribuyen a la formación de smog fotoquímico en el área local.

- Reducción de los riesgos de incendio, a través de las mejoras en el manejo del biogás.
- Reducción de emisiones de gases con olores molestos y potencialmente peligrosos que se encuentran en concentraciones trazas en el biogás: sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ), compuestos orgánicos volátiles (COV), etc.
- Reducción de emisiones fugitivas a través de la cobertura superficial del relleno sanitario. Típicamente, el biogás genera un desplazamiento del oxígeno en la tierra de cobertura, perjudicando el crecimiento de las raíces de los árboles, arbustos o del pasto que podrían plantarse por sobre la cobertura final. Estas plantaciones protegerían la cobertura, evitarían la erosión del terreno y minimizarían la intrusión de aguas lluvias, con una subsecuente disminución en la generación de líquidos percolados.

La combustión del biogás capturado generaría pequeñas cantidades de óxidos de nitrógeno (NOx), material particulado y monóxido de carbono (CO), como ocurriría en la llama de una cocina a gas natural. Las emisiones de estos gases contaminantes están reguladas para mantener la calidad del aire, y el proyecto cumpliría con las regulaciones pertinentes. Para tal fin, se utilizarían quemadores cerrados especialmente diseñados para reducir las emisiones a proporciones mucho menores que una llama abierta al aire libre. Cabe mencionarse que, siendo el combustible principal el metano, las emisiones de material particulado (por ej. PM10) serían mínimas. Por otro lado, el quemador está diseñado a operar en altas temperaturas para quemar los compuestos orgánicos volátiles (COV).

### **5.3.1.3. Desarrollo social**

Como consecuencia de la implementación del proyecto, la comunidad aledaña al relleno se beneficiará por el mejoramiento de la calidad del aire y la disminución en los riesgos por un inadecuado manejo del biogás. Igualmente se mejorarán las condiciones laborales y el estado de salud de los empleados y demás personas que desarrollan actividades dentro del relleno sanitario por estar sometidos a un menor riesgo.

### **5.3.2. Perspectivas futuras**

Hoy en día la necesidad de co-generar mayores cantidades de energía eléctrica partiendo de biomasa o de los residuos sólidos ha adquirido una importancia mayor debido a la disminución de la capacidad de reducir la factura petrolera, así como por el impacto de su empleo en el ambiente.

En términos generales, 1m<sup>3</sup> de biogás sustituye a<sup>75</sup>:

- 0.61 litros de gasolina.
- 0.55 litros de ACPM.
- 0.58 litros de Kerosén
- 0.5 - 1.5 Kg de leña.
- 0.74 Kg de carbón vegetal.
- 1.43 kw/h de energía eléctrica.

Lo que supone un gran potencial energético acumulado, disponible para emplear como combustible renovable en la generación de energía, mediante la aplicación e implementación de tecnologías de aprovechamiento de residuos sólidos.

De otra parte, hasta ahora se desconoce si la evaluación ambiental es requerida para un proyecto de utilización de biogás para producción energía. Dichas evaluaciones concluyen que este tipo de proyectos tienen un beneficio completamente neto en el ambiente. Las emisiones (particularmente emisiones de NOx y CO) de plantas de energía que utilizan biogás como combustible son mucho menores que las producidas por un relleno sanitario sin control (incluyendo los gases de efecto invernadero como metano, compuestos orgánicos volátiles y ácido sulfhídrico y otros contaminantes). Las emisiones ambientales son reducidas aun más cuando la energía es exportada a la red desplazando energía producida por combustibles fósiles.

#### **5.3.2.1. Desarrollo sostenible**

Dentro de la concepción del termino “sostenible” aplicado al desarrollo, se puede admitir que los residuos derivados de las actividades económicas extractivas, transformadoras y consumidoras no son otra cosa que recursos naturales desaprovechados, y que los limites del hipotético crecimiento indefinido no esta solo en el agotamiento o progresiva disminución de la disponibilidad de los recursos, sino también por la limitada capacidad de la biosfera para acoger a los residuos producidos.

Además, el tema de los residuos afecta en general y de forma horizontal a todas las actividades, personas y espacios, convirtiéndose en un gran problema, no solo por lo que representa en términos de perdida de recursos, sino por la creciente incapacidad para encontrar lugares que permitan un acomodo correcto desde el punto de vista ecológico.

---

<sup>75</sup> Generación de Biogás y Abono Biológico por Degradación Anaerobia de Residuos Orgánicos. <<http://www.corpodib.com/>>

En vista de la creciente problemática alrededor de los residuos sólidos, se hace necesaria la aplicación de estrategias encaminadas a la reducción del volumen generado, la reutilización y reciclaje de los materiales como papel, vidrio, bricks, metales y plásticos, y la recuperación energética de los residuos no reciclables, mediante la implementación de sistemas de gestión de residuos integrales y racionales: realizando una recogida selectiva de todos los residuos en origen, llevando a cabo a continuación el reciclado de una parte de los materiales, incluso realizando compost con la materia orgánica vegetal y con la fracción orgánica que se recoja separada en origen de los RU, valorizando energéticamente todos los demás componentes no reciclables y vertiendo tan solo los inertes.

Igualmente se hace necesaria la adopción de programas encaminados a la captura y uso del gas metano producido en los rellenos sanitarios, a través de la adopción de tecnologías de captura, transferencia y posterior utilización de estos gases, mediante su combustión y aprovechamiento en la generación de energía, con lo cual se ejecutaría de forma total la política mundial de control de emisiones de gases de invernadero para atender la problemática del cambio climático global.

### **5.3.2.2. Protocolo de kyoto**

El Protocolo de Kyoto se firmó en 1997, luego de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC). El Protocolo estableció los objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GHG) para países desarrollados y economías en transición, los denominados países Anexo B; un programa de comercio de emisiones de gases de efecto invernadero; y la necesidad de futuras reuniones para establecer sanciones por cumplimiento de los objetivos y los procedimientos y regulaciones del nuevo programa de comercio de emisiones<sup>76</sup>. Los países que no hacen parte del Anexo B, incluyendo todos los países de ALC, no tienen compromiso cuantitativo bajo los términos del Protocolo. En general, el Protocolo de Kyoto establece que las emisiones de seis GHGs en países del Anexo B deben reducirse en promedio en un 5.2 por ciento con respecto a los niveles de 1990, entre el 2008 y el 2012. Como acciones más importantes de índole interno, el Protocolo permite que este grupo de países pueda cumplir sus compromisos mediante tres “mecanismos de flexibilidad”<sup>77</sup>:

- Comercio Internacional de Emisiones (CI) – comercio de derechos de emisiones entre países industrializados.

---

<sup>76</sup> Makarenko, Jay, (March 21st, 2002) *The Kyoto Protocol & Global Warming*

<sup>77</sup> UNDP/World Bank Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP). MANUAL PARA LA PREPARACION DE PROYECTOS DE GENERACION DE ENERGIA A PARTIR DEL GAS DE RELLENOS SANITARIOS EN AMERICA Y EL CARIBE. Abril 2004.

- Implementación Conjunta (IC) – ofrecimiento de unidades de reducción de emisiones para financiar proyectos en otros países industrializados.
- Mecanismos para un Desarrollo Limpio (MDL) – créditos por reducción de emisiones que resulten de proyectos ejecutados en países que no son parte del Anexo B. Una vez acreditadas, las reducciones se denominan Reducciones Certificadas de Emisiones (RCE).

No obstante las limitaciones existentes, el Protocolo de Kyoto sienta las bases para incentivar a los gobiernos, las corporaciones y los organismos internacionales a que tomen las medidas regulatorias pertinentes. El Protocolo generalmente es referenciado como un sistema de “reduzca y negocie”, en el que el país comprometido tiene asignado un nivel por encima del cual debe reducir sus emisiones. En la medida que estos países establezcan requerimientos regulatorios sobre sus compañías domésticas para cumplir con la meta global de reducción de emisiones, la presión regulatoria que enfrentarán las compañías privadas para cumplir con los límites domésticos, creará una demanda de créditos por reducción de carbono en regiones o países donde tal reducción resulta menos costosa.

Como ejemplos de los diferentes fondos de carbono que se han creado con ocasión del Protocolo de Kyoto están los tres fondos establecidos por el Banco Mundial a saber: Fondo Prototipo de Carbono (PCF, [prototypcarbonfund.org](http://prototypcarbonfund.org)), Fondo de Carbono de Desarrollo Comunitario (CDCF, [communitycarbonfund.org](http://communitycarbonfund.org)), y Fondo de Biocarbono ([biocarbonfund.org](http://biocarbonfund.org)). Las Naciones Unidas y el Instituto del Consejo de la Tierra implementaron el Programa de Comercio de Carbono “UNCTAD/Earth Council Institute Geneva (ECIG) Carbon Market Programme” ([r0.unctad.org/ghg/](http://r0.unctad.org/ghg/)). Adicionalmente, el gobierno de Holanda estableció el [Carboncredits.nl](http://carboncredits.nl) ([carboncredits.nl](http://carboncredits.nl)), y el Reino Unido “The Carbon Trust” ([www.thecarbontrust.co.uk](http://www.thecarbontrust.co.uk)) que actúa como un grupo capitalista comercial que financia tecnologías para la reducción de carbono en Gran Bretaña. En los Estados Unidos, se está desarrollando el “Chicago Climate Exchange” (CCX) ([www.chicagoclimatex.com](http://www.chicagoclimatex.com)) como un mercado multisectorial, multinacional y autorregulado de reducción de emisiones de GHG. Cada uno de los fondos de carbono o de los potenciales compradores de las RCE se enfoca hacia diferentes objetivos y tienen diferentes requerimientos de calificación según el tipo de proyectos que son elegibles para financiación. Estos fondos tienen también diferentes procedimientos para definir qué proyectos califican y de qué manera serán calculadas, revisadas y certificadas las emisiones. Sin embargo, para que las reducciones de emisiones se consideren reales, cada uno de estos fondos depende de la activación del Protocolo de Kyoto y del Mecanismo para un Desarrollo Limpio (MDL), y de los criterios que definen el mecanismo de implementación conjunta (IC).

El Mecanismo para un Desarrollo Limpio del Protocolo permite la creación, emisión y venta de las RCE de proyectos que se lleven a cabo en países en desarrollo, y es un incentivo financiero adicional para las compañías o agencias que están interesadas en la transferencia de tecnologías limpias. La venta adicional de RCE dentro el flujo de caja de un proyecto, aumentará las tasas internas de retorno (TIR) del proyecto en cuestión. Para un horizonte de más de 100 años, si se compara con el dióxido de carbono, el metano tiene un potencial de calentamiento global (GWP, siglas en inglés) que es 21 veces más eficiente atrapando el calor dentro de la atmósfera. Por consiguiente, la destrucción del metano genera sustancialmente más reducción de emisiones por volumen de gas que el dióxido de carbono. Estudios recientes sugieren que el GWP del metano debe ser incrementado de 21 a 23 (CMNUCC, Tercer Reporte de Evaluación). Aunque esta es una propuesta que aún tiene que ser acogida globalmente, si ello ocurre, la economía de los proyectos de administración de GRS va a mejorar aún más. En promedio, el incremento de la TIR en proyectos de residuos sólidos que involucran la destrucción o utilización de metano es de más del cinco por ciento<sup>78</sup>.

Otras entidades, incluso aquellas que están fuera del marco de Kyoto, pueden estar interesadas en la compra de créditos de emisiones. Por ejemplo, la legislación estatal en algunos estados de U.S. exige a las plantas de energía limitar sus emisiones de dióxido de carbono, y les permite comprar derechos de emisiones en el extranjero para cumplir con estos requerimientos (p.ej., Oregon). Empresas independientes pueden también estar interesadas en invertir en proyectos similares por fuera del marco de Kyoto, solo con el propósito de mantener unas buenas relaciones con la población, y aún sin que haya de por medio requerimientos regulatorios para hacerlo.

Los requerimientos específicos pueden variar dependiendo del régimen legal bajo el cual el comprador quiere que se valide la reducción de emisiones. Sin embargo, los conceptos y componentes básicos de cualquier proyecto financiero de carbono son prácticamente muy similares.

#### **5.3.2.2.1. Mercado de carbono**

Los mercados de carbono a nivel global empezaron a formarse como resultado del creciente reconocimiento de que el futuro del sistema global ambiental estará limitado al manejo del carbono, y como tal las instituciones políticas y económicas tendrán que modificar o reducir su dependencia de los combustibles fósiles. Con ocasión del Protocolo de Kyoto se establecieron varios fondos internacionales de carbono cuyo propósito es apoyar el desarrollo de proyectos orientados a reducir las emisiones antropógenas de carbono.

---

<sup>78</sup> Fernández-Asin, Francisco. *En Breve*, Nov. 2002, No. 13

El desarrollo del mercado de carbono y de la terminología asociada a la reducción de emisiones basadas en carbono, es aún complejo. Antes de que las partes interesadas emprendan una posible compra de reducciones de GHG, o en vender, es importante entender que el mercado en sí, se encuentra todavía en transición mostrando algunos avances en función de los resultados de la Conferencia de las Partes (CP) que se celebra cada año, escenario donde se clarifican los términos, condiciones y metodologías que se requieren para implementar el Protocolo de Kyoto.

Como tal, el valor “real” de las reducciones de emisiones es aún muy especulativo, no obstante ya hayan ocurrido algunas transacciones. De hecho, la mayoría de los negocios que se han promulgado han sido solo aquellos de acción temprana voluntaria.

En nuestro país, la Oficina Colombiana para la Mitigación del Cambio Climático forma parte del Ministerio del Ambiente. Esta oficina fue creada para implementar el compromiso a UNFCCC y COP. La Oficina tiene el rol de planificación y coordinación para la implementación de políticas en Cambio Climático (CC) así como también proveer información técnica sobre la situación de GHG. La Oficina se ha mantenido activa conduciendo diagnósticos en emisiones de GHG y ha producido indicadores en la contribución al calentamiento global del país.

#### **5.3.2.2.2. Gases de efecto invernadero**

Los GEI considerados por el Protocolo de Kyoto son los 6 gases que se piensa son los mayores responsables del incremento de la temperatura global y los disturbios en los patrones de clima. El efecto causado por emisión de GEI a la atmósfera es medido por el índice de Poder de Calentamiento Global (GWP). Los tres gases más frecuentemente encontrados en la naturaleza son<sup>79</sup>:

- Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>): Gas natural liberado como un producto de la combustión de combustibles fósiles, algunos procesos industriales y cambios en el manejo de usos de suelo. Se considera para el CO<sub>2</sub> el valor base del GWP igual a 1.
- Metano (CH<sub>4</sub>): Gas emitido en la minería de carbón, rellenos sanitarios, ganadería y extracción de gas y petróleo. El CH<sub>4</sub> tiene un GWP igual a 21 (21 veces más potente que el CO<sub>2</sub>).

---

<sup>79</sup> EGUREN, Lorenzo. El Mercado del Carbono en América Latina y el Caribe: Balance y Perspectivas. Serie Medio Ambiente y Desarrollo. División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos. Naciones Unidas en convenio con la CEPAL y la Cooperación Alemana GTZ, Santiago de Chile, Marzo de 2004.

- Óxido Nitroso (N<sub>2</sub>O): Gas emitido durante la elaboración de fertilizantes y combustión de combustibles fósiles donde el sector transporte es usualmente el contribuyente más significativo. N<sub>2</sub>O tiene un GWP igual a 296 (296 veces más potente que el CO<sub>2</sub>).

La actividad humana no es necesaria para que estos tres gases se liberen a la atmósfera, aunque esta actividad esta contribuyendo a aumentar su volumen. Además de estos GEIs, hay tres gases más que son principalmente producto de la ingeniería química:

- Hidrofluorocarbonados (HFCs). Se emite algunos procesos industriales y frecuentemente es usado en refrigeración y equipos de aire acondicionado. HFCs tiene un GWP igual a 1.300 (1.300 veces más potente que el CO<sub>2</sub>).
- Perfluorocarbonados (PFCs). Similar a los HFCs. PFCs fueron desarrollados e introducidos como una alternativa para los gases CFCs y HCFCs que destruían la capa de ozono. Estos gases son emitidos en una variedad de procesos industriales. PFCs tiene un GWP que va de 6.500 a 9.200.
- Hexafluoruro de Azufre (SF<sub>6</sub>). Aunque este gas es lanzado en muy pocos procesos industriales representa el más potente GEI. El GWP de SF<sub>6</sub> es igual 22.000. Es emitido durante la producción de magnesio y se aplica en algunos equipos eléctricos.

#### **5.3.2.2.1. Impactos potenciales del gas de residuo sólido**

La tasa de emisión a la cual la liberación de GRS (gases de efecto invernadero) se vuelve materia de discusión con las autoridades reguladoras y propietarios de propiedades vecinas está relacionada con un número de parámetros físicos entre los que se incluyen: la localización del relleno; la topografía circundante; los usos del suelo adyacente; las condiciones meteorológicas del entorno; y las características propias del sitio que inciden en la generación y recolección del GRS<sup>80</sup>.

Por lo general son las trazas de compuestos como el sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) y los mercaptanos los que generalmente son asociados con las molestias de olores desde los rellenos. Estos compuestos típicamente constituyen menos del 1 por ciento del GRS, aunque los olores son particulares para cada compuesto específico y pueden detectarse en concentraciones tan pequeñas como entre 0.001 y 0.005 partes por millón (Ppm). El nivel al cual estos químicos pueden ser dañinos para la salud humana varía, pero los órdenes de magnitud son mayores que aquellos antes referenciados. Esto quiere decir que la detección del olor no

---

<sup>80</sup> Mosher, F.A., and J.R. Yardley. "Landfill Gas Collection System Efficiencies: Facts and Fallacies" 19th Annual Landfill Gas Symposium Proceedings, Research Triangle Park, 19-21 March 1996. Ed. SWANA. Triangle Research Park. 1996. 133-45.

necesariamente es una indicación de que existe un riesgo para la salud aunque si puede ser una molestia real y una condición adversa con respecto a la calidad de vida en el área circundante del relleno.

El olor resultante de la liberación de GRS opera sobre un principio de umbral. Por lo tanto, si la cantidad del GRS excede el nivel del umbral para las condiciones particulares en el relleno, se podrá decir que hay presencia de olores relacionados con la producción del GRS. La siguiente analogía se utiliza para entender mejor el concepto de un umbral de olor. Piense que el volumen de una taza representa la cantidad total de GRS que es liberada antes de alcanzar el umbral del olor. El tamaño de esta "taza" para cada relleno está determinado por un número de factores, incluyendo la ubicación del relleno, la topografía circundante y las condiciones meteorológicas del entorno. Piense ahora que el agua vaciada dentro de la taza representa la liberación de GRS sin tratar. La taza puede estar "llena hasta el borde" y aún no derramar nada. Sin embargo, si se excede la capacidad de la taza, aunque sea en una gota, comenzará un flujo por la parte superior y el líquido se derramará. Por consiguiente, la cantidad de agua en la taza puede variar hasta copar la capacidad de la misma, esto es hasta que el límite de su volumen no sea excedido. Este concepto es análogo para las emisiones de olores que se originan desde un relleno. Para garantizar que no haya quejas por molestias de olores, la cantidad de GRS liberado necesita entonces estar por debajo del umbral de olor del relleno, para las condiciones de meteorología y demás factores antes señalados. Por consiguiente, en situaciones donde el olor asociado al GRS representa una preocupación mayor, el aspecto clave a considerar es cuánto gas es liberado por el relleno, y si esa cantidad excede o no el límite del sitio. No obstante, este aspecto es hasta cierto punto difícil de evaluar, dado que el límite del umbral no es un número fijo, sino que varía dependiendo de los cambios en las condiciones meteorológicas y de la distancia a la cual se encuentran los primeros receptores de los olores (p.ej., instalaciones institucionales, residentes, etc.).

El componente más importante del GRS desde todas las perspectivas es el metano, el cual constituye aproximadamente el 50 por ciento del GRS producido. El metano representa un potencial riesgo dado que es combustible y explosivo a concentraciones entre 5 y 15 por ciento en aire. Los GRS pueden también migrar por debajo de la superficie en zonas de suelos no saturados, especialmente durante los meses de invierno y primavera en los que la superficie está congelada o saturada de humedad en la superficie. Los GRS pueden acumularse también en estructuras confinadas con los potenciales riesgos que ello implica. El metano es inoloro y por lo tanto, es imposible de detectar si no se cuenta con los instrumentos apropiados.

El metano liberado por los rellenos es también conocido como un importante contribuyente de las emisiones de gases de efecto invernadero (GHG) que son los que contribuyen con el calentamiento global. En un horizonte de tiempo de más de 100 años, comparativamente con el dióxido de carbono, se considera que el

metano es 21 veces más eficiente en atrapar calor dentro de la atmósfera<sup>81</sup>. Dado que este valor está actualmente bajo revisión, incluso puede ser incrementado, la ejecución de proyectos de aprovechamiento del GRS será cada vez más fomentada. En términos globales, el metano que se genera en los rellenos y aguas residuales, a través de descomposición anaeróbica, representa cerca del 20 por ciento del total de emisiones de metano inducidas por el hombre<sup>82</sup>. Las emisiones de GRS a la atmósfera pueden reducirse a través de programas convencionales de reducción de residuos, tales como el reciclaje y el compostaje. Estas emisiones pueden también reducirse mediante la captura y combustión del GRS a altas temperaturas, proceso en el cual la fracción de metano en el gas se descompone en dióxido de carbono y agua.

#### **5.3.2.2.2. Beneficios potenciales de los gases de residuo sólido**

Aunque existen varios aspectos negativos que pueden surgir debido a la presencia del GRS, también existen ciertos beneficios asociados a un correcto manejo de ellos y a su potencial uso como fuente de energía. Los proyectos de manejo del GRS mediante la recolección y combustión del gas tienen el potencial de generar ingresos a través de la venta y transferencia de créditos por reducción de emisiones, lo cual a su vez se constituye en una oportunidad para mejorar el diseño y operación de los rellenos y para implementar un mejor sistema integral de administración de los residuos municipales.

Como se señaló en secciones anteriores, el GRS es aproximadamente 50 por ciento metano y es considerado equivalente a un combustible de grado bajo/medio. Este recurso puede aprovecharse en varias aplicaciones incluyendo uso directo como combustible para calefacción, generación eléctrica, y subproductos químicos comerciales. Adicionalmente a la mitigación de los problemas de olores y migración del GRS, su utilización genera también ingresos por la venta de “energía verde” y otros productos que incluso pueden sufragar los costos de operación y mantenimiento de los rellenos, e incentivar mejoras en el diseño y operación.

El mejoramiento global de la calidad del aire global, mediante la reducción de las emisiones es hoy por hoy uno de los objetivos primordiales tanto en los niveles nacionales como en el orden mundial. Los créditos de emisiones de gases de efecto invernadero (GHG Credits) y primas especiales por Energía Verde son dos de los mecanismos claves que están siendo planteados para ayudar a lograr la meta de “Reducción de Emisiones”. La venta de estos créditos puede tenerse en cuenta para mejorar la situación económica de un potencial proyecto. Existen diferentes terminologías que se refieren a la reducción de emisiones, entre las

---

<sup>81</sup> Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 1995.

<sup>82</sup> IPCC, "Solid Waste Management and Wastewater Treatment" in *Methodological and Technological issues in Technology Transfer* ed. Carlos Pereyra. 1999

cuales están los créditos por reducción de emisiones (RE), la reducción certificada de emisiones (RCE) y los créditos GHG.

Estas denominaciones se refieren básicamente a un mismo concepto, el cual puede ser definido más claramente como la cantidad de reducción de emisiones, convertida y representada en una unidad común de toneladas equivalentes de reducción de dióxido de carbono. La designación de las RCE (Reducción Certificada de Emisiones) asume que la reducción de emisiones ya ha sido certificada en cuanto al cumplimiento de una serie de estándares y requerimientos. Existen otras agencias u organismos certificadores que usan diferentes siglas pero los principios y bases fundamentales para el reconocimiento y cuantificación son básicamente los mismos.

### **5.3.2.3. Estructura del proyecto, condiciones del mercado y negocios**

Colombia tiene una fuente vasta de gas natural que esta disponible a bajo costo en muchas partes del país. Además, las plantas de energía de gas natural de ciclo combinada proveen energía a bajo costo. Por lo tanto, la energía generada por las plantas de biogás tendrá que competir con la generación de energía de bajo costo. Una alternativa seria vender el biogás directamente a usuarios con gran demanda ubicados cerca del relleno sanitario.

Hasta ahora, no hay proyectos de biogás en Colombia. Por lo que el primero(s) proyecto(s) tendrán que enfrentar varias barreras tales como:

- Conocimiento limitado de las posibilidades de proyectos de biogás por parte de las autoridades municipales.
- Falta de conocimiento de las tecnologías involucradas.
- Falta de personal capacitado para construir/operar proyectos de biogás.
- Incertidumbre sobre los índices de tarifa interna de las inversiones en proyectos de biogás y la posibilidad que los índices no sean muy altos.
- Costos altos de transacción por falta de experiencia.
- Instituciones financieras no tiene la experiencia y puede estar indispuestos a financiar los proyectos de biogás.
- Índices altos de descuentos.

Para reducir las barreras, Colombia se puede beneficiar con información recopilada y presentada en seminarios, a través de asistencia técnica, y estudios de factibilidad (tal como este). Hasta la fecha, varios

seminarios y organizaciones internacionales que proveen asistencia técnica han promovido proyectos de biogás en Colombia. Por ejemplo, España ha completado un estudio de este tipo de proyecto en un relleno de Medellín.

El gobierno de Bogotá (Unidad Ejecutiva de Servicios Públicos – UESP) ha llamado a una licitación para un proyecto para capturar el biogás en el relleno Doña Juana. La primera llamada de licitación fue hecha para el final del 2003. La licitación incluía la concesión del diseño, construcción y operación de la captura de biogás de acuerdo al MDL.

Siguiendo una audiencia pública, la fecha para la entrega de la propuesta fue pospuesta un par de veces, con la última fecha siendo septiembre del 2004. Sin embargo, ninguna propuesta ha sido presentada y esto probablemente se debe a las condiciones restrictivas de la licitación. UESP anticipa que la compañía/individuo ganador pague todos los costos de inversión y operación para el proyecto que sería bajo el MDL. Las Reducciones Certificadas de Emisiones (CERs) sería del gobierno local (UESP) que tiene derechos sobre los residuos sólidos. La UESP le entregaría un porcentaje (entre el 7% y 20%) de los CERs al compañía/individuo ganador. A los precios actuales y futuros de CERs, pocos proyectos de recuperación de biogás serán económicamente viables considerados las ganancias de CERs. Si entre el 80% y 93% de las ganancias son para el Municipio entonces ningún proyecto será económicamente viable.

#### **5.3.2.4. Competitividad de proyectos de MDL frente al mercado internacional de carbono**

El análisis de la competitividad de proyectos MDL frente al mercado internacional de carbono se basa en la comparación del costo de reducir una tonelada de CO<sub>2e</sub> y el precio por CER en el mercado (CER representa una tonelada de CO<sub>2e</sub> reducida).

Este análisis permite determinar la competitividad del programa MDL frente al mercado internacional de carbono. Si a un empresario le cuesta US\$ 0.29 generar un CER y lo puede vender en US\$4, \$5 o \$6, indica que puede ser un buen negocio participar en el programa MDL. Este sistema de análisis de costos y beneficios es estándar en los mercados de reducción de emisiones. Cuando un empresario conoce su costo de reducción de emisiones, el precio de venta y la cuantía de CERs que su proyecto puede generar anualmente, ayuda a determinar la utilidad para su empresa de ofrecer el servicio de reducción de emisiones a empresas europeas, canadienses o japonesas.

## 5.4. APLICACIONES

### 5.4.1. Generación de energía.

El Biogás (también conocido como Biomasa) es una opción que ha tenido una buena aceptación como fuente alterna de energía, ya que presenta importantes ventajas económicas y ambientales.

El costo nivelado de esta tecnología es de entre 5 y 8 centavos de USD/kWh<sup>83</sup>, lo cual podría considerarse relativamente alto con respecto a otras fuentes de generación (incluso las alternas). Sin embargo, debe considerarse que dentro de este costo ya está incluido el desarrollo y equipamiento del relleno sanitario. Pese a lo elevado de su costo, debe tomarse en cuenta que independientemente de la decisión de construir una central de biogás, la basura debe confinarse en un relleno sanitario debido a que en la actualidad los tiraderos a cielo abierto no son permitidos. En otras palabras, se puede obtener un beneficio a partir de una actividad obligatoria como la disposición de la basura en un relleno sanitario para cumplir con las normas ecológicas.

Los rellenos sanitarios consisten en un área especial para confinar la basura y evitar que cualquier producto derivado de dicha confinación contamine el medio ambiente y los mantos acuíferos. Durante la construcción del relleno sanitario se coloca un sistema de tubos de extracción los cuales serán utilizados para extraer el biogás, producido a lo largo de la vida útil del relleno sanitario. Estos tubos están cubiertos por una capa de grava, que sirve de filtro. En la parte superior, el tubo de extracción está cubierto por un sello de arcilla para evitar fugas de biogás. Todo este sistema de tubos de extracción está conectado a un sistema de recolección de biogás el cual conduce el combustible a los motores de combustión y a los generadores. La capacidad de generación estará en función del tamaño del relleno sanitario, así como de la composición de la basura. Una vez que el relleno sanitario ha llegado a su límite de capacidad, se coloca una capa de arcilla para confinar la basura y se da inicio al proceso de descomposición y producción de biogás y lixiviados.

El principio de operación de las centrales de biogás consiste en aprovechar los gases y demás productos que se generen en el relleno sanitario para utilizarlos en un motor de combustión interna y generar energía eléctrica. Como es sabido, la basura está integrada por materia orgánica e inorgánica. El material inorgánico es transformado por bacterias facultativas y anaerobias, a través de una serie de reacciones, en gas metano (55%), dióxido de carbono (40%), vapor de agua y otros elementos (5%). A toda esta mezcla de gases se le conoce como biogás.

---

<sup>83</sup> Transforma. Regulación eléctrica: avances y tendencias. Año 2 numero 4 mayo de 2003. unidad de reestructuración eléctrica. <<http://www.cre.gov.mx>>

La generación de energía eléctrica a partir del biogás podría considerarse como parte de una solución. De esta manera, los municipios obtendrían un beneficio económico a partir del aprovechamiento de dicho combustible, se reducirían los costos de la disposición de la basura y se cumpliría con la legislación ambiental y las prácticas internacionales recomendadas. La utilización de biogás cumple un doble objetivo: se aprovechan los rellenos sanitarios y se diversifican las fuentes de generación de energía.

Igualmente, la producción de electricidad cogenerada se está convirtiendo en el mundo en una fuente de ingresos para toda industria de procesos y en una vía de contribuir al equilibrio ambiental. El principio básico de la cogeneración es el aprovechamiento de la energía residual resultante de todo proceso termodinámico de conversión y utilización de energía que en procesos separados es disipada al ambiente.

Un aspecto de interés de la dimensión tecnológica es la preservación de tecnologías tradicionales que creen pocos desechos contaminantes y que sean capaces de reciclar sus desechos y que trabajen o apoyen los ecosistemas además de apoyar las políticas gubernamentales que permitan la más rápida adopción de tecnologías mejoradas o que incrementen acciones que las fomenten, como es el caso de la generación de electricidad masivamente utilizando la biomasa como combustible pues “cada kWh generado con recursos renovables disminuyen en 1 kg las emisiones de CO<sub>2</sub>”<sup>84</sup>.

#### **5.4.1.1. Beneficios y ventajas**

El aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía ofrece un amplio rango de beneficios ambientales: puede contribuir a mitigar el cambio climático y el efecto invernadero, reducir la lluvia ácida, prevenir la erosión de los suelos y la contaminación de las fuentes de agua, reducir la presión provocada por la basura urbana, enriquecer el hábitat de la vida silvestre y ayudar a mantener la salud humana y estabilidad de los ecosistemas.

- **Cambio climático:** La actividad humana, principalmente el uso de combustibles fósiles, emite millones de toneladas de los denominados “gases de efecto invernadero” a la atmósfera. Estos incluyen el dióxido de carbono y el metano, entre otros, y contribuyen a modificar el clima global.

El metano que escapa de los rellenos sanitarios y de las aguas residuales de procesos industriales, agrícolas y urbanos, puede ser minimizado al convertirlo en energía térmica, eléctrica o mecánica. Todas las cosechas, incluyendo las plantaciones energéticas, capturan carbono a través de las plantas mientras crecen, produciendo un balance natural de carbono en los suelos. Cuando se quema biomasa, el dióxido de carbono

---

<sup>84</sup> Green Peace International. Power to change. /Green Peace. -- (Holanda): Ed. Green Peace.-- 1995

liberado es absorbido por la siguiente cosecha en crecimiento; este se denomina un “ciclo cerrado de carbono”. De hecho, la cantidad de carbono secuestrado puede ser mayor que la del liberado durante la combustión debido a que muchos de los cultivos energéticos son permanentes: al utilizar solo una parte de la planta las raíces, además de estabilizar los suelos, secuestran carbono en su regeneración año tras año.

- **Lluvia ácida:** La lluvia ácida es causada, principalmente, por las emanaciones de sulfuro y óxido de nitrógeno de la combustión de hidrocarburos y causa la muerte de cultivos y la contaminación de las aguas; además de ser nocivo para la vida humana y silvestre. Dado que la biomasa no tiene contenido de sulfuro o sus niveles son insignificantes, su conversión en energía y emanaciones no producen lluvia ácida.
- **Erosión de suelos y contaminación de agua:** Los cultivos y plantaciones energéticas ayudan a estabilizar los suelos, lo cual reduce la erosión y la pérdida de nutrientes. Los procesos de digestión anaeróbica reducen la contaminación del agua debido a que se usan desechos animales y agrícolas antes de que penetren en los suelos y lleguen a los ríos. La combustión de los desechos de aserrío puede evitar que el aserrín y las astillas producidas en los aserraderos contaminen los ríos que deben alimentar, luego, los procesos agrícolas aguas abajo.
- **Contaminación por basura urbana:** El aprovechamiento de los residuos urbanos, agrícolas y forestales reduce el volumen de los rellenos sanitarios y la generación del gas metano. Esto permite convertir un producto contaminante en energía libre de emanaciones nocivas para el ambiente, reduciendo significativamente los problemas que conlleva el manejo de estos desechos.
- **Hábitat silvestre:** Los cultivos energéticos son hábitat de todo tipo de vida silvestre; por ejemplo los árboles ofrecen posibilidades para que la vida acuática florezca, al proveer sombra y estabilizar los cauces de ríos y las orillas de los lagos. Ciertas plantaciones energéticas pueden ofrecer refugio para aves y otros animales, especialmente si son planificados apropiadamente; además, pueden ser un soporte vital para bosques centenarios que albergan hábitats no sustituibles.

Entre las principales ventajas que presentan las fuentes renovables contra las tradicionales se pueden destacar las siguientes:

- **Fuente de energía renovable:** La biomasa es una fuente renovable de energía y su uso no contribuye a acelerar el calentamiento global; de hecho, permite reducir los niveles de dióxido de carbono y los residuos de los procesos de conversión, aumentando los contenidos de carbono de la biosfera.

- Ayudan a mitigar el efecto invernadero y la contaminación de los acuíferos: La captura del metano de los desechos agrícolas y los rellenos sanitarios, y la sustitución de derivados del petróleo, ayudan a mitigar el efecto invernadero y la contaminación de los acuíferos.
- Insumo orgánico: La combustión de biomasa produce menos ceniza que la de carbón mineral y puede usarse como insumo orgánico en los suelos.
- Precio-independiente: La biomasa es un recurso local que no está sujeto a las fluctuaciones de precios de la energía, provocadas por las variaciones en el mercado internacional de las importaciones de combustibles. En países en desarrollo, su uso reduciría la presión económica que impone la importación de los derivados del petróleo.
- Incentivo a las economías rurales: El uso de los recursos de biomasa puede incentivar las economías rurales, creando más opciones de trabajo y reduciendo las presiones económicas sobre la producción agropecuaria y forestal.

#### 5.4.1.2. Barreras y desventajas

El desarrollo de la biomasa como fuente de energía enfrenta barreras que pueden resumirse en cuatro aspectos:

- **Información:** la pequeña y mediana industria carecen de la información que les permita valorar debidamente el valor agregado que pueden reportar con el aprovechamiento energético de los residuos. La falta de conocimiento provoca cálculos inadecuados de las inversiones iniciales y la tasa de retorno, por lo que no se tiene una idea adecuada de la rentabilidad de los proyectos de recuperación energética de los desechos.
- **Financiero:** Al no existir programas financieros en la banca que soporten las inversiones en este tipo de proyectos, los productores están obligados a financiarlos con su propio capital o a partir de endeudamiento bajo las tasas de interés comerciales del mercado. Esta situación hace disminuir la tasa de retorno y, por ende, la factibilidad económica.
- **Política:** a pesar de que existen programas de gobierno enfocados al fortalecimiento de las tecnologías, se han establecido incentivos por parte de las entidades financieras para proyectos de generación de energía a través de combustibles alternativos o la sustitución de combustibles fósiles. Pero existe un gran desconocimiento en cuanto a los beneficios del establecimiento de combustibles alternativos mediante la política nacional de biocombustibles. En toda el área, el aumento en las tarifas eléctricas y el costo de los combustibles podrían favorecer el desarrollo de la biomasa y los biocombustibles, como una vía para la reducción de las facturas por insumos energéticos.

▪ **Institucional:** no existe en la región la capacidad y el soporte técnicos formales para el desarrollo y aplicación de estas tecnologías. Algunas empresas vinculadas con capitales extranjeros han realizado acciones en algunos campos, como la digestión anaeróbica, pero no se cuenta con suficientes empresas que ofrezcan equipo y soporte técnico.

Así mismo, a pesar de que la generación a partir de fuentes renovables tiene costos de operación relativamente bajos o nulos, se requiere contar con apoyos adicionales para competir con fuentes tradicionales de generación, pues entre las principales desventajas que presentan las fuentes renovables contra las tradicionales se pueden destacar las siguientes:<sup>85</sup>

- Elevados costos de inversión: A pesar que se ha observado una importante reducción en el costo de este tipo de tecnología, las fuentes renovables de energía todavía presentan costos nivelados de energía todavía por arriba de los de las fuentes tradicionales.  
Estos costos nivelados por unidad de energía (\$/kWh) consideran la inversión inicial, el costo de financiamiento, los costos de operación y los de mantenimiento a lo largo de la vida del proyecto. Mientras que la generación alterna todavía puede llegar a presentar costos nivelados de generación de entre 5 y 8.5 centavos de USD/kWh, la generación tradicional presenta costos de hasta 3 centavos.
- Baja densidad relativa de energía: Por su naturaleza, la biomasa tiene una baja densidad relativa de energía; es decir, se requiere su disponibilidad en grandes volúmenes para producir potencia, en comparación con los combustibles fósiles, por lo que el transporte y manejo se encarecen y se reduce la producción neta de energía. La clave para este problema es ubicar el proceso de conversión cerca de las fuentes de producción de biomasa, como aserraderos, ingenios azucareros, granjas o vertederos municipales de residuos sólidos, donde los desechos de aserrío, alimentos, el bagazo de caña y las excretas de animales están presentes.
- Generación intermitente: no pueden garantizar una generación continua ya que dependen de la disponibilidad de recursos naturales cuyo flujo y disponibilidad es normalmente intermitente.
- Generación dispersa: La generación alterna requiere grandes extensiones de territorio para generar electricidad. Mientras una central solar requiere de entre 5 y 7 acres (2.02 a 2.83 hectáreas) para generar un MW, una central de ciclo combinado requiere 0.04 acres (0.02 hectáreas) para generar la misma cantidad de energía.

---

<sup>85</sup> Transforma. Regulación Eléctrica: avances y tendencias. Año 2 numero 4 mayo de 2003. unidad de reestructuración eléctrica: <<http://www.cre.gov.mx>>

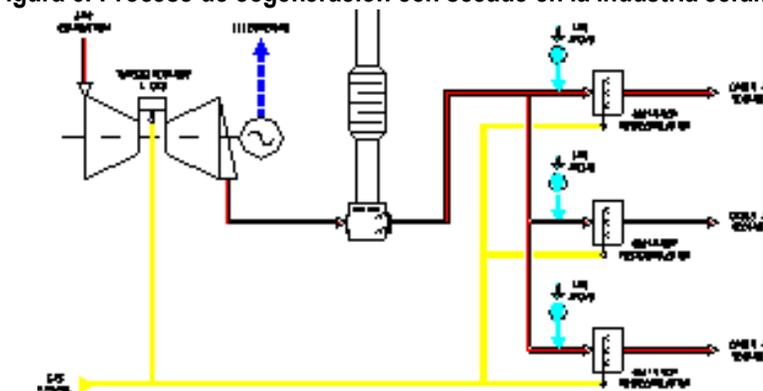
- **Potencial calórico:** El potencial calórico de la biomasa es muy dependiente de las variaciones en el contenido de humedad, clima y la densidad de la materia prima.
- **Producción y procesamiento:** La producción y el procesamiento de la biomasa pueden requerir importantes insumos, como combustible para vehículos y fertilizantes, lo que da como resultado un balance energético reducido en el proceso de conversión. Es necesario minimizar el uso de estos insumos y maximizar los procesos de recuperación de energía.
- **Combustión:** Su combustión incompleta produce materia orgánica, monóxido de carbono (CO) y otros gases. Si se usa combustión a altas temperaturas, también se producen óxidos de nitrógeno. A escala doméstica, el impacto de estas emanaciones sobre la salud familiar es importante.
- **Aspectos políticos y económicos:** Aún no existe una plataforma económica y política generalizada para facilitar el desarrollo de las tecnologías de biomasa, en cuanto a impuestos, subsidios y políticas que cubren, por lo general, el uso de hidrocarburos. Los precios de la energía no compensan los beneficios ambientales de la biomasa o de otros recursos energéticos renovables.

## 5.4.2. Aplicaciones proyectadas de la cogeneración

### 5.4.2.1. Secado

Se han desarrollado numerosas aplicaciones al secado<sup>86</sup>, especialmente en industrias cerámicas que utilizan atomizadores. Estas plantas son muy simples en su concepto y muy económicas, ya que los gases calientes generados por una turbina o un motor son utilizables directamente en el proceso de secado.

**Figura 5: Proceso de cogeneración con secado en la industria cerámica**



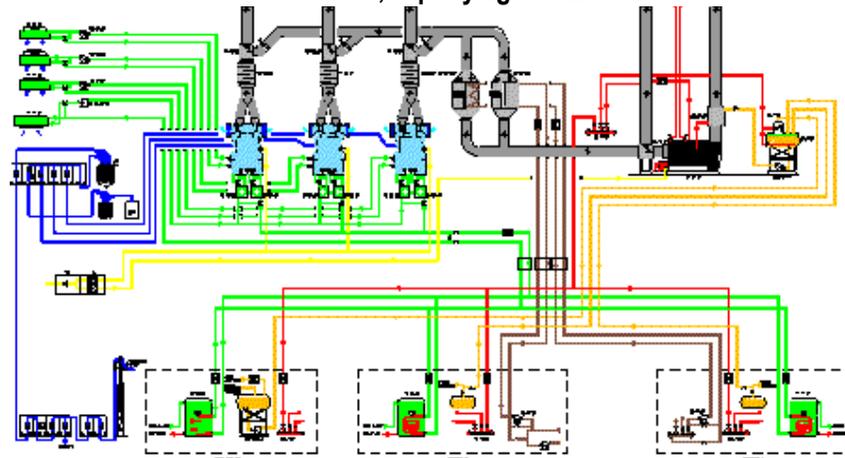
Fuente: Cogeneración. AESA: Asesoría Energetica S.A. Ingeniería, Estudios y Proyectos.  
<<http://www.aesa.net/aesa/cogeneracion/cogeneracion.htm>>

<sup>86</sup> Cogeneración. AESA: Asesoría Energetica S.A. Ingeniería, Estudios y Proyectos.  
<<http://www.aesa.net/aesa/cogeneracion/cogeneracion.htm>>

#### 5.4.2.2. Industrias textiles

Muchas industrias textiles utilizan máquinas del tipo RAME alimentadas con aceite térmico. Cuando se dispone de gas natural, la tendencia es sustituir el aceite térmico por gases de combustión directa. Como alternativa a esta solución es posible utilizar el gas en motores para cogenerar electricidad y producir el aceite térmico en una caldera de recuperación. De esta forma se logran rentabilidades superiores a la simple conversión a gas natural.

**Figura 6: Proceso de cogeneración en la Industria Textil con producción de aceite térmico, vapor y agua caliente.**



Fuente: Cogeneración. AESA: Asesoría Energética S.A. Ingeniería, Estudios y Proyectos.  
<<http://www.aesa.net/aesa/cogeneracion/cogeneracion.htm>>

#### 5.4.2.3. Aplicaciones para industrias medioambientales

Efectivamente, plantas depuradoras de tipo biológico, o de concentración de residuos, o de secado de fangos, etc. son demandantes de calor y, por lo tanto, son potencialmente cogeneradoras. En estas aplicaciones la cogeneración puede ser un factor importante para la reducción del coste de tratamiento de los residuos y tanto las empresas especializadas en este tratamiento como las entidades municipales con responsabilidad sobre las mismas, deberían contemplar las aplicaciones de la cogeneración en sus planteamientos de futuro.

Igualmente, el empleo de otras fuentes de combustibles alternas permitiría introducir nuevas tecnologías, tanto en el caso de la producción de vapor, como en la producción de energía eléctrica; permitiría la introducción de nuevas tecnologías que posibilitarían la disminución a la dependencia de combustibles fósiles. De igual manera se generaría un gran interés por parte de los productores de caña de azúcar, arroz, café y en general del sector agroproductor nacional; e igualmente de las empresas del sector de los servicios públicos, por ingresar al mercado de la energía, conociendo de antemano del papel estratégico que tiene la energía en el desarrollo y seguridad de un país.

## CONCLUSIONES.

Después del estudio y contextualización de la información contenida, presentamos a continuación una síntesis o conclusión de los resultados obtenidos para el diseño preliminar de una dependencia del relleno sanitario que garantice la gestión de los residuos sólidos orgánicos generados en la ciudad de Cartagena de Indias, a través del aprovechamiento para la generación de energía eléctrica y obtención de abono orgánico, mediante la implementación de tecnologías y procesos que faciliten su reutilización y posterior disposición final.

En primera instancia, luego de identificar, describir, y analizar las tecnologías, procesos, infraestructura y equipos requeridos para la obtención de abono orgánico o compost como subproducto del proceso de biometanización de la fracción orgánica de los residuos sólidos y la generación de energía eléctrica a partir de la incineración de combustible derivado de residuos (CDR), producto del tratamiento de la fracción orgánica e inorgánica de los residuos sólidos, y la combustión del biogás obtenido por la biometanización de la fracción orgánica de los residuos, se optó por tomar los siguientes procesos como eje fundamental para la valorización de los residuos sólidos: selección y clasificación, digestión anaerobia, compostaje, producción de CDR, combustión de CDR, cogeneración, tratamiento de gases de combustión, tratamiento de efluentes, reciclaje y por ultimo el vertido controlado de los materiales no susceptibles de valorizar dentro de los procesos. En conjunto, los procesos permitirán el aprovechamiento de aproximadamente 95% de los residuos sólidos generados en la ciudad, dado que residuos como los hospitalarios y residuos tóxicos requieren de otras técnicas de tratamiento para su posterior disposición final, reduciendo la cantidad de residuos a disponer y además al estar constituidos únicamente por inorgánicos inertes, contribuirá fuertemente a la reducción de gases generados y se recuperarán los lixiviados que contaminan el suelo y aguas (subterráneas y superficiales), ambos derivados de la actual disposición final de residuos.

Posteriormente, se calculó la capacidad requerida para el procesamiento del biogás y del compost orgánico, necesarios para la operación de la planta de compostaje y cogeneración eléctrica con base en los niveles actuales de generación de residuos per capita. Para ello se proyectaron los niveles de producción de residuos sólidos en la ciudad a partir de la tasa de crecimiento o decrecimiento poblacional a presentarse durante la vida útil del proyecto. Los resultados obtenidos nos permitieron analizar en un rango de tiempo la capacidad de procesamiento de los residuos sólidos, la cual se proyectó en aproximadamente 700 toneladas diarias de residuos. Igualmente se evaluó la capacidad de generación de biogás a partir de la digestión anaerobia del

material orgánico presente en los residuos sólidos, y así mismo, se calculó el potencial para la generación de energía y su potencial calorífico, para luego establecer la capacidad de la central de cogeneración. Para la generación de biogás se calculó una capacidad de producción de 52'381.658,69lt de biogás procedentes de la digestión anaerobia de 450 toneladas diarias de residuos orgánicos, biogás que se destinará para la combustión de CDR y la alimentación de la central de cogeneración, transformándolo en energía eléctrica o calórica, para abastecimiento de la Planta. La recuperación de gas metano por el proceso de descomposición de los residuos orgánicos en los biodigestores, permitirá su aplicación como recurso energético y se logrará un notable impacto ambiental al evitar su acumulación y emisión a la atmósfera en los rellenos sanitarios controlados, así mismo la producción de materiales no susceptibles de aprovechamiento se minimizará dado que solo residuos como las escorias procedentes del proceso de combustión, cenizas, trazas de agentes reductores procedentes del tratamiento de los gases de combustión y otros residuos menores subproducto de los procesos serán dispuestos en celdas especiales para minimizar sus efectos sobre el medio ambiente.

Como método alternativo, se ha propuesto la captación del biogás de vertederos producto de la descomposición del material depositado, determinando a partir de las cantidades generadas y tratadas de residuos sólidos, la capacidad de generación de biogás, los factores de emisión de la fracción que realmente se degrada y de la fracción que se libera como metano, así como su grado de recuperación, para establecer su disposición ya sea con fines de combustión para generar calor o para generar electricidad.

En cuanto a la viabilidad económica del proyecto, se analizó y se determinó como alternativa la venta de reducciones certificadas de emisiones de GHG con base en los precios considerados por el Banco Mundial, el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) y el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (UNFCC) para proyectos que quieran acceder al Mercado del Carbono. Este tipo de proyecto ha adquirido gran apoyo por parte de organizaciones no gubernamentales a nivel mundial dado los efectos presentes y futuros del calentamiento global y por consiguiente del cambio climático debido a los efectos de los gases de efecto de invernadero sobre el medio ambiente, y así mismo ayuda a mitigar los efectos de estos gases dado que se reducen las cargas contaminantes de gases como el metano, al ser quemado y transformado en dióxido de carbono, vapor de agua y otros gases los cuales son menos nocivos para el medio ambiente.

Para finalizar, según datos procedentes de la unidad de planeación minero-energética presentados en el plan de expansión del sector, el país necesita la generación de 1000 nuevos megavatios de energía hasta el 2015 para poder atender con holgura la demanda interna y el negocio de las exportaciones de electricidad hacia países como Panamá y Ecuador. La implementación de este tipo de proyectos solventaría en parte la necesidad del país en cuanto a energía para exportación.

## BIBLIOGRAFIA

Alcaldía de Cartagena. Programa de las Naciones Unidas Para el Desarrollo PNUD COL 00/005. PLAN DE GESTION INTEGRAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS DEL DISTRITO DE CARTAGENA. Cartagena de indias, Enero 2004.p47

ALTOMONTE, Hugo. Et All. RENEWABLE ENERGY SOURCES IN LATIN AMERICA AND THE CARRIBEAN: SITUACION AND POLICY PROPOSALS. GTZ/ECLAC. LC/L.2132. 19 May 2004. 166p.

American Society of Civil Engineers (ASCE).  
<<http://www.asce.org>>

AUGENSTEIN, D. and J Pacey, "Landfill Methane Models" 14th Annual Landfill Gas Symposium Proceedings, Research Triangle Park, 1991. Ed. SWANA. Triangle Research Park. 1991. III-87 – III-111.

AVALOS ORTIZ, Carlos Alberto. EVALUACION PRELIMINAR DEL CASO DE GUATEMALA SOBRE COGENERACION ELECTRICA. FAO Document Repository

Banco Mundial. ESTUDIO DE PRE-FACTIBILIDAD PARA LA RECUPERACION DE BIOGAS Y PRODUCCION DE ENERGIA RELLENO SANITARIO EL CARRASCO BUCARAMANDA, COLOMBIA. Preparado por SCS Engineers. Junio de 2005. File N°02204055.03. 112p.

\_\_\_\_\_. ESTUDIO DE PRE-FACTIBILIDAD DE RECUPERACION Y UTILIZACION DE BIOGAS EN EL RELLENO SANITARIO EL COMBEIMA, IBAGUE, COLOMBIA. Preparado por SCS Engineers. Junio de 2005. File N°02204055.03. 112p.

\_\_\_\_\_. ESTUDIO DE PRE-FACTIBILIDAD DE RECUPERACION Y UTILIZACION DE BIOGAS EN EL RELLENO SANITARIO LA ESMERALDA MANIZALES, COLOMBIA. Preparado por SCS Engineers. Junio de 2005. File N°02204055.03. 112p.

BAHAMONDE, Ana. Eliminación de NOx en Gases de Combustión, Reducción Catalítica Selectiva. Instituto de Catálisis Petroleoquímica, CSIC, Madrid, España.

BERMUDEZ AVITE, Jaime. La Gestión de los Residuos Sólidos Urbanos: Situación actual y perspectivas futuras. SOGAMA. 2004. 23p.

Bioagricola del Llano S.A. E.S.P.  
<<http://www.bioagricoladelllano.com.co/website/index.php>>

BRIGANTI, DIAZ Y VERGARA. Lineamientos para la separación en la fuente de los Residuos Sólidos Producidos por el Sector Residencial (estratos 4, 5, 6.) de la Ciudad de Cartagena, 2002.

CABRERA JIMEMEZ, Juan Antonio. CLAVER CABRERO, Ana. SANCHEZ SUDON, Fernando. LAS TENDENCIAS TECNOLOGICAS EN EL SECTOR ESPAÑOL DE LA ENERGIA. Centro de investigaciones energéticas, medioambientales y tecnológicas, CIEMAT. ECONOMIA INDUSTRIAL. N° 342. 2001.

CARDIQUE-INGEAMBIENTE. Estudio e Identificación de Residuos Sólidos Urbanos y Plan de Reciclaje en la Ciudad de Cartagena. Diciembre 1998.

Centro Nacional de Producción Más limpia CNPML.  
<<http://www.cnpml.org/html>>. Fecha de consulta: 21 de julio de 2005.

Cogeneración. AESA: Asesoría Energética S.A. Ingeniería, Estudios y Proyectos.  
<<http://www.aesa.net/aesa/cogeneracion/cogeneracion.htm>>. Fecha de consulta: 4 de febrero de 2006.

Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico.  
<<http://www.cra.gov.co/>>

CONESA, Juan A. PRODUCCION DE ENERGIA ELECTRICA EN REGIMEN ESPECIAL. INCINERACION DE RESIDUOS SÓLIDOS. Departamento de ingeniería Química. Universidad de Alicante, España.

CONIL, Philippe. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES Y DESECHOS, CON ENFASIS SOBRE LA DIGESTION ANAEROBIA, estudio de caso: Colombia. 1996

Constitución Política de Colombia, 1991.

Corporación Autónoma Regional de Antioquia. CORANTIOQUIA.  
<[http://www.corantioquia.gov.co/index.php?option=com\\_content&task=category&sectionid=1&id=1&Itemid=26](http://www.corantioquia.gov.co/index.php?option=com_content&task=category&sectionid=1&id=1&Itemid=26)>

Corporación Autónoma Regional del Atlántico. CRA.  
<<http://www.crautonomia.gov.co>>

Corporación Autónoma Regional de Caldas. CORPOCALDAS.  
<<http://www.corpocaldas.gov.co>>

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. CVC.  
<<http://www.cvc.gov.co>>.

CHIAVENATO, Idalberto, Introducción a la Teoría General de la Administración, 3 ED. Mc Graw Hill.

Decreto No. 0977 por medio del cual se adopta el Plan de Ordenamiento Territorial del Distrito Turístico y Cultural de Cartagena de Indias. 2002, p

Diario EL MUNDO (Salvador).  
<http://www.elmundo.com.sv/vernota.php?nota=51062&fecha=19-12-2005>

EGUREN, Lorenzo. El Mercado del Carbono en América Latina y el Caribe: Balance y Perspectivas. Serie Medio Ambiente y Desarrollo. División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos. Naciones Unidas en convenio con la CEPAL y la Cooperación Alemana GTZ, Santiago de Chile, Marzo de 2004.

El Compostaje. INFOAGRO.  
<<http://www.infoagro.com/abonos/compostaje.asp>>. Fecha de consulta: 12 de Julio de 2005.

ELIAS, Xavier. Valorización Energética de Residuos. Aplicaciones de la Valorización Energética. 36p.

\_\_\_\_\_. La Incineración de Residuos y su Adecuación a la Resolución 0058. 1º parte. Tipos de Hornos, Dimensionado y Mantenimiento. Chimeneas, Escorias y Cenizas Volantes, Emisiones Contaminantes. Bogota. Agosto de 2003. 35p.

\_\_\_\_\_. La Incineración de Residuos y su Adecuación a la Resolución 0058. 2º parte. Impacto Ambiental, Medidas Correctoras y Legislación Comparada. Bogota. Agosto de 2003. 42p.

\_\_\_\_\_. La Incineración de Residuos y su Adecuación a la Resolución 0058. 3º parte. Los residuos Como Combustibles. Nociones Sobre la Combustión. Bogota. Agosto de 2003. 27p.

El Proceso de la Investigación. Carlos A. Sabino, primera edición.

El Universal, Sección Actualidad, julio 31 de 2005

Estudio de Impacto Ambiental del Relleno Sanitario Loma de los Cocos. 2002.

European Environment Agency. Europe's Environment: The Second Assessment. 1998.

Europa: The European Union.

<[http://europa.eu.int/smartapi/cgi/sga\\_doc?smartapi!celexapi!prod!CELEXnumdoc&lg=ES&numdoc=31996L0061&model=guichett](http://europa.eu.int/smartapi/cgi/sga_doc?smartapi!celexapi!prod!CELEXnumdoc&lg=ES&numdoc=31996L0061&model=guichett)>

Europa: The European Union.

<[http://europa.eu.int/comm/environment/eufocus/waste\\_management\\_es.pdf](http://europa.eu.int/comm/environment/eufocus/waste_management_es.pdf)>

Federación Colombiana de Municipios.

<<http://www.fcm.org.co/es/noticia.php?uid=0&todo=0&det=3644&leng=es>>

FERNÁNDEZ-ASIN, Francisco. En Breve, Nov. 2002, No. 13

Fundación Social. Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos en la Ciudad de Cartagena. Noviembre de 1998

Generación de Biogás y Abono Biológico por Degradación Anaerobia de Residuos Orgánicos.

<<http://www.corpodib.com/estudios3.htm>>. Fecha de consulta: 18 de Marzo de 2004.

Green Peace International. Power to change. /Green Peace. - - (Holanda): Ed. Green Peace.- - 1995

HAM, Robert K., and MORTON A. Barlaz, "Measurement and Prediction of Landfill Gas Quality and Quantity" in Sanitary Landfilling : Process, Technology and Environmental Impact ed. Thomas H. Chistensen, Raffaello Cossu, and Rainer Stegmann (Academic Press, New York, 1989) p.155-158

H. Bosh, F. Janssen, Catalysis Today 2 (4) (1988) 1-531

ICONTEC. Compendio Tesis y otros trabajos de Grado. Santa fe de Bogotá, 1996.

IDEAM. Inventario Nacional de Fuentes y Sumideros de Gases de Efecto Invernadero. Módulo Residuos. Marzo de 1990.

INGENIO DEL CAUCA S.A. INCAUCA.

<<http://www.incauca.com/incauca/energia.html>>. Fecha de consulta: 12 de Enero de 2005.

Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

<<http://www.humboldt.org.co/humboldt/homeFiles/institucional/ley99>>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM.

<<http://www.ideam.gov.co>>.

Instituto PEMBINA para el Desarrollo Apropiado. EL MECANISMO DE DESARROLLO LIMPIO (MDL): PERSPECTIVA INTERNACIONAL E IMPLICACIONES PARA LA REGION DE AMERICA LATINA Y EL CARIBE. PROYECTO: CAMBIO CLIMATICO. Agosto de 2004.

Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 1995.

International Water and Sanitation Centre

<<http://www2.irc.nl/source/lges/item.php/5783>>

IPCC, "Solid Waste Management and Wastewater Treatment" in Methodological and Technological issues in Technology Transfer ed. Carlos Pereyra. 1999

La Incineración de Residuos: ¿Es una alternativa? - Estructplan Online. Salud, Seguridad y Medio Ambiente en la industria. <<http://www.estrucplan.com.ar/Articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=287#?>>. Fecha de consulta: 26 de marzo de 2004.

LIPASAM

<[http://www.lipasam.es/profesionales/servicios/tratamiento\\_de\\_rsu.asp](http://www.lipasam.es/profesionales/servicios/tratamiento_de_rsu.asp)>

MAKARENKO, Jay, (March 21st, 2002). The Kyoto Protocol & Global Warming  
Manuales sobre energía renovable: Biomasa/ Biomasa Users Network (BUN-CA). -1 ed. -San José, C.R.: Biomass Users Network (BUN-CA), 2002. 42 p. il. ; 28x22 cm.

McBean, E.A., F.A. Rovers, and G.J. Farquhar. Solid Waste Landfill Engineering and Design, New Jersey: Prentice Hall, 1995.

Ministerio de Desarrollo Económico. Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico. REGLAMENTO TECNICO DEL SECTOR DEL AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BASICO RAS 2000. Bogota D.C. Noviembre de 2000.

Ministerio de Salud. ASEAS-OPS/OMS, Diagnostico del servicio de Aseo Publico en Colombia. 1992.

Ministerio de Salud. Programa Nacional de Aseo Urbano (PRONASU). Julio 1976.

Ministerio del Medio Ambiente. (Colombia).

<<http://www.minambiente.gov.co/>>.

Ministerio del Medio Ambiente. (España).

<[http://www.mma.es/info\\_amb/estado\\_ma/coyunt/sintesis03/pdf/pto6\\_2\\_sintesis03.pdf](http://www.mma.es/info_amb/estado_ma/coyunt/sintesis03/pdf/pto6_2_sintesis03.pdf)>

MOSHER, F.A., and J.R. Yardley. "Landfill Gas Collection System Efficiencies: Facts and Fallacies" 19th Annual Landfill Gas Symposium Proceedings, Research Triangle Park, 19-21 March 1996. Ed. SWANA. Triangle Research Park. 1996. 133-45.

MUÑOZ TORRES, José Selimo. COMPOSTAJE EN PESCADOR, CAUCA: TECNOLOGIA APROPIADA PARA EL MANEJO DE RESIDUOS ORGANICOS Y SU CONTRIBUCION A LA SOLUCION DE PROBLEMAS MEDIOAMBIENTALES. Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, Facultad de Ingeniería y Administración. 2005.

Organisation for Economic Co-operation and Development. OECD.  
<<http://www.oecd.org/EN/home/0,EN-home-0-nodirectorate-no-no-no-0,FF.html>>

ORGANIZACION DE ESTADOS IBEROAMERICANOS O.E.I.  
<<http://www.oei.org.co/sii/index.htm>>. Fecha de consulta: 8 de mayo de 2005.

Organización Panamericana de la Salud - Organización Mundial de la Salud, 1996. Análisis Sectorial De Residuos Sólidos en Colombia. Series Análisis Sectoriales, No 8.

OTTERPOHL, Ralf. GROTTKER, Matthias y LANGE, Jörg. Especial sobre Residuos: Gestión sostenible del agua y de los residuos en zonas urbanas. <<http://habitat.aq.upm.es/boletin/n2/aaguas.html>>. Fecha de consulta: 29 de Enero de 2006.

PEDRAZA Gloria, BECERRA Maricel, CONDE Natalia, CHARÁ J. Descontaminación productiva de aguas utilizadas en labores domésticas y en sistemas de producción en zonas de montaña. En: Sistemas Pecuarios Sostenibles para las Montañas Tropicales. CIPAV – CENDI. Cali, Colombia. 1995.

PINTO SIABATO, Flavio. Energías Renovables y Desarrollo Sostenible en Zonas Rurales de Colombia: El caso de la vereda Carrizal en Sutamarchán. Cuadernos de Desarrollo Rural. Colombia, 1994.

PRODUCCION MAS LIMPIA. Un Paquete de Recursos de Capacitación. Don Huisingh. ONUDI-PNUMA, LU 3, 1994

Programa de Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos y Obtención de Energía en Hangzhou (China). <<http://habitat.aq.upm.es/dubai/00/bp221.html>>. Fecha de consulta: 28 de marzo de 2004.

Red Juan Colombia. CENSAT Agua Viva.  
<[http://www.censat.org/Red\\_Juan\\_Novedades.htm#L4](http://www.censat.org/Red_Juan_Novedades.htm#L4)>. Fecha de consulta: 4 de febrero de 2006.

REINMAN, Dieter O. Director del departamento de gestión de residuos del estado de Bamberg. Tecnología de Eliminación de Dioxinas. SOGAMA.

Residuos Sólidos.  
<<http://www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/residuos.html>>. Fecha de consulta: 28 de Marzo de 2004.

REUNION REGIONAL SOBRE BIOMASA PARA LA PRODUCCION DE ENERGIA Y ALIMENTOS. FAO Document Repository. <<http://www.fao.org/docrep/006/ad098s/ad098s00.HTM>>. Fecha de consulta: 1 de Febrero de 2006.

Superintendencia de Servicios Públicos, 1997: Las empresas de Acueducto, Alcantarillado y Aseo Según sus Principales Cifras Técnicas. En revista Supercifras en Mts<sup>3</sup> No 1, Pág. 14-22

Superintendencia de Servicios Públicos. Supercifras Acueducto, Alcantarillado y Aseo 1998-2001. Revista #6, Año 2002

TAMAYO Y TAMAYO, Mario. El Proceso de la Investigación Científica. ED Limusa Noriega Ediciones. 97.

TECNOCIENCIA: ESPECIAL RESIDUOS.

<<http://www.tecnociencia.es/especiales/residuos/imain.html>>. Fecha de consulta: 20 de Julio de 2005.

Transforma. Regulación eléctrica: avances y tendencias. Año 2 numero 4 mayo de 2003. COMISION REGULADORA DE ENERGIA. CRE. Unidad de reestructuración eléctrica. <<http://www.cre.gov.mx>>. Fecha de consulta: Mayo de 2003.

UNDP/World Bank Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP). MANUAL PARA LA PREPARACION DE PROYECTOS DE GENERACION DE ENERGIA A PARTIR DEL GAS DE RELLENOS SANITARIOS EN AMERICA Y EL CARIBE. Abril 2004. 218p

UPME. Plan de Expansión de Referencia: Generación y Transmisión. 2002-2011. Bogota. 2002

U.S. Environmental Protection Agency. Solid Waste Management and Greenhouse Gases. A Life-Cycle Assessment of Emissions and Sink 2002,

U.S. EPA, March 94, "Recommended Changes to the Proposed Municipal Solid Waste Landfill New Source Performance Standards and Emission Guidelines", presented at SWANA Landfill Gas Symposium

VAL, Alfonso. Tratamiento de los residuos sólidos urbanos (Cataluña, España). <<http://habitat.aq.upm.es/cs/p3/a014.html>>. Fecha de consulta: 28 de marzo de 2004.

Werner U, Stöhr U, Hees N. Biogas plants in animal husbandry. GATE – GTZ. Lengericher Handelsdruckerei, Lengerich, Alemania 1989

World Bank (1995): "National Environmental Strategies: Learning from Experience".

Zison, S.W., "Landfill Gas Production Curves, Myth vs. Reality" GRCDA '90

## GLOSARIO

**Almacenamiento:** Acumulación o depósito temporal, en recipientes o lugares, de la basura y residuos sólidos de un generador o una comunidad, para su posterior recolección, aprovechamiento, transformación, comercialización o disposición final.

**Almacenamiento domiciliario:** Acción del generador de depositar temporalmente los residuos retenidos en los condominios, edificios multifamiliares, viviendas, etc.

**Almacenamiento no domiciliario:** Acción del generador de depositar temporalmente los residuos retenidos en centros comerciales, edificios públicos, edificios privados, bancos, instituciones de interés social, centros de recreación, etc.

**Aprovechamiento:** Proceso mediante el cual, a través de un manejo integral de los residuos sólidos, los materiales recuperados se reincorporan al ciclo económico y productivo en forma eficiente, por medio de la reutilización, el reciclaje, la incineración con fines de generación de energía, el compostaje o cualquier otra modalidad que conlleve beneficios sanitarios, ambientales o económicos.

**Basura:** Todo material o sustancia sólida o semisólida de origen orgánico e inorgánico, putrescible o no, proveniente de actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales, de servicios e instituciones de salud, que no ofrece ninguna posibilidad de aprovechamiento, reutilización o recirculación a través de un proceso productivo. Son residuos sólidos que no tienen ningún valor comercial, no se reincorporan al ciclo económico y productivo, requieren de tratamiento y disposición final y por lo tanto generan costos de disposición.

**Biodegradabilidad:** Capacidad de descomposición rápida bajo condiciones naturales.

**Botadero:** Sitio de acumulación de residuos sólidos que no cumple con las disposiciones vigentes o crea riesgos para la salud y seguridad humana o para el ambiente en general.

**Caracterización de los residuos:** Determinación de las características cualitativas y cuantitativas de un residuo sólido, identificando contenidos y propiedades de interés con una finalidad específica.

**Carcismo:** Fenómeno presentado en material calcáreo, que bajo la presencia de agua, se disuelve formando cárcavas.

**Carga contaminante:** Cantidad de un determinado agente adverso al medio, contenido en un residuo sólido.

**Celda diaria:** Área definida donde se esparcen y compactan los residuos durante el día para cubrirlos al final del mismo.

**Centro de acopio:** Lugar donde los residuos sólidos son almacenados y/o separados y clasificados según su potencial de reuso o transformación.

**Centros de gran generación:** Lugares en los cuales se genera diariamente una gran cantidad de residuos sólidos, que por sus características, deben almacenarse en forma segura, higiénica y sanitaria.

**Coefficiente de escorrentía:** Relación entre la tasa pico de escorrentía directa y la intensidad de precipitación en una tormenta.

**Combustible:** Materiales que pueden ser incinerados a una temperatura específica, en presencia de aire para liberar energía calorífica.

**Combustión completa:** Combustión en la cual el combustible es totalmente oxidado.

**Combustión con exceso de aire:** Combustión con oxígeno en exceso sobre las necesidades estequiométricas del mismo.

**Combustión estequiométrica:** Combustión con la cantidad de oxígeno exactamente necesaria para que se produzca la combustión total de los residuos sólidos.

**Combustión incompleta:** Combustión en la cual el combustible no es totalmente oxidado.

**Compactación:** Proceso de por unidad normalmente utilizado para incrementar el peso específico (densidad en unidades métricas) de materiales residuales para que puedan ser almacenados y transportados más eficazmente.

**Conducto de venteo:** Estructura de ventilación que permite la salida de los gases producidos por la biodegradación de los residuos municipales.

**Cubierta diaria:** Capa de material natural o sintético con que se cubren los residuos depositados en un relleno sanitario durante un día de operación.

**Cubierta final:** Revestimiento de material natural o sintético que confina el total de las capas de que consta un relleno sanitario.

**Densidad:** Masa o cantidad de materia de los residuos, contenida en una unidad de volumen, en condiciones específicas.

**Desperdicio:** Residuo sólido o semisólido de origen animal o vegetal, sujeto a putrefacción, proveniente de la manipulación, preparación y consumo de alimentos para uso animal y humano.

**Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>):** Polucionante gaseoso, inodoro, ácido, formado principalmente de la combustión de combustibles fósiles.

**Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>):** Gas incoloro, inodoro y no tóxico que produce ácido carbónico cuando está disuelto en agua. Se produce durante la degradación térmica y descomposición (microbial) por microbios de los residuos sólidos.

**Dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>):** Resultado de la combinación del óxido nítrico con oxígeno en la atmósfera. Es el mayor componente del smog fotoquímico.

**Dioxinas:** Miembros de la familia de los compuestos orgánicos conocidos como policlorodibenzodioxinas (PCDD). Una molécula de la familia PCDD está formada por una estructura de triple anillo en la que dos anillos del benceno están interconectados por un par de átomos de oxígeno.

**Disposición final de residuos:** Proceso de aislar y confinar los residuos sólidos en forma definitiva, en forma definitiva, efectuado por las personas prestadoras de servicios, disponiéndolos en lugares especialmente diseñados para recibirlos y eliminarlos, obviando su contaminación y favoreciendo la transformación biológica de los materiales fermentables, de modo que no representen daños o riesgos a la salud humana y al medio ambiente.

**Entidad prestadora del servicio público domiciliario de aseo:** Persona natural o jurídica, pública, privada o mixta, encargada de todas, una o varias actividades de la prestación del servicio público domiciliario de aseo

**Furanos:** Miembros de la familia de los compuestos orgánicos conocidos como policlorodibenzofurano (PCDF). Una molécula de la familia PCDF está formada por una estructura de triple anillo en la que dos anillos del benceno están interconectados por un átomo de oxígeno.

**Gases ácidos:** Productos de la incineración de residuos que contengan Flúor y Cloro. Se generan ácido fluorhídrico (HF) y ácido clorhídrico (HCl).

**Generador:** Personas naturales o jurídicas, habitantes permanentes u ocasionales, nacionales o extranjeros que perteneciendo a los sectores residencial o no residencial y siendo usuario o no del servicio público domiciliario de aseo, generan o producen basuras o residuos sólidos, como consecuencia de actividades domiciliarias, comerciales, industriales, institucionales, de servicios y en instituciones de salud, a nivel urbano y rural, dentro del territorio nacional.

**Geomembrana:** Material sintético impermeable.

**Gestión integral de residuos:** Conjunto de operaciones y disposiciones encaminadas a dar a las basuras y residuos producidos, el destino global más adecuado desde el punto de vista ambiental, de acuerdo con sus características, volumen, procedencia, costos de tratamiento, posibilidades de recuperación, aprovechamiento, comercialización y disposición final.

**Grandes generadores:** Usuarios no residenciales que generan y presentan para la recolección residuos que de volumen superan a un metro cúbico.

**Incineración con recuperación de energía:** Proceso industrial controlado mediante el cual los residuos sólidos con un alto poder calorífico se utilizan como combustible para generar energía.

**Incinerador:** Homo para quemar o incinerar residuos bajo condiciones controladas.

**Material de cubierta:** Material de origen natural o sintético, utilizado para cubrir los residuos sólidos depositados en un relleno sanitario.

**Módulo:** Superficie que constituye por sí misma una unidad de la obra. Una vez rellena esta superficie puede utilizarse como área de esparcimiento, mientras se completa el periodo de estabilización y se realiza el control del correspondiente proceso biológico.

**Monitoreo:** Actividad consistente en efectuar observaciones, mediciones y evaluaciones continuas en un sitio y periodo determinados, con el objeto de identificar los impactos y riesgos potenciales hacia el ambiente y la salud pública o para evaluar la efectividad de un sistema de control.

**Monóxido de carbono (CO):** Gas venenoso, inodoro, incoloro, producto de la combustión incompleta de un combustible fósil.

**Nivel freático:** Profundidad de la superficie de un acuífero libre con respecto a la superficie del terreno.

**Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>):** Productos de la combustión de fuentes fijas y móviles. Es uno de los mayores contribuyentes de la formación de ozono en la troposfera y de la precipitación de ácidos.

**Permeabilidad:** Propiedad que tiene los cuerpos de permitir el paso de un fluido a través de él.

**Procesamiento térmico de residuos sólidos:** Conversión de los residuos en productos de conversión gaseosos, líquidos y sólidos, con la subsiguiente o simultánea emisión de energía en forma de calor.

**Producción limpia:** Reorientación de los sectores productivos, dentro de una dimensión ambiental hacia formas de gestión y uso de tecnologías ambientalmente sanas, aumentando la eficiencia en el uso de recursos energéticos e hídricos, sustitución de insumos, optimización de procesos, modificación de productos y minimización de basuras y residuos sólidos.

**Producción per cápita:** Cantidad de residuos generada por una población, expresada en términos de kg/hab-día o unidades equivalentes.

**Relación carbono-nitrógeno:** Parámetro utilizado como control de calidad de los residuos sólidos dentro de un sistema, utilizando como base la materia orgánica.

**Relleno de seguridad:** Relleno con características especiales para el confinamiento y aislamiento temporal de residuos sólidos peligrosos, hasta tanto se desarrollen tecnologías que permitan su disposición final.

**Separación en la fuente:** Clasificación de las basuras y residuos sólidos en el sitio donde se generan. Su objetivo es separar los residuos que tienen un valor de uso indirecto, por su potencial de reuso, de aquellos que no lo tienen, mejorando así sus posibilidades de recuperación.

**Tratamiento biológico:** Tratamiento tecnológico que utiliza bacterias u otros organismos para consumir residuos orgánicos.

**Zona de falla:** Zona donde se producen desplazamientos relativos de una parte de la roca con respecto a la otra, como resultados de los esfuerzos que se generan en la corteza terrestre

## **ANEXOS**

## Anexo A: Modelos Matemáticos Para Estimación Del Potencial De Emisión GHG

Los modelos matemáticos son herramientas útiles y económicas para la estimación del potencial de generación del GRS en el sitio. Los resultados del modelo pueden también ser usados para evaluar los riesgos potenciales asociados a la migración/emisión del GRS, y para evaluar la factibilidad de proyectos de administración del GRS.

Hay numerosos modelos disponibles para calcular la producción del GRS. Todos estos modelos pueden ser usados para elaborar una curva de generación que permita predecir su comportamiento y cambios a lo largo del tiempo. La totalidad del gas existente y la tasa a la cual es generado puede variar de alguna manera según los diferentes modelos que se usen, no obstante, el parámetro de entrada que es común a todos ellos es: la cantidad de residuo que es degradable. Los demás parámetros de entrada pueden variar dependiendo del modelo que se use, pero por lo general, estos están determinados por un número de variables incluyendo las que inciden directamente en la generación del GRS, incertidumbres en la información disponible sobre el sitio, y la forma en que la operación de la extracción del GRS afecta la generación en sí misma, en los casos en que se induce infiltración de aire o líquidos hacia los depósitos de los residuos sólidos.

Otro factor importante es el espacio de tiempo que se asume entre el momento de la disposición del residuo y el comienzo de la descomposición anaeróbica o fase metagénica dentro de la masa de residuo<sup>87</sup>. La heterogeneidad y naturaleza variable de todos los rellenos conlleva una dificultad que es inherente a la confiabilidad de los datos que se recolectan sobre el sitio, la cual esta ligada a la disponibilidad de un continuo desembolso de recursos para adelantar dicha actividad. Cualquier resultado del modelo será aceptable en la medida que lo sean los datos de entrada, aunque muchas veces estos parten de hipótesis generales en cuanto a la estimación inicial de las cantidades y tipos de residuo. Por lo tanto, es recomendable usar un modelo simple que utilice pocos parámetros y que puedan ser razonablemente asignados de acuerdo con las condiciones específicas del sitio. La predicción del resultado de cualquier modelo depende en mayor medida del grado de precisión que se requiera, de la confiabilidad de los datos de entrada, de la experiencia individual para analizar los datos, y del grado de similitud que exista entre el sitio objeto de estudio y otros sitios que ya hayan sido exitosamente modelados<sup>88</sup>.

Todos los modelos que se usan para determinar la tasa de producción estimada del GRS del sitio deben ser objeto de un completo análisis de sensibilidad con miras a determinar un rango aceptable de resultados y

---

<sup>87</sup> Augenstein, D. and J Pacey, "Landfill Methane Models" 14th Annual Landfill Gas Symposium Proceedings, Research Triangle Park, 1991. Ed. SWANA. Triangle Research Park. 1991. III-87 – III-111.

<sup>88</sup> Zison, S.W., "Landfill Gas Production Curves, Myth vs. Reality" GRCA '90

establecer cuáles parámetros ejercen mayor influencia en los cálculos de la producción del GRS. La identificación de parámetros sensibles puede requerir una recolección de datos confiable y adelantar posteriores refinamientos en las predicciones de la producción del gas. Dada la naturaleza heterogénea de las condiciones dentro del relleno y las típicas limitaciones respecto de los datos de entrada que normalmente se encuentran en un sitio candidato, es recomendable establecer un rango de valores aproximado y adelantar un análisis de sensibilidad que refleje las condiciones esperadas de generación del GRS. Usando los límites más altos y más bajos en la generación del GRS versus el perfil de tiempo basado en las condiciones probables dentro del relleno, es posible asignar valores y escoger datos de entrada que sean representativos como para considerarlos en una primera evaluación del potencial de un sitio, así como para establecer oportunamente qué factores de riesgo pueden surgir. Los modelos cinéticos de primer orden son frecuentemente usados para estimar la producción de metano a lo largo de la vida útil de un relleno. Estos modelos son adaptados a rellenos específicos mediante hipótesis que se basan en las condiciones particulares del sitio.

### Modelo Scholl-Canyon

El modelo de degradación empírica de primer orden más ampliamente aceptado y utilizado por la industria y agencias reguladoras, incluyendo la U.S. EPA<sup>89</sup>, es el Modelo Scholl-Canyon. Este modelo emplea una ecuación exponencial de decaimiento de primer orden, la cual asume que la generación de biogás llega a su máximo después de un intervalo que representa el periodo anterior a la generación de metano. Así mismo asume que el intervalo entre la disposición de los residuos y la generación de biogás es de un año. Después de este año el modelo asume que la generación de biogás disminuye exponencialmente al mismo tiempo que la fracción orgánica de los residuos es consumida. En resumen, el modelo se basa en la hipótesis de que el relleno tiene una fracción constante de material biodegradable por unidad de tiempo.

El modelo se basa en la siguiente ecuación de primer orden<sup>90</sup>:

$$Qch_{4i} = k * L_o * m_i * e^{-t} \quad (1)$$

Donde:  $Qch_{4i}$  = metano producido en el año  $i$  desde la sección  $i$ th del residuo ( $m^3/año$ )

$k$  = constante de generación de metano ( $l/año$ )

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

$m_i$  = masa de residuo dispuesto en el año  $i$  ( $Mg$ )

$t_i$  = años después del cierre (años)

<sup>89</sup> EPA: Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.

<sup>90</sup> La ecuación [1] es la base del Modelo de Emisiones de GRS de la U.S. EPA (LandGEM), disponible en su website (<http://epa.gov/ttn/atw/landfill/landflpq.html>).

Es una práctica típica asumir que el GRS generado está compuesto de cincuenta por ciento de metano y cincuenta por ciento de dióxido de carbono para que el total de GRS producido sea igual a dos veces la cantidad de metano calculado a partir de la ecuación [1].

El Modelo Scholl-Canyon predice el potencial de generación de metano ( $L_0$ ), los datos históricos de llenado del residuo y las proyecciones futuras del residuo que será dispuesto en el sitio. La EPA asigna valores de ajuste a cada parámetro y de esta forma obtener una evaluación preliminar conservativa del sitio. Sin embargo, estos parámetros deben ser seleccionados con conocimiento de las condiciones del sitio.

En ALC, las diferencias en el contenido orgánico del residuo, la presencia de humedad, y el nivel al cual el residuo es compactado hacen que el potencial para la generación de GRS sea mayor, en comparación con un sitio típico de Norte América y Europa. Se ha seleccionado el Modelo Scholl-Canyon no porque sea el único modelo disponible, o el mejor, sino porque es el más adecuado para el propósito buscado; es el más comúnmente utilizado y aceptado en Norte América y Sur América; y tiene la mejor base de datos disponible sobre los rellenos de ALC. El modelo es sencillo de entender y aplicar, y está generalmente aceptado por las agencias e instituciones financieras que están interesadas en apoyar estos tipos de proyectos.

La tasa constante de generación de metano ( $k$ ) representa la tasa de biodegradación de primer orden a la cual el metano es generado luego de la disposición del residuo en el sitio. Esta constante depende del contenido de humedad, la disponibilidad de nutrientes, el pH, y la temperatura. Como se mencionó anteriormente, el contenido de humedad dentro de un relleno es uno de los parámetros más importantes que inciden en la tasa de generación del gas. La humedad sirve además como medio para el transporte de nutrientes y bacterias. El contenido de humedad dentro de un relleno sanitario depende principalmente de la infiltración de aguas lluvias a través de la cobertura del relleno.

Otros factores que afectan el contenido de humedad en el residuo y la tasa de generación incluyen el contenido inicial de humedad del residuo; la cantidad y tipo de cobertura diaria que se usa en el sitio; la permeabilidad y tiempo de disposición de la cobertura final; el tipo de impermeabilización de la base; el sistema de recolección de lixiviados; y la profundidad del residuo. Los valores típicos de  $k$  oscilan entre 0.02 para sitios secos y 0.07 para sitios húmedos. El valor predeterminado utilizado por la U.S. EPA para sitios con precipitaciones de más de 25 pulgadas (625 mm) por año es 0.05 (U.S. EPA, 1994), este valor produce una estimación razonable de la generación de metano en ciertas regiones geográficas y bajo ciertas condiciones en el sitio. La siguiente tabla presenta los rangos sugeridos y la asignación de parámetros de la constante  $k$ .

**Tabla 42: Rango de Valores de k Sugeridos según la Precipitación Anual**

Precipitación Anual	Rango de Valores k (Según condición del residuo)		
	Relativamente Inerte	Moderadamente Degradable	Altamente Degradable
<250 mm	0.01	0.02	0.03
>250 a <500 mm	0.01	0.03	0.05
>500 a <1000 mm	0.02	0.05	0.08
>1000 mm	0.02	0.06	0.09

El potencial de generación de metano ( $L_0$ ) representa la reserva total de metano ( $m^3$  de metano por tonelada de residuo). El valor  $L_0$  depende de la composición del residuo, y en particular, de la fracción de materia orgánica presente. Este valor se ha estimado con base en el contenido de carbono del residuo, la fracción de carbono biodegradable, y el factor de conversión estequiométrico. Los valores típicos de este parámetro están el rango entre  $125 m^3$  y  $310 m^3$  de metano/tonelada de residuo. El aumento en la compactación del residuo no tiene efecto directo sobre el parámetro  $L_0$ . Sin embargo, la compactación y la densidad del residuo tienen una relación directa con la masa de residuo dentro de un volumen determinado, y por lo tanto con la cantidad potencial de GRS que puede ser producido a través del tiempo, así como con las características de desempeño de los sistemas que sea necesario instalar para su recolección.

Existe también la percepción de que en la medida en que los programas de reciclaje y compostaje se incrementan y mejoran, más materiales orgánicos tales como residuos de comida y papel, pueden ser desviados del relleno lo cual reduciría la cantidad del GRS dentro del relleno. Sin embargo, hasta la fecha las iniciativas de reciclaje han tenido más éxito pero en la remoción de materiales inorgánicos tanto en países desarrollados como en países en desarrollo. En consecuencia, a través de la práctica cotidiana no se ha encontrado que el valor aplicable de  $L_0$  haya disminuido significativamente<sup>91</sup>. El usuario del modelo puede aumentar o disminuir el valor  $L_0$  en función del conocimiento específico que se tenga del residuo, en términos de la proporción orgánica. La cantidad (en toneladas) de un residuo típico dispuesto en un relleno en un año determinado está representada por "m" en la ecuación del Modelo Scholl-Canyon.

En rellenos donde hay información suficiente y confiable que indique por ejemplo que hay una significativa porción de residuos inertes, tales como residuos de construcción y demolición, este parámetro puede ser reducido a un valor que refleje únicamente la cantidad de residuo que no es inerte. Sin embargo, en muchos casos no siempre hay suficiente información como para determinar qué porcentaje del residuo es inerte. Solamente se recomienda reducir el parámetro  $L_0$  o la cantidad de residuo de entrada si existe precisa y suficiente información que permita cuantificar y discriminar el flujo de residuos inertes o relativamente inertes.

<sup>91</sup> U.S. EPA, March 94, "Recommended Changes to the Proposed Municipal Solid Waste Landfill New Source Performance Standards and Emission Guidelines", presented at SWANA Landfill Gas Symposium

Como se señaló antes, el parámetro  $L_0$  ya ha sido reducido sustancialmente respecto del valor teórico, precisamente para reflejar un residuo orgánico puro, lo que quiere decir que el parámetro reconoce el hecho de que hay presencia de materiales inorgánicos y humedad que cubren cierta porción de la carga de residuos. Cuando se cuenta con suficiente y confiable información respecto de los tipos y cantidades de residuos, es posible refinar la modelación usando como guía para la asignación de parámetros del factor  $L_0$ , la información que se muestra a continuación. En este caso, el resultado de la evaluación completa de la generación de GRS sería de la suma de las curvas generadas para los varios tipos de residuo considerados.

**Tabla 43: Valores de  $L_0$  Sugeridos según el Contenido Orgánico del Residuo**

Categorización del Residuo	Valor Mínimo $L_0$	Valor Máximo $L_0$
Residuo Relativamente Inerte	5	25
Residuo Moderadamente Degradable	140	200
Residuo Altamente Degradable	225	300

**Cobertura del Sistema de Recuperación de Biogás:** La cobertura del sistema es la medida de la fracción de los residuos que se encuentra bajo recolección activa. El modelo estima tanto el potencial recuperable de biogás asumiendo que la cobertura del sistema es del 100 por ciento, como el total recuperable proyectado el cual se basa en estimados de cobertura del sistema. El factor de cobertura del sistema de biogás esta basado en criterio y considera varios factores entre estos están: si el relleno sanitario sigue activo o ya ha sido clausurado, el tipo de construcción del los pozos y el sistema, y el nivel de operación proveído, la rapidez de reparación de daños en el sistema, niveles de lixiviado en la masa de residuos, etc. Este valor cae en un rango del 0% (para rellenos sin sistema) al 100 % (para rellenos con sistema excelente).

Modificaciones en la cobertura del sistema puede variar si se espera que el sistema de recolección sea expandido periódicamente o si otros cambios al sistema son anticipados. (por ejemplo, clausura del relleno sanitario o recubrimiento parcial, flujos aumentativos debido a la presencia de material enterrado adicional). Rellenos sanitarios activos tienden a tener mas bajo factor de cobertura que los que han sido clausurados debido a las interferencias causadas por las operaciones.

**Composición del GRS:** La calidad del GRS depende del sistema microbiano, del substrato (residuo) que es degradado, y de variables específicas del sitio tales como acceso de oxígeno al residuo y contenido de humedad<sup>92</sup>.

<sup>92</sup> Ham, Robert K., and Morton A. Barlaz, "Measurement and Prediction of Landfill Gas Quality and Quantity" in *Sanitary Landfilling : Process, Technology and Environmental Impact* ed. Thomas H. Chistensen, Raffaello Cossu, and Rainer Stegmann (Academic Press, New York, 1989) p.155-158

El GRS está típicamente compuesto por aproximadamente 50 por ciento de metano y 50 por ciento de dióxido de carbono con menos de 1 por ciento de otras trazas de constituyentes del gas, incluyendo sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) y mercaptanos. Hay cuatro fases de producción de gases que ocurren a lo largo de la vida de un relleno sanitario. La duración de cada una de estas fases depende de varios factores incluyendo el tipo de residuo, el contenido de humedad, el contenido de nutrientes, el contenido bacterial, y el nivel de pH. La heterogeneidad del residuo, junto con el entorno de un relleno específico, tiene tanta influencia en el comportamiento mismo del residuo en el relleno y en la producción del gas, que la duración de cada fase no puede ser simplemente establecida como un rango general.

**Tabla 44: Vida Media de Subproductos de Biodegradación**

<b>Categoría del Residuo</b>	<b>Vida Media Mínima</b>	<b>Vida Media Máxima</b>
Rápidamente Degradable (comida y residuos de jardín, etc.)	½ año	1 ½ año
Moderadamente Degradable (papel, etc.)	5 años	25 años
Pobrementemente Degradable (algunas porciones de residuos de construcción y demolición, etc.)	10 años	50 años

La primera fase de descomposición aeróbica, ocurre inmediatamente después que el residuo es dispuesto, y ocurre con presencia de oxígeno dentro del residuo. La descomposición aeróbica produce dióxido de carbono, agua, y calor. La siguiente etapa es la anóxica, la fase no metanogénica, en la cual se forman compuestos ácidos y gas de hidrógeno con continua producción de dióxido de carbono. La tercera fase es la fase metanogénica no constante, durante la cual la producción de dióxido de carbono comienza a declinar debido a que la descomposición del residuo pasa a ser anaeróbica. La descomposición anaeróbica produce calor y agua, pero a diferencia de la descomposición aeróbica, ésta produce metano. Durante la cuarta fase se genera un volumen de metano entre el 40 y el 70 por ciento del volumen total<sup>93</sup>.

Típicamente, el residuo en la mayoría de los rellenos puede alcanzar la fase metanogénica estable dentro de un lapso de menos de 2 años después que el residuo es dispuesto. Dependiendo de la profundidad de las capas en que se dispone el residuo, y del contenido de humedad del mismo, la fase metanogénica podría alcanzarse incluso a los seis meses después de la disposición. El GRS puede producirse en un sitio hasta por un período de 100 años a partir de la fecha de disposición, con emisiones en continua declinación de sus niveles.

<sup>93</sup> McBean, E.A., F.A. Rovers, and G.J. Farquhar. Solid Waste Landfill Engineering and Design, New Jersey: Prentice Hall, 1995.

## Anexo B: Cálculo de Emisiones en Henequén.

### Alimentación del modelo

**Historia de Disposición de Residuos** – Para el cálculo de residuos in situ en el relleno sanitario de Henequén, el cual estuvo en funcionamiento desde el año 1969 hasta el año 2001, se proyectaron las cantidades dispuestas desde su inicio de operación hasta el año 2001, donde se dictamina su cierre técnico.

**Tabla 45. Historial de Disposición de RSU en el Relleno Sanitario de Henequén**

Años	Zona Urbana	Produccion Total RSU (kg/año)	Residuos In Situ	Produccion RSU (kg/día)	Comentario
	Poblacion				
1969	260.573	62.772.103,15	62.772.103,2	171.978,36	estimado
1970	275.651	66.404.253,63	129.176.356,8	181.929,46	estimado
1971	290.966	70.093.632,31	199.269.989,1	192.037,35	estimado
1972	306.518	73.840.239,20	273.110.228,3	202.302,03	estimado
1973	311.664	75.079.857,60	348.190.085,9	205.698,24	Datos Reales
1974	328.336	79.096.137,58	427.286.223,5	216.701,75	estimado
1975	344.601	83.014.429,08	510.300.652,6	227.436,79	estimado
1976	361.104	86.989.948,78	597.290.601,3	238.328,63	estimado
1977	377.844	91.022.696,69	688.313.298,0	249.377,25	estimado
1978	394.822	95.112.672,80	783.425.970,8	260.582,67	estimado
1979	412.038	99.259.877,11	882.685.847,9	271.944,87	estimado
1980	429.491	103.464.309,63	986.150.157,6	283.463,86	estimado
1981	447.181	107.725.970,35	1.093.876.127,9	295.139,64	estimado
1982	465.109	112.044.859,28	1.205.920.987,2	306.972,22	estimado
1983	483.275	116.420.976,41	1.322.341.963,6	318.961,58	estimado
1984	501.678	120.854.321,74	1.443.196.285,3	331.107,73	estimado
1985	522.318	125.826.406,20	1.569.022.691,5	344.729,88	Datos Reales
1986	539.198	129.892.697,02	1.698.915.388,6	355.870,40	estimado
1987	558.314	134.497.726,97	1.833.413.115,5	368.486,92	estimado
1988	577.667	139.159.985,12	1.972.573.100,7	381.260,23	estimado
1989	597.258	143.879.471,47	2.116.452.572,1	394.190,33	estimado
1990	617.087	148.656.186,03	2.265.108.758,2	407.277,22	estimado
1991	637.153	153.490.128,79	2.418.598.886,9	420.520,90	estimado
1992	657.457	158.381.299,76	2.576.980.186,7	433.921,37	estimado
1993	681.668	164.213.821,20	2.741.194.007,9	449.900,88	Datos Reales
1994	698.777	168.335.326,30	2.909.529.334,2	461.192,67	estimado
1995	713.570	171.899.013,00	3.081.428.347,2	470.956,20	Datos Reales
1996	741.047	178.518.265,66	3.259.946.612,9	489.091,14	estimado
1997	762.539	183.695.577,65	3.443.642.190,5	503.275,56	estimado
1998	782.205	188.433.184,50	3.632.075.375,0	516.255,30	Datos Reales
1999	805.757	194.106.861,30	3.826.182.236,3	531.799,62	Datos Reales
2000	829.476	199.820.768,40	4.026.003.004,72	547.454,16	Datos Reales
2001	853.556	205.621.640,40	4.231.624.645,12	563.346,96	Datos Reales
2002		0,00	4.231.624.645,12		
2003		0,00	4.231.624.645,12		

Fuente: los autores.

Notas: 1. los datos de los años 1973, 1985, 1993, 1995, 1998-99-2000-2001, son extraídos de censos de población, y evaluados con la tasa producción de residuos per. Capita (0.66 kg/hab).

2. Los demás datos son calculados con base en una regresión polinomial de segundo orden en base a las tasas de crecimiento de la población. Así mismo DANE registra un descenso en las tasas de crecimiento que aunque leve se confirma en los censos poblacionales.

**Contenido de Metano** – se ha estimado el contenido de metano futuro como 50 por ciento.

**Constante de Generación de Metano [k]** – Estudios de laboratorio han sugerido que residuos orgánicos de alta degradación tales como la comida se degradan 5 veces mas rápido que residuos de degradación media tales como papel, y 20 veces mas rápido que los de degradación baja tales como textiles. Para la evaluación del relleno sanitario Henequén, se empleo tres diferentes valores de k basado en la degradabilidad de los diferentes componentes de los residuos.

Según la tabla 41, para una precipitación anual promedio de 926 mm (tabla 46) y RSU altamente degradables (tabla 45), tenemos:

$$k_s: 0.08, k: 0.07, k_i: 0.06$$

**Tabla 46: Datos de Composición de Residuos.**

Material	%
<b>Organicos</b>	66.54%
Alimentos	57.14%
Podas	9.41%
<b>Potencialmente Recic</b>	25.03%
Vidrio	1.94%
Metal	2.00%
Papel y Carton	6.28%
Plasticos	14.81%
<b>Aprovechables</b>	4.84%
Madera	1.42%
Caucho y Cuero	1.23%
Textiles	2.19%
<b>No Aprovechables</b>	3.59%
Sanitarios	3.35%
Especiales	0.24%

Fuente: los autores.

**Tabla 47: Datos Geotécnicos Cartagena de Indias<sup>94</sup>.**

<b>Régimen de lluvias</b>	
Total anual máximo	976.4 mm.
Precipitación anual promedio	926.28 mm
Promedio mensual	85 mm
Meses de más lluvias	Mayo a Octubre.
Meses de menos lluvias	Noviembre a Abril.
<b>Niveles de temperatura</b>	
Máxima media	31.9° C (Agosto).
Mínima media	22.5° C (Enero).
Media mensual	27.2° C.
<b>Régimen de vientos</b>	

<sup>94</sup> Decreto No. 0977 por medio del cual se adopta el Plan de Ordenamiento Territorial del Distrito Turístico y Cultural de Cartagena de Indias

Norte, fuerza máxima registrada	28.5 m/seg. (Diciembre/56).
Presión atmosférica media / mes	755.1 cm.
Brillo solar (horas - minutos)	296.55 (hs-min).
<b>Humedad Relativa</b>	
Humedad relativa máxima	87%
Humedad relativa promedio	80.3%
<b>Niveles de Evaporación</b>	
Evaporación Promedio	27.6 mm
Evaporación máxima	29.1 mm
Evaporación mínima	0.2 mm

Fuente: Plan de Ordenamiento Territorial del Distrito Turístico y Cultural de Cartagena de Indias. 2002, p

**Potencial de Recuperación de Metano [Lo]** – Para el relleno sanitario Henequén, se usó un valor basado en la precipitación anual promedio (tabla 46) y se ajustó de acuerdo con las proporciones de contenido orgánico (tabla 45) y humedad en rellenos sanitarios de Estados Unidos y los del este relleno sanitario. Para el relleno sanitario de henequén, y según la tabla 42, se han establecido los siguientes valores de Lo:

**Lo<sub>s</sub>: 270, Lo: 250, Lo<sub>i</sub>: 230.**

Para la evaluación del factor de cobertura del sistema, se ha determinado un porcentaje de recuperación de aproximadamente 99%, dado que el relleno sanitario de henequén se encuentra inactivo para la recepción de residuos sólidos se puede lograr una cobertura del 100%. Es importante notar que además de la variabilidad de la cobertura del sistema y el nivel de operación y mantenimiento, también existe la incertidumbre intrínseca que presenta el modelo matemático.

#### **Recuperación Potencial de Biogás.**

Con el uso del modelo, Se estima que la recuperación potencial de biogás para el relleno sanitario en el 2007 es de 4.066 m<sup>3</sup>/hr, y declinara a 1.423 m<sup>3</sup>/hr en el 2022 y a 534 m<sup>3</sup>/hr en el 2036.

#### **Recuperación Anticipada de Biogás**

Se estima que la recuperación de biogás en el Relleno Sanitario de Henequén comenzará en el 2006.

Tabla 48: Producción de Biogás con un potencial de generación normal de metano

Year	Year Nñmer	Annual Compost (tonnes)	Annual Compost (tonnes)	Theoretical Annual Gas Production (m <sup>3</sup> /year)	Actual Annual Gas Production (m <sup>3</sup> /year)	Theoretical Annual Gas Production (dm)	Actual Annual Gas Production (dm)	Theoretical Annual Gas Production (m <sup>3</sup> /hour)	Actual Annual Gas Production (m <sup>3</sup> /hour)	Theoretical Annual Gas Production (tonnes/year)	Actual Annual Gas Production (M/day)	Theoretical Annual Gas Production (tonnes/year)
1989	1	6272	6272	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1990	2	6644	6644	219114	153916	148	103	16	16	791	7891	1669
1991	3	7016	7016	432640	300888	294	216	39	39	1574	15716	33157
1992	4	7388	7388	651310	457210	439	317	52	52	2311	23111	4939
1993	5	7580	7580	863210	607254	583	428	68	68	3122	31228	6550
1994	6	7956	7956	1114652	731126	740	534	86	86	3857	38570	8115
1995	7	8304	8304	1226640	850088	857	610	100	100	4353	43535	9645
1996	8	8690	8690	14801381	10361107	994	686	118	118	5329	53299	11390
1997	9	9103	9103	1685552	1191886	1132	792	136	136	6064	60622	12732
1998	10	9515	9515	1882482	1324737	1289	888	150	150	6801	64810	142827
1999	11	9920	9920	2194180	1466196	1417	985	164	164	7531	74529	16338
2000	12	10344	10344	2502318	1610163	156	1082	188	188	8281	82178	17388
2001	13	10776	10776	2805472	1754930	1684	1179	205	205	9125	89533	18518
2002	14	11206	11206	2714406	1900667	1824	126	219	219	9772	95946	20219
2003	15	11641	11641	2921566	2046389	1984	135	236	236	10428	10428	21883
2004	16	12084	12084	3132916	2191888	2106	143	253	253	11284	112840	23888
2005	17	12536	12536	3348184	2346689	2247	153	262	262	12139	12139	25814
2006	18	12998	12998	3568488	2498862	2391	163	285	285	12890	127122	27916
2007	19	13468	13468	3794632	264922	2534	174	305	305	13431	13474	29158
2008	20	13940	13940	3926676	2791195	2679	185	329	329	14073	14073	30310
2009	21	14389	14389	4065884	2934189	2825	198	351	351	14714	14714	31543
2010	22	14866	14866	4426324	3093967	2973	208	376	376	15359	15359	32859
2011	23	15340	15340	4640114	3232017	3121	218	375	375	1626	1626	34128
2012	24	15811	15811	4868188	3388832	3271	229	388	388	17353	17353	36118
2013	25	16284	16284	5094218	3568866	3422	236	401	401	18539	18539	38127
2014	26	16835	16835	5326132	3722316	3577	244	425	425	19769	19769	41254
2015	27	17399	17399	5565114	3896684	3731	262	448	448	20994	20994	43888
2016	28	17858	17858	5799864	4084916	3885	278	469	469	22184	22184	46567
2017	29	18366	18366	6114132	4208540	4040	288	486	486	2361	2361	49661
2018	30	18835	18835	6231856	4352689	4199	299	498	498	24304	24304	47259
2019	31	19410	19410	6483336	4511361	4385	308	518	518	2534	2534	49443
2020	32	19821	19821	6728120	4684866	4500	3164	536	536	2621	2621	5066
2021	33	20622	20622	6926336	4884463	4684	329	552	552	2710	2710	52131
2022	34	0	0	724192	509494	4891	336	570	570	2797	2797	53911
2023	35	0	0	673248	471216	4523	316	530	530	24330	24330	50996
2024	36	0	0	627060	439292	4217	292	506	506	22275	22275	47384
2025	37	0	0	583164	409218	3922	275	467	467	2101	2101	44299
2026	38	0	0	542336	381216	3666	256	431	431	1964	1964	41283
2027	39	0	0	503856	356469	3485	238	406	406	1839	1839	38690
2028	40	0	0	468840	332134	3187	221	379	379	1700	16607	36683
2029	41	0	0	442780	309602	2972	208	355	355	1525	1525	33434
2030	42	0	0	412654	289281	2771	190	326	326	1409	1409	31284
2031	43	0	0	388814	2701617	2584	180	303	303	1309	1309	2843
2032	44	0	0	368814	2510617	2419	168	286	286	1219	1219	27187
2033	45	0	0	344312	2343661	2266	152	262	262	1106	1106	25760
2034	46	0	0	317348	218248	2084	146	241	241	1122	1122	2561
2035	47	0	0	291520	203616	1955	137	225	225	1044	1044	21939
2036	48	0	0	271012	189068	1821	124	216	216	976	976	20883
2037	49	0	0	252874	1768107	1688	118	209	209	909	909	19132
2038	50	0	0	236010	1642280	1585	110	188	188	842	842	18117
2039	51	0	0	220578	153728	146	103	175	175	780	780	16605
2040	52	0	0	208240	143701	136	95	167	167	734	734	15897
2041	53	0	0	198688	134832	128	88	156	156	685	685	14439
2042	54	0	0	178568	124458	116	87	142	142	640	640	13468
2043	55	0	0	166123	116293	115	81	132	132	597	597	12517
2044	56	0	0	154128	108640	100	78	127	127	553	553	11731
2045	57	0	0	144374	1018607	90	69	115	115	516	516	10919
2046	58	0	0	134594	941540	84	63	105	105	485	485	10142
2047	59	0	0	125817	88364	83	59	100	100	452	452	9463
2048	60	0	0	116949	818824	76	50	95	95	421	41784	8840
2049	61	0	0	109873	766141	73	51	82	82	392	392	8240
2050	62	0	0	101123	71891	68	48	83	83	353	353	7625
2051	63	0	0	92863	66853	63	46	78	78	344	344	7166
2052	64	0	0	88240	618976	54	46	70	70	318	318	6689
2053	65	0	0	82463	57121	54	38	69	69	288	288	6231
2054	66	0	0	78782	521097	51	36	64	64	276	276	5816
2055	67	0	0	74654	50112	48	37	53	53	280	280	5418
2056	68	0	0	68913	468112	44	34	54	54	246	246	5124
2057	69	0	0	62310	43683	49	28	48	48	225	225	4718
2058	70	0	0	58923	40696	30	23	44	44	202	202	4323
2059	71	0	0	54137	37996	34	25	43	43	190	190	4134
2060	72	0	0	50145	35663	39	28	44	44	188	188	3885
2061	73	0	0	46942	32612	36	22	36	36	165	165	3613
2062	74	0	0	43946	30372	25	16	31	31	151	151	3316
2063	75	0	0	40848	28628	25	13	32	32	144	144	3127
2064	76	0	0	38132	26214	25	10	31	31	134	134	2889
Total Rank		423625 21622	423625 21622	21380198 7219192	149667371 5156494	14967 4851	10056 336	17081 570	79710 2595	768487 259736	1616910 56591	

**Tabla 49: Producción de Biogás con un potencial de generación bajo de metano**

Year	Year	Annual Tonnage (tonnes)	Annual Decomposable Tonnage (tonnes)	Theoretical Annual Gas Production (m <sup>3</sup> /year)	Factored Annual Gas Production (m <sup>3</sup> /year)	Theoretical Annual Gas Production (cfm)	Factored Annual Gas Production (cfm)	Factored Annual Gas Production (m <sup>3</sup> /hour)	Factored Annual CH <sub>4</sub> Production (tonnes/year)	Factored Annual Energy Value (MJ/day)	Factored Annual CH <sub>4</sub> as eCO <sub>2</sub> (tonnes/year)
1969	1	62,772	62,772	0	0	0	0	0	0	0	0
1970	2	66,404	66,404	1,732,510	1,212,757	116	81	138	624	61,895	13,098
1971	3	70,094	70,094	3,464,374	2,425,062	233	163	277	1,247	123,768	26,191
1972	4	73,840	73,840	5,197,209	3,638,046	349	244	415	1,871	185,675	39,291
1973	5	75,080	75,080	6,932,538	4,852,776	466	326	554	2,496	247,671	52,410
1974	6	79,096	79,096	8,601,021	6,020,715	578	404	687	3,096	307,279	65,024
1975	7	83,014	83,014	10,283,190	7,198,233	691	484	822	3,702	367,376	77,741
1976	8	86,990	86,990	11,975,542	8,382,879	805	563	957	4,311	427,837	90,535
1977	9	91,023	91,023	13,679,064	9,575,345	919	643	1,093	4,924	488,696	103,414
1978	10	95,113	95,113	15,394,684	10,776,279	1,034	724	1,230	5,542	549,988	116,384
1979	11	99,260	99,260	17,125,276	11,986,293	1,150	805	1,368	6,164	611,744	129,452
1980	12	103,464	103,464	18,865,668	13,205,968	1,267	887	1,508	6,792	673,992	142,624
1981	13	107,726	107,726	20,622,632	14,435,842	1,385	970	1,648	7,424	736,761	155,907
1982	14	112,045	112,045	22,394,900	15,676,430	1,504	1,053	1,790	8,062	800,077	169,305
1983	15	116,421	116,421	24,185,158	16,928,211	1,625	1,137	1,932	8,706	863,964	182,825
1984	16	120,854	120,854	25,988,060	18,191,642	1,746	1,222	2,077	9,356	928,446	196,470
1985	17	125,826	125,826	27,810,214	19,467,150	1,868	1,308	2,222	10,012	993,544	210,245
1986	18	129,893	129,893	29,663,480	20,764,436	1,993	1,395	2,370	10,679	1,059,753	224,256
1987	19	134,498	134,498	31,521,052	22,064,736	2,118	1,482	2,519	11,348	1,126,117	238,299
1988	20	139,160	139,160	33,397,548	23,378,284	2,244	1,571	2,669	12,023	1,193,156	252,485
1989	21	143,879	143,879	35,293,440	24,705,408	2,371	1,660	2,820	12,706	1,260,889	266,818
1990	22	148,656	148,656	37,209,184	26,046,429	2,500	1,750	2,973	13,395	1,329,330	281,301
1991	23	153,490	153,490	39,145,200	27,401,640	2,630	1,841	3,128	14,092	1,398,496	295,938
1992	24	158,381	158,381	41,101,888	28,771,322	2,761	1,933	3,284	14,797	1,468,400	310,730
1993	25	164,214	164,214	43,079,628	30,155,740	2,894	2,026	3,442	15,509	1,539,057	325,682
1994	26	168,335	168,335	45,103,160	31,572,212	3,030	2,121	3,604	16,237	1,611,349	340,980
1995	27	171,899	171,899	47,122,616	32,985,831	3,166	2,216	3,766	16,964	1,683,496	356,247
1996	28	178,518	178,518	49,122,828	34,385,980	3,300	2,310	3,925	17,684	1,754,956	371,369
1997	29	183,696	183,696	51,189,252	35,832,442	3,439	2,407	4,090	18,428	1,828,780	386,991
1998	30	188,433	188,433	53,278,208	37,294,746	3,579	2,505	4,257	19,180	1,903,310	402,783
1999	31	194,107	194,107	55,376,280	38,773,396	3,720	2,604	4,425	19,935	1,978,365	418,645
2000	32	199,821	199,821	57,508,768	40,256,138	3,863	2,704	4,595	20,703	2,054,550	434,766
2001	33	205,622	205,622	59,674,764	41,772,335	4,009	2,806	4,769	21,483	2,131,933	451,141
2002	34	0	0	61,874,732	43,312,312	4,157	2,910	4,944	22,275	2,210,528	467,773
2003	35	0	0	58,271,432	40,790,002	3,915	2,740	4,656	20,978	2,081,797	440,532
2004	36	0	0	54,877,968	38,414,578	3,687	2,581	4,385	19,756	1,960,563	414,877
2005	37	0	0	51,682,120	36,177,484	3,472	2,430	4,130	18,606	1,846,388	390,717
2006	38	0	0	48,672,392	34,070,674	3,270	2,289	3,889	17,522	1,738,863	367,963
2007	39	0	0	45,837,932	32,086,552	3,079	2,156	3,663	16,502	1,637,600	346,535
2008	40	0	0	43,168,544	30,217,981	2,900	2,030	3,450	15,541	1,542,234	326,534
2009	41	0	0	40,654,600	28,458,220	2,731	1,912	3,249	14,636	1,452,421	307,349
2010	42	0	0	38,287,056	26,800,939	2,572	1,800	3,059	13,783	1,367,838	289,450
2011	43	0	0	36,057,392	25,240,174	2,422	1,696	2,881	12,981	1,288,182	272,594
2012	44	0	0	33,957,576	23,770,303	2,281	1,597	2,714	12,225	1,213,164	256,719
2013	45	0	0	31,980,040	22,386,028	2,148	1,504	2,555	11,513	1,142,515	241,769
2014	46	0	0	30,117,668	21,082,368	2,023	1,416	2,407	10,842	1,075,980	227,690
2015	47	0	0	28,363,752	19,854,626	1,905	1,334	2,267	10,211	1,013,320	214,430
2016	48	0	0	26,711,980	18,698,386	1,795	1,256	2,135	9,616	954,309	201,943
2017	49	0	0	25,156,392	17,609,474	1,690	1,183	2,010	9,056	898,734	190,182
2018	50	0	0	23,691,398	16,583,979	1,592	1,114	1,893	8,529	846,396	179,107
2019	51	0	0	22,311,720	15,618,204	1,499	1,049	1,783	8,032	797,105	168,677
2020	52	0	0	21,012,384	14,708,669	1,412	988	1,679	7,564	750,686	158,854
2021	53	0	0	19,788,720	13,852,104	1,329	931	1,581	7,124	706,969	149,603
2022	54	0	0	18,636,312	13,045,418	1,252	876	1,489	6,709	665,798	140,891
2023	55	0	0	17,551,018	12,285,713	1,179	825	1,402	6,318	627,025	132,686
2024	56	0	0	16,528,929	11,570,250	1,110	777	1,321	5,950	590,510	124,959
2025	57	0	0	15,566,357	10,896,450	1,046	732	1,244	5,604	556,122	117,682
2026	58	0	0	14,659,843	10,261,890	985	689	1,171	5,278	523,736	110,828
2027	59	0	0	13,806,121	9,664,285	928	649	1,103	4,970	493,236	104,374
2028	60	0	0	13,002,115	9,101,481	873	611	1,039	4,681	464,512	98,296
2029	61	0	0	12,244,930	8,571,451	823	576	978	4,408	437,461	92,572
2030	62	0	0	11,531,842	8,072,289	775	542	921	4,151	411,985	87,181
2031	63	0	0	10,860,280	7,602,196	730	511	868	3,910	387,993	82,104
2032	64	0	0	10,227,826	7,159,478	687	481	817	3,682	365,398	77,322
2033	65	0	0	9,632,204	6,742,543	647	453	770	3,468	344,119	72,819
2034	66	0	0	9,071,268	6,349,888	609	427	725	3,266	324,079	68,579
2035	67	0	0	8,542,999	5,980,099	574	402	683	3,075	305,206	64,585
2036	68	0	0	8,045,493	5,631,845	540	378	643	2,896	287,432	60,824
2037	69	0	0	7,576,960	5,303,872	509	356	605	2,728	270,693	57,282
2038	70	0	0	7,135,711	4,994,998	479	336	560	2,569	254,929	53,946
2039	71	0	0	6,720,161	4,704,113	451	316	537	2,419	240,084	50,804
2040	72	0	0	6,328,810	4,430,167	425	298	506	2,278	226,102	47,846
2041	73	0	0	5,960,248	4,172,173	400	280	476	2,146	212,935	45,059
2042	74	0	0	5,613,150	3,929,205	377	264	449	2,021	200,535	42,435
2043	75	0	0	5,286,266	3,700,386	355	249	422	1,903	188,856	39,964
2044	76	0	0	4,978,418	3,484,892	334	234	398	1,792	177,858	37,637
Total:		4,231,625	4,231,625	1,925,018,371	1,347,512,860	129,323	90,526	153,826	693,007	68,772,946	14,553,139
Peak:		205,622	205,622	61,874,732	43,312,312	4,157	2,910	4,944	22,275	2,210,528	467,773

**Tabla 50: Producción de Biogás con un potencial de generación alto de metano**

Year	Year	Annual Tonnage (tonnes)	Annual Decomposable Tonnage (tonnes)	Theoretical Annual Gas Production (m <sup>3</sup> /year)	Factored Annual Gas Production (m <sup>3</sup> /year)	Theoretical Annual Gas Production (cfm)	Factored Annual Gas Production (cfm)	Factored Annual Gas Production (m <sup>3</sup> /hour)	Factored Annual CH <sub>4</sub> Production (tonnes/year)	Factored Annual Energy Value (MJ/day)	Factored Annual CH <sub>4</sub> as eCO <sub>2</sub> (tonnes/year)
1969	1	62,772	62,772	0	0	0	0	0	0	0	0
1970	2	66,404	66,404	2,711,755	1,898,228	182	128	217	976	96,880	20,501
1971	3	70,094	70,094	5,371,929	3,760,350	361	253	429	1,934	191,917	40,612
1972	4	73,840	73,840	7,986,960	5,590,872	537	376	638	2,875	285,341	60,381
1973	5	75,080	75,080	10,562,792	7,393,954	710	497	844	3,803	377,365	79,855
1974	6	79,096	79,096	12,994,136	9,095,895	873	611	1,038	4,678	464,227	98,236
1975	7	83,014	83,014	15,412,053	10,788,437	1,035	725	1,232	5,548	550,609	116,515
1976	8	86,990	86,990	17,813,340	12,469,338	1,197	838	1,423	6,413	636,397	134,669
1977	9	91,023	91,023	20,201,750	14,141,225	1,357	950	1,614	7,273	721,725	152,735
1978	10	95,113	95,113	22,580,748	15,806,524	1,517	1,062	1,804	8,129	806,717	170,710
1979	11	99,260	99,260	24,953,524	17,467,467	1,676	1,173	1,994	8,983	891,486	188,649
1980	12	103,464	103,464	27,323,032	19,126,122	1,836	1,285	2,183	9,836	976,139	206,562
1981	13	107,726	107,726	29,691,998	20,784,399	1,995	1,396	2,373	10,689	1,060,772	224,472
1982	14	112,045	112,045	32,062,930	22,444,051	2,154	1,508	2,562	11,543	1,145,476	242,396
1983	15	116,421	116,421	34,438,152	24,106,706	2,314	1,619	2,752	12,398	1,230,333	260,352
1984	16	120,854	120,854	36,819,808	25,773,866	2,474	1,731	2,942	13,255	1,315,419	278,358
1985	17	125,826	125,826	39,209,876	27,446,913	2,634	1,844	3,133	14,116	1,400,807	296,427
1986	18	129,893	129,893	41,630,972	29,141,680	2,797	1,958	3,327	14,987	1,487,302	314,730
1987	19	134,498	134,498	44,041,600	30,829,120	2,959	2,071	3,519	15,855	1,573,424	332,954
1988	20	139,160	139,160	46,465,824	32,526,077	3,122	2,185	3,713	16,728	1,660,032	351,282
1989	21	143,879	143,879	48,905,068	34,233,548	3,285	2,300	3,908	17,606	1,747,174	369,727
1990	22	148,656	148,656	51,360,656	35,952,459	3,450	2,415	4,104	18,490	1,834,904	388,282
1991	23	153,490	153,490	53,833,816	37,683,671	3,617	2,532	4,302	19,380	1,923,260	406,984
1992	24	158,381	158,381	56,325,648	39,427,954	3,784	2,649	4,501	20,277	2,012,282	425,822
1993	25	164,214	164,214	58,837,200	41,186,000	3,953	2,767	4,702	21,181	2,102,010	444,809
1994	26	168,335	168,335	61,407,616	42,985,331	4,125	2,888	4,907	22,107	2,193,840	464,242
1995	27	171,899	171,899	63,958,464	44,770,925	4,297	3,008	5,111	23,025	2,284,971	483,526
1996	28	178,518	178,518	66,467,132	46,526,992	4,465	3,126	5,311	23,928	2,374,596	502,492
1997	29	183,696	183,696	69,068,896	48,348,227	4,640	3,248	5,519	24,865	2,467,546	522,161
1998	30	188,433	188,433	71,694,272	50,185,990	4,816	3,372	5,729	25,810	2,561,340	542,009
1999	31	194,107	194,107	74,322,472	52,025,730	4,993	3,495	5,939	26,756	2,655,235	561,878
2000	32	199,821	199,821	76,993,696	53,895,587	5,172	3,621	6,152	27,718	2,750,666	582,072
2001	33	205,622	205,622	79,706,400	55,794,480	5,355	3,748	6,369	28,694	2,847,580	602,580
2002	34	0	0	82,461,136	57,722,795	5,540	3,878	6,589	29,686	2,945,995	623,406
2003	35	0	0	76,121,224	53,284,857	5,114	3,580	6,083	27,404	2,719,497	575,476
2004	36	0	0	70,268,752	49,188,126	4,721	3,304	5,615	25,297	2,510,412	531,232
2005	37	0	0	64,866,224	45,406,357	4,358	3,050	5,183	23,352	2,317,402	490,389
2006	38	0	0	59,879,076	41,915,353	4,023	2,816	4,785	21,556	2,139,232	452,686
2007	39	0	0	55,275,348	38,692,744	3,713	2,599	4,417	19,899	1,974,760	417,882
2008	40	0	0	51,025,584	35,717,909	3,428	2,400	4,077	18,369	1,822,933	385,753
2009	41	0	0	47,102,552	32,971,786	3,164	2,215	3,764	16,957	1,682,779	356,095
2010	42	0	0	43,481,136	30,436,795	2,921	2,045	3,475	15,653	1,553,401	328,717
2011	43	0	0	40,138,144	28,096,701	2,696	1,888	3,207	14,450	1,433,970	303,444
2012	44	0	0	37,052,176	25,936,523	2,489	1,742	2,961	13,339	1,323,721	280,114
2013	45	0	0	34,203,472	23,942,430	2,298	1,608	2,733	12,313	1,221,949	258,578
2014	46	0	0	31,573,784	22,101,649	2,121	1,485	2,523	11,367	1,128,001	238,698
2015	47	0	0	29,146,274	20,402,392	1,958	1,371	2,329	10,493	1,041,276	220,346
2016	48	0	0	26,905,404	18,833,783	1,808	1,265	2,150	9,686	961,219	203,405
2017	49	0	0	24,836,818	17,385,773	1,669	1,168	1,985	8,941	887,317	187,766
2018	50	0	0	22,927,272	16,049,090	1,540	1,078	1,832	8,254	819,097	173,330
2019	51	0	0	21,164,540	14,815,178	1,422	995	1,691	7,619	756,121	160,004
2020	52	0	0	19,537,332	13,676,132	1,313	919	1,561	7,033	697,988	147,702
2021	53	0	0	18,035,230	12,624,661	1,212	848	1,441	6,493	644,324	136,346
2022	54	0	0	16,648,616	11,654,031	1,118	783	1,330	5,994	594,786	125,864
2023	55	0	0	15,368,611	10,758,028	1,032	723	1,228	5,533	549,057	116,187
2024	56	0	0	14,187,017	9,930,912	953	667	1,134	5,107	506,843	107,254
2025	57	0	0	13,096,266	9,167,386	880	616	1,047	4,715	467,875	99,008
2026	58	0	0	12,089,377	8,462,564	812	569	966	4,352	431,903	91,396
2027	59	0	0	11,159,902	7,811,931	750	525	892	4,018	398,697	84,369
2028	60	0	0	10,301,889	7,211,322	692	484	823	3,709	368,044	77,882
2029	61	0	0	9,509,841	6,656,889	639	447	760	3,424	339,747	71,894
2030	62	0	0	8,778,690	6,145,083	590	413	701	3,160	313,626	66,367
2031	63	0	0	8,103,752	5,672,626	544	381	648	2,917	289,514	61,264
2032	64	0	0	7,480,706	5,236,494	503	352	598	2,693	267,255	56,554
2033	65	0	0	6,905,562	4,833,893	464	325	552	2,486	246,707	52,206
2034	66	0	0	6,374,637	4,462,246	428	300	509	2,295	227,739	48,192
2035	67	0	0	5,884,532	4,119,172	395	277	470	2,118	210,230	44,487
2036	68	0	0	5,432,108	3,802,475	365	255	434	1,956	194,067	41,067
2037	69	0	0	5,014,468	3,510,127	337	236	401	1,805	179,146	37,909
2038	70	0	0	4,628,937	3,240,256	311	218	370	1,666	165,373	34,995
2039	71	0	0	4,273,047	2,991,133	287	201	341	1,538	152,658	32,304
2040	72	0	0	3,944,520	2,761,164	265	185	315	1,420	140,921	29,821
2041	73	0	0	3,641,251	2,548,875	245	171	291	1,311	130,087	27,528
2042	74	0	0	3,361,298	2,352,908	226	158	269	1,210	120,085	25,411
2043	75	0	0	3,102,869	2,172,008	208	146	248	1,117	110,853	23,458
2044	76	0	0	2,864,309	2,005,016	192	135	229	1,031	102,330	21,654
Total:		4,231,625	4,231,625	2,343,308,195	1,640,315,736	157,424	110,197	187,251	843,591	83,716,712	17,715,410
Peak:		205,622	205,622	82,461,136	57,722,795	5,540	3,878	6,589	29,686	2,945,995	623,406

## Anexo C: Cálculo De Emisiones En Loma De Los Cocos

### Alimentación Del Modelo

**Historia de Disposición de Residuos** – Se proyectó los índices de disposición anual hasta 2030, año de cierre proyectado de loma de los cocos (25 años de vida útil aprox.). Los índices de disposición futuros se estimaron basados en la proyección del crecimiento de la población manteniendo una tasa constante de generación de residuos per capita de 0.66 kg/hab. Como esta establecido, la capacidad proyectada del relleno sanitario (10 millones de toneladas: 37.5Ha y 6 millones en la primera fase; 28Ha y 4 millones en la segunda<sup>95</sup>) puede ser suficiente para la cantidad de residuos sólidos generados durante los años 2005-2030.

**Tabla 51: Disposición Proyectada de RSU en el Relleno Sanitario de Loma de los Cocos.**

Años	Zona Urbana	Produccion Total RSU (kg/año)	Residuos In Situ	Produccion RSU (kg/dia)	Comentario
	Poblacion				
2005	952.855	229.542.769,50	229.542.769,5	628.884,30	estimado
2006	978.309	235.674.638,10	465.217.407,6	645.683,94	estimado
2007	1.004.015	241.867.213,50	707.084.621,1	662.649,90	estimado
2008	1.029.994	248.125.554,60	955.210.175,7	679.796,04	estimado
2009	1.056.231	254.446.047,90	1.209.656.223,6	697.112,46	estimado
2010	1.082.712	260.825.320,80	1.470.481.544,4	714.589,92	estimado
2011	1.106.109	266.461.658,10	1.736.943.202,5	730.031,94	estimado
2012	1.131.438	272.563.414,20	2.009.506.616,7	746.749,08	estimado
2013	1.156.767	278.665.170,30	2.288.171.787,0	763.466,22	estimado
2014	1.182.096	284.766.926,40	2.572.938.713,4	780.183,36	estimado
2015	1.207.425	290.868.682,50	2.863.807.395,9	796.900,50	estimado
2016	1.232.754	296.970.438,60	3.160.777.834,5	813.617,64	estimado
2017	1.258.083	303.072.194,70	3.463.850.029,2	830.334,78	estimado
2018	1.283.412	309.173.950,80	3.773.023.980,0	847.051,92	estimado
2019	1.314.578	316.681.844,86	4.089.705.824,9	867.621,49	estimado
2020	1.342.034	323.296.077,38	4.413.001.902,2	885.742,68	estimado
2021	1.369.525	329.918.625,56	4.742.920.527,8	903.886,65	estimado
2022	1.397.029	336.544.345,20	5.079.464.873,0	922.039,30	estimado
2023	1.424.525	343.167.980,93	5.422.632.853,9	940.186,25	estimado
2024	1.451.989	349.784.172,26	5.772.417.026,2	958.312,80	estimado
2025	1.479.400	356.387.460,12	6.128.804.486,3	976.404,00	estimado
2026	1.506.734	362.972.293,56	6.491.776.779,9	994.444,64	estimado
2027	1.533.969	369.533.036,95	6.861.309.816,8	1.012.419,28	estimado
2028	1.561.079	376.063.977,33	7.237.373.794,1	1.030.312,27	estimado
2029	1.588.042	382.559.332,13	7.619.933.126,3	1.048.107,76	estimado
2030	1.614.833	389.013.257,22	8.008.946.383,5	1.065.789,75	estimado
2031		0,00	8.008.946.383,5		
2032		0,00	8.008.946.383,5		

Fuente: los autores.

Notas: 1. Datos calculados con base en una regresión polinomial de segundo orden en base a las tasas de crecimiento de la población y evaluados con la tasa producción de residuos per. Capita (0.66 kg/hab). Así mismo DANE registra un descenso en las tasas de crecimiento que aunque leve se confirma en los censos poblacionales.

<sup>95</sup> Estudio de Impacto Ambiental del Relleno Sanitario Loma de los Cocos. 2002.

**Contenido de Metano** – se ha estimado el contenido de metano futuro como 50 por ciento.

**Constante de Generación de Metano [k]** – Estudios de laboratorio han sugerido que residuos orgánicos de alta degradación tales como la comida se degradan 5 veces mas rápido que residuos de degradación media tales como papel, y 20 veces mas rápido que los de degradación baja tales como textiles. Para la evaluación del relleno sanitario Loma de los Cocos, se empleo tres diferentes valores de k basado en la degradabilidad de los diferentes componentes de los residuos.

Según la tabla 41, para una precipitación anual promedio de 926 mm (tabla 52) y RSU altamente degradables (tabla 51), tenemos:  $k_s$ : 0.08,  $k$ : 0.07,  $k_i$ : 0.06.

**Tabla 52: Datos de Composición de Residuos.**

Material	%
<b>Organicos</b>	66.54%
Alimentos	57.14%
Podas	9.41%
<b>Potencialmente Recic</b>	25.03%
Vidrio	1.94%
Metal	2.00%
Papel y Carton	6.28%
Plasticos	14.81%
<b>Aprovechables</b>	4.84%
Madera	1.42%
Caucho y Cuero	1.23%
Textiles	2.19%
<b>No Aprovechables</b>	3.59%
Sanitarios	3.35%
Especiales	0.24%

Fuente: los autores.

**Tabla 53: Datos Geotécnicos Cartagena de Indias<sup>96</sup>.**

<b>Régimen de lluvias</b>	
Total anual máximo	976.4 mm.
Precipitación anual promedio	926.28 mm
Promedio mensual	85 mm
Meses de más lluvias	Mayo a Octubre.
Meses de menos lluvias	Noviembre a Abril.
<b>Niveles de temperatura</b>	
Máxima media	31.9° C (Agosto).
Mínima media	22.5° C (Enero).
Media mensual	27.2° C.
<b>Régimen de vientos</b>	
Norte, fuerza máxima registrada	28.5 m/seg. (Diciembre/56).
Presión atmosférica media / mes	755.1 cm.

<sup>96</sup> Decreto No. 0977 por medio del cual se adopta el Plan de Ordenamiento Territorial del Distrito Turístico y Cultural de Cartagena de Indias

Brillo solar (horas - minutos)	296.55 (hs-min).
<b>Humedad Relativa</b>	
Humedad relativa máxima	87%
Humedad relativa promedio	80.3%
<b>Niveles de Evaporación</b>	
Evaporación Promedio	27.6 mm
Evaporación máxima	29.1 mm
Evaporación mínima	0.2 mm

Fuente: Plan de Ordenamiento Territorial del Distrito Turístico y Cultural de Cartagena de Indias. 2002, p

**Potencial de Recuperación de Metano [Lo]** – Para el relleno sanitario Loma de los Cocos, se usó un valor basado en la precipitación anual promedio (tabla 52) y se ajustó de acuerdo con las proporciones de contenido orgánico (tabla 51) y humedad en rellenos sanitarios de Estados Unidos y los del este relleno sanitario.

Para el relleno sanitario de henequén, y según la tabla 42, se han establecido los siguientes valores de Lo:

**Lo<sub>s</sub>: 270, Lo: 250, Lo<sub>i</sub>: 230.**

Para la evaluación del factor de cobertura del sistema, se ha determinado un porcentaje de recuperación inicial de aproximadamente 50%, dado que el relleno sanitario de loma de los cocos se encuentra actualmente en operación, el factor de cobertura aumentará gradualmente hasta lograrse una cobertura del 100%. Es importante notar que además de la variabilidad de la cobertura del sistema y el nivel de operación y mantenimiento, también existe la incertidumbre intrínseca que presenta el modelo matemático.

### **Recuperación Potencial de Biogás.**

Con el uso del modelo, se estima que la recuperación potencial de biogás para el relleno sanitario Loma de los Cocos en el 2007 es de 642 m<sup>3</sup>/hr, llegará a un máximo de 11.509 m<sup>3</sup>/h en el año 2031 y declinará a 1.739 m<sup>3</sup>/hr en el 2058. Bajo un escenario con expansión, la recuperación potencial de biogás continuará incrementando mientras el relleno continúe operando.

### **Recuperación Anticipada de Biogás**

Se estima que la recuperación de biogás en el Relleno Sanitario de Henequén comenzará en el 2006.

Tabla 54: Producción de Biogás con un potencial de generación normal de metano

Year	Year Ninter	Annual Lomage (tonnes)	Annual Lomage (tonnes)	Theoretical Annual Gas Production (m <sup>3</sup> /year)	Actual Annual Gas Production (m <sup>3</sup> /year)	Theoretical Annual Gas Production (dm)	Actual Annual Gas Production (dm)	Theoretical Annual Gas Production (m <sup>3</sup> /hour)	Actual Annual Gas Production (m <sup>3</sup> /hour)	Theoretical Annual CH <sub>4</sub> Production (tonnes/year)	Actual Annual CH <sub>4</sub> Value (Mj/day)	Theoretical Annual CH <sub>4</sub> Production (tonnes/year)
A1b	1	22543	22543	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A1b	2	25665	25665	80899	562398	50	38	62	282	28121	6137	6137
A1b	3	24267	24267	153942	1101625	115	70	128	566	56216	11890	11890
A1b	4	25126	25126	2314130	1619511	122	108	189	831	82523	14944	14944
A1b	5	2446	2446	314166	218246	205	143	248	1084	10808	2371	2371
A1b	6	21825	21825	314142	258430	244	176	296	1365	136161	28161	28161
A1b	7	26462	26462	433984	3161789	298	215	348	1546	152642	3163	3163
A1b	8	22563	22563	5118864	361641	336	236	404	1819	179185	38823	38823
A1b	9	28666	28666	5621912	398268	380	266	446	2124	211990	4532	4532
A1b	10	28767	28767	6221168	439446	419	296	491	2236	222528	4732	4732
A1b	11	21869	21869	6791624	478113	466	316	542	2440	24336	5186	5186
A1b	12	2690	2690	733676	518975	492	349	588	2640	26278	5609	5609
A1b	13	3102	3102	789788	558466	536	374	631	2842	28230	5912	5912
A1b	14	3114	3114	842594	5892161	560	362	632	3139	31193	6689	6689
A1b	15	31682	31682	8931480	621106	604	418	712	31283	31283	6968	6968
A1b	16	3226	3226	944320	661216	645	444	734	3399	33296	7164	7164
A1b	17	32919	32919	993528	693210	694	462	789	3664	36212	7514	7514
A1b	18	3354	3354	1041646	722334	699	489	835	3734	37217	7834	7834
A1b	19	33168	33168	1089256	762818	731	512	805	3849	38196	8239	8239
A1b	20	33784	33784	1136120	794216	762	530	804	4082	40503	8536	8536
A1b	21	33787	33787	1181230	826872	793	552	939	4225	421131	8838	8838
A1b	22	36272	36272	12261240	858914	823	566	948	4414	43745	9354	9354
A1b	23	36553	36553	12712310	889922	854	594	1011	4670	46516	9838	9838
A1b	24	36164	36164	1313338	918138	886	618	1048	4824	48042	9938	9938
A1b	25	36259	36259	1366322	94876	913	639	1080	4885	48637	10344	10344
A1b	26	38013	38013	1418240	979117	937	658	1117	5134	5116	10746	10746
A1b	27	0	0	1441112	1018218	966	673	1139	5181	5163	10880	10880
A1b	28	0	0	1482426	10599	912	635	1031	4836	4817	10546	10546
A1b	29	0	0	152152	81166	842	588	1016	4817	4804	10667	10667
A1b	30	0	0	11649824	812437	785	540	939	4210	41918	8269	8269
A1b	31	0	0	1183638	761976	735	519	869	3988	39804	8257	8257
A1b	32	0	0	11147432	710812	689	473	811	3659	36484	7621	7621
A1b	33	0	0	94656	662498	638	440	762	3469	34518	7194	7194
A1b	34	0	0	8823624	616637	585	414	711	3166	31528	6616	6616
A1b	35	0	0	8222216	573411	552	389	654	2968	29526	6298	6298
A1b	36	0	0	761114	536913	515	367	613	2716	27153	5928	5928
A1b	37	0	0	712414	506817	486	364	575	2549	25328	5472	5472
A1b	38	0	0	66856	468948	440	316	529	2418	24231	5166	5166
A1b	39	0	0	6218104	436915	417	292	489	2236	22244	4708	4708
A1b	40	0	0	579628	408334	388	276	463	2181	21722	4330	4330
A1b	41	0	0	541670	378960	362	262	430	1940	193122	4069	4069
A1b	42	0	0	514128	352140	336	230	408	1816	181661	3810	3810
A1b	43	0	0	489466	328525	315	220	375	1688	16892	3529	3529
A1b	44	0	0	458138	306226	294	211	351	1574	15648	3320	3320
A1b	45	0	0	428172	283861	276	192	326	1478	14736	3186	3186
A1b	46	0	0	398312	266168	259	179	304	1374	13714	2994	2994
A1b	47	0	0	368170	248246	236	160	288	1286	12838	2834	2834
A1b	48	0	0	331638	231191	225	157	266	1192	11818	2711	2711
A1b	49	0	0	308764	216432	204	142	246	1116	11132	2545	2545
A1b	50	0	0	289152	203116	184	134	211	1064	10633	2464	2464
A1b	51	0	0	268470	189162	165	122	186	964	9617	2299	2299
A1b	52	0	0	24856	175419	148	117	200	900	8948	1829	1829
A1b	53	0	0	233686	163572	138	109	186	841	8332	1642	1642
A1b	54	0	0	213910	152191	126	103	173	785	7734	1649	1649
A1b	55	0	0	198508	142166	115	94	162	734	7249	1538	1538
A1b	56	0	0	1891680	132136	121	80	152	680	6788	1439	1439
A1b	57	0	0	176916	123634	118	82	149	630	6219	1336	1336
A1b	58	0	0	164415	115169	111	73	134	580	5759	1230	1230
A1b	59	0	0	153340	107330	100	72	125	520	5179	1121	1121
A1b	60	0	0	142676	100736	90	62	112	514	5114	1084	1084
A1b	61	0	0	133128	93115	86	62	116	479	4724	1017	1017
A1b	62	0	0	124215	87119	83	54	98	444	4413	935	935
A1b	63	0	0	118576	811215	79	56	96	412	4108	861	861
A1b	64	0	0	118124	76685	76	58	95	380	3812	818	818
A1b	65	0	0	110472	71633	67	44	86	362	3619	766	766
A1b	66	0	0	93366	65332	61	42	71	332	3336	710	710
A1b	67	0	0	87857	61314	58	42	70	315	3124	662	662
A1b	68	0	0	81644	571650	54	34	65	294	2915	617	617
A1b	69	0	0	761431	53118	52	38	68	271	2719	574	574
A1b	70	0	0	71366	49066	47	34	56	256	2568	536	536
A1b	71	0	0	66930	46513	46	31	52	238	2381	504	504
A1b	72	0	0	61216	43144	43	20	48	222	2212	466	466
A1b	73	0	0	57346	40237	38	21	40	212	2133	436	436
A1b	74	0	0	53693	376015	36	22	42	192	1916	416	416
A1b	75	0	0	511298	35118	36	25	40	181	1813	382	382
A1b	76	0	0	46446	32632	35	29	35	169	1692	356	356
Total Rank		80896 3903	80896 3903	408191731 14401712	285751512 1082218	2726 966	19198 673	36182 1139	14945 5181	14580316 514567	308936 108880	

**Tabla 55: Producción de Biogás con un potencial de generación bajo de metano**

Year	Year	Annual Tonnage (tonnes)	Annual Decomposable Tonnage (tonnes)	Theoretical Annual Gas Production (m <sup>3</sup> /year)	Factored Annual Gas Production (m <sup>3</sup> /year)	Theoretical Annual Gas Production (cfm)	Factored Annual Gas Production (cfm)	Factored Annual Gas Production (m <sup>3</sup> /hour)	Factored Annual CH <sub>4</sub> Production (tonnes/year)	Factored Annual Energy Value (MJ/day)	Factored Annual CH <sub>4</sub> eCO <sub>2</sub> (tonnes/year)
2005	1	229,543	229,543	0	0	0	0	0	0	0	0
2006	2	235,675	235,675	6,335,380	4,434,766	426	298	506	2,281	226,337	47,895
2007	3	241,867	241,867	12,471,056	8,729,739	838	586	997	4,490	445,539	94,281
2008	4	248,126	248,126	18,420,332	12,894,232	1,237	866	1,472	6,631	658,082	139,258
2009	5	254,446	254,446	24,195,880	16,937,116	1,625	1,138	1,933	8,711	864,419	182,921
2010	6	260,825	260,825	29,809,534	20,866,674	2,003	1,402	2,382	10,731	1,064,971	225,360
2011	7	266,462	266,462	35,272,340	24,690,638	2,370	1,659	2,819	12,698	1,260,135	266,659
2012	8	272,563	272,563	40,572,580	28,400,806	2,726	1,908	3,242	14,606	1,449,491	306,729
2013	9	278,665	278,665	45,732,568	32,012,798	3,072	2,151	3,654	16,464	1,633,836	345,738
2014	10	284,767	284,767	50,760,472	35,532,330	3,410	2,387	4,056	18,274	1,813,462	383,749
2015	11	290,869	290,869	55,665,976	38,964,783	3,740	2,618	4,448	20,039	1,988,644	420,820
2016	12	296,970	296,970	60,450,332	42,315,232	4,061	2,843	4,831	21,762	2,159,640	457,005
2017	13	303,072	303,072	65,126,368	45,588,458	4,375	3,065	5,204	23,445	2,326,696	492,355
2018	14	309,174	309,174	69,698,496	48,788,947	4,682	3,278	5,570	25,091	2,490,039	526,921
2019	15	316,682	316,682	74,172,768	51,920,938	4,983	3,488	5,927	26,702	2,649,886	560,746
2020	16	323,296	323,296	78,593,704	55,015,593	5,280	3,696	6,280	28,294	2,807,828	594,188
2021	17	329,919	329,919	82,939,736	58,057,815	5,572	3,900	6,628	29,858	2,963,004	627,024
2022	18	336,544	336,544	87,215,456	61,050,819	5,859	4,101	6,969	31,398	3,115,848	659,349
2023	19	343,168	343,168	91,425,040	63,997,528	6,142	4,299	7,306	32,913	3,266,239	691,173
2024	20	349,784	349,784	95,572,304	66,900,613	6,421	4,494	7,637	34,406	3,414,403	722,527
2025	21	356,387	356,387	99,660,648	69,762,454	6,695	4,687	7,964	35,878	3,560,463	753,434
2026	22	362,972	362,972	103,693,160	72,585,212	6,966	4,876	8,286	37,330	3,704,528	783,920
2027	23	369,533	369,533	107,672,568	75,370,798	7,233	5,063	8,604	38,762	3,846,696	814,005
2028	24	376,064	376,064	111,601,320	78,120,924	7,497	5,248	8,918	40,176	3,987,054	843,706
2029	25	382,559	382,559	115,481,528	80,837,070	7,758	5,431	9,228	41,573	4,125,677	873,040
2030	26	389,013	389,013	119,315,048	83,520,534	8,016	5,611	9,534	42,953	4,262,633	902,022
2031	27	0	0	123,103,456	86,172,419	8,270	5,789	9,837	44,317	4,397,977	930,662
2032	28	0	0	115,934,464	81,154,125	7,789	5,452	9,264	41,736	4,141,859	876,465
2033	29	0	0	109,182,960	76,428,072	7,335	5,134	8,725	39,306	3,900,656	825,423
2034	30	0	0	102,824,640	71,977,248	6,908	4,835	8,217	37,017	3,673,499	777,354
2035	31	0	0	96,836,608	67,785,626	6,506	4,554	7,738	34,861	3,459,572	732,085
2036	32	0	0	91,197,272	63,838,090	6,127	4,289	7,287	32,831	3,258,171	689,451
2037	33	0	0	85,886,360	60,120,452	5,770	4,039	6,863	30,919	3,068,364	649,301
2038	34	0	0	80,884,744	56,619,321	5,434	3,804	6,463	29,119	2,889,677	611,489
2039	35	0	0	76,174,368	53,322,058	5,117	3,582	6,087	27,423	2,721,395	575,878
2040	36	0	0	71,738,320	50,216,824	4,819	3,374	5,733	25,826	2,562,914	542,342
2041	37	0	0	67,560,608	47,292,426	4,539	3,177	5,399	24,322	2,413,661	510,758
2042	38	0	0	63,626,180	44,538,326	4,274	2,992	5,084	22,905	2,273,100	481,014
2043	39	0	0	59,920,884	41,944,619	4,026	2,818	4,788	21,572	2,140,725	453,002
2044	40	0	0	56,431,360	39,501,952	3,791	2,654	4,509	20,315	2,016,059	426,621
2045	41	0	0	53,145,056	37,201,539	3,570	2,499	4,247	19,132	1,898,653	401,777
2046	42	0	0	50,050,128	35,035,090	3,362	2,354	3,999	18,018	1,788,804	378,379
2047	43	0	0	47,135,432	32,994,802	3,167	2,217	3,767	16,969	1,683,954	356,344
2048	44	0	0	44,390,484	31,073,339	2,982	2,088	3,547	15,981	1,585,888	335,592
2049	45	0	0	41,805,376	29,263,763	2,809	1,966	3,341	15,050	1,493,533	316,049
2050	46	0	0	39,370,824	27,559,577	2,645	1,851	3,146	14,173	1,406,557	297,643
2051	47	0	0	37,078,044	25,954,631	2,491	1,744	2,963	13,348	1,324,645	280,310
2052	48	0	0	34,918,788	24,443,152	2,346	1,642	2,790	12,571	1,247,504	263,986
2053	49	0	0	32,885,278	23,019,695	2,209	1,546	2,628	11,839	1,174,855	248,613
2054	50	0	0	30,970,188	21,679,132	2,081	1,456	2,475	11,149	1,106,437	234,135
2055	51	0	0	29,166,624	20,416,637	1,959	1,372	2,331	10,500	1,042,003	220,500
2056	52	0	0	27,468,094	19,227,666	1,845	1,292	2,195	9,889	981,321	207,659
2057	53	0	0	25,868,476	18,107,933	1,738	1,216	2,067	9,313	924,174	195,566
2058	54	0	0	24,362,012	17,053,408	1,637	1,146	1,947	8,770	870,354	184,177
2059	55	0	0	22,943,282	16,060,297	1,541	1,079	1,833	8,260	819,669	173,451
2060	56	0	0	21,607,170	15,125,019	1,452	1,016	1,727	7,779	771,935	163,350
2061	57	0	0	20,348,868	14,244,208	1,367	957	1,626	7,326	726,981	153,837
2062	58	0	0	19,163,836	13,414,685	1,287	901	1,531	6,899	684,645	144,879
2063	59	0	0	18,047,824	12,633,477	1,212	849	1,442	6,497	644,774	136,442
2064	60	0	0	16,996,800	11,897,760	1,142	799	1,358	6,119	607,225	128,496
2065	61	0	0	16,006,983	11,204,888	1,075	753	1,279	5,763	571,863	121,013
2066	62	0	0	15,074,810	10,552,367	1,013	709	1,205	5,427	538,561	113,966
2067	63	0	0	14,196,920	9,937,844	954	668	1,134	5,111	507,197	107,329
2068	64	0	0	13,370,158	9,359,111	898	629	1,068	4,813	477,660	101,078
2069	65	0	0	12,591,541	8,814,079	846	592	1,006	4,533	449,844	95,192
2070	66	0	0	11,858,265	8,300,786	797	558	948	4,269	423,647	89,648
2071	67	0	0	11,167,693	7,817,385	750	525	892	4,020	398,975	84,428
2072	68	0	0	10,517,338	7,362,137	707	495	840	3,786	375,741	79,511
2073	69	0	0	9,904,855	6,933,399	665	466	791	3,566	353,860	74,881
2074	70	0	0	9,328,042	6,529,629	627	439	745	3,358	333,252	70,520
2075	71	0	0	8,784,818	6,149,373	590	413	702	3,163	313,845	66,413
2076	72	0	0	8,273,232	5,791,262	556	389	661	2,978	295,568	62,546
2077	73	0	0	7,791,435	5,454,004	523	366	623	2,805	278,356	58,903
2078	74	0	0	7,337,698	5,136,388	493	345	586	2,642	262,146	55,473
2079	75	0	0	6,910,383	4,837,268	464	325	552	2,488	246,879	52,242
2080	76	0	0	6,507,954	4,555,567	437	306	520	2,343	232,502	49,200
Total:		8,008,946	8,008,946	3,690,499,526	2,583,349,668	247,929	173,550	294,903	1,328,580	131,846,287	27,900,176
Peak:		389,013	389,013	123,103,456	86,172,419	8,270	5,789	9,837	44,317	4,397,977	930,662

**Tabla 56: Producción de Biogás con un potencial de generación alto de metano**

Year	Year	Annual Tonnage (tonnes)	Annual Decomposable Tonnage (tonnes)	Theoretical Annual Gas Production (m <sup>3</sup> /year)	Factored Annual Gas Production (m <sup>3</sup> /year)	Theoretical Annual Gas Production (cfm)	Factored Annual Gas Production (cfm)	Factored Annual Gas Production (m <sup>3</sup> /hour)	Factored Annual CH <sub>4</sub> Production (tonnes/year)	Factored Annual Energy Value (MJ/day)	Factored Annual CH <sub>4</sub> as eCO <sub>2</sub> (tonnes/year)
2005	1	229,543	229,543	0	0	0	0	0	0	0	0
2006	2	235,675	235,675	9,916,247	6,941,373	666	466	792	3,570	354,267	74,967
2007	3	241,867	241,867	19,334,994	13,534,496	1,299	909	1,545	6,961	690,759	146,173
2008	4	248,126	248,126	28,297,114	19,807,980	1,901	1,331	2,261	10,187	1,010,939	213,926
2009	5	254,446	254,446	36,840,552	25,788,386	2,475	1,732	2,944	13,263	1,316,161	278,515
2010	6	260,825	260,825	45,000,184	31,500,129	3,023	2,116	3,596	16,200	1,607,670	340,201
2011	7	266,462	266,462	52,808,064	36,965,645	3,548	2,483	4,220	19,011	1,886,614	399,229
2012	8	272,563	272,563	60,259,124	42,181,387	4,048	2,834	4,815	21,693	2,152,809	455,559
2013	9	278,665	278,665	67,400,920	47,180,644	4,528	3,170	5,386	24,264	2,407,956	509,551
2014	10	284,767	284,767	74,257,232	51,980,062	4,989	3,492	5,934	26,753	2,652,904	561,385
2015	11	290,869	290,869	80,849,984	56,594,989	5,432	3,802	6,461	29,106	2,888,436	611,226
2016	12	296,970	296,970	87,199,472	61,039,630	5,858	4,101	6,968	31,392	3,115,277	659,228
2017	13	303,072	303,072	93,324,384	65,327,069	6,270	4,389	7,457	33,597	3,334,094	705,532
2018	14	309,174	309,174	99,241,992	69,469,394	6,667	4,667	7,930	35,727	3,545,506	750,269
2019	15	316,682	316,682	104,968,208	73,477,746	7,052	4,936	8,388	37,789	3,750,080	795,560
2020	16	323,296	323,296	110,578,528	77,404,970	7,429	5,200	8,836	39,808	3,950,514	835,974
2021	17	329,919	329,919	116,043,248	81,230,274	7,796	5,457	9,273	41,776	4,145,745	877,287
2022	18	336,544	336,544	121,373,888	84,961,722	8,154	5,708	9,699	43,695	4,336,187	917,587
2023	19	343,168	343,168	126,580,936	88,606,655	8,504	5,953	10,115	45,569	4,522,213	956,952
2024	20	349,784	349,784	131,673,792	92,171,654	8,846	6,192	10,522	47,403	4,704,160	995,454
2025	21	356,387	356,387	136,660,912	95,662,338	9,181	6,427	10,920	49,198	4,882,329	1,033,156
2026	22	362,972	362,972	141,549,856	99,084,899	9,509	6,657	11,311	50,958	5,056,991	1,070,117
2027	23	369,533	369,533	146,347,392	102,443,174	9,832	6,882	11,694	52,685	5,228,387	1,106,386
2028	24	376,064	376,064	151,059,488	105,741,642	10,148	7,104	12,071	54,381	5,396,731	1,142,010
2029	25	382,559	382,559	155,691,440	108,984,008	10,459	7,322	12,441	56,049	5,562,211	1,177,027
2030	26	389,013	389,013	160,247,888	112,173,522	10,766	7,536	12,805	57,689	5,724,994	1,211,474
2031	27	0	0	164,732,832	115,312,982	11,067	7,747	13,164	59,304	5,885,223	1,245,380
2032	28	0	0	152,067,552	106,447,286	10,216	7,151	12,152	54,744	5,432,745	1,149,631
2033	29	0	0	140,376,048	98,263,234	9,431	6,601	11,217	50,535	5,015,056	1,061,243
2034	30	0	0	129,583,432	90,708,402	8,705	6,094	10,355	46,650	4,629,480	979,651
2035	31	0	0	119,620,576	83,734,403	8,036	5,625	9,559	43,063	4,273,549	904,332
2036	32	0	0	110,423,704	77,296,593	7,418	5,193	8,824	39,753	3,944,982	834,803
2037	33	0	0	101,933,936	71,353,755	6,848	4,794	8,145	36,696	3,641,678	770,621
2038	34	0	0	94,096,888	65,867,822	6,321	4,425	7,519	33,875	3,361,693	711,372
2039	35	0	0	86,862,368	60,803,658	5,835	4,085	6,941	31,270	3,103,233	656,680
2040	36	0	0	80,184,072	56,128,850	5,387	3,771	6,407	28,866	2,864,645	606,192
2041	37	0	0	74,019,232	51,813,462	4,973	3,481	5,915	26,647	2,644,401	559,585
2042	38	0	0	68,328,360	47,829,852	4,590	3,213	5,460	24,598	2,441,090	516,562
2043	39	0	0	63,075,020	44,152,514	4,237	2,966	5,040	22,707	2,253,410	476,847
2044	40	0	0	58,225,588	40,757,912	3,912	2,738	4,653	20,961	2,080,159	440,185
2045	41	0	0	53,748,984	37,624,289	3,611	2,528	4,295	19,350	1,920,229	406,342
2046	42	0	0	49,616,564	34,731,595	3,333	2,333	3,965	17,862	1,772,595	375,101
2047	43	0	0	45,801,864	32,061,305	3,077	2,154	3,660	16,489	1,636,311	346,262
2048	44	0	0	42,280,448	29,596,314	2,840	1,988	3,379	15,221	1,510,506	319,640
2049	45	0	0	39,029,780	27,320,846	2,622	1,835	3,119	14,051	1,394,373	295,065
2050	46	0	0	36,029,024	25,220,317	2,420	1,694	2,879	12,970	1,287,168	272,379
2051	47	0	0	33,258,982	23,281,287	2,234	1,564	2,658	11,973	1,188,206	251,438
2052	48	0	0	30,701,910	21,491,337	2,063	1,444	2,453	11,053	1,096,852	232,106
2053	49	0	0	28,341,436	19,839,005	1,904	1,333	2,265	10,203	1,012,522	214,261
2054	50	0	0	26,162,444	18,313,711	1,758	1,230	2,091	9,418	934,676	197,788
2055	51	0	0	24,150,978	16,905,685	1,622	1,136	1,930	8,694	862,815	182,581
2056	52	0	0	22,294,164	15,605,915	1,498	1,048	1,781	8,026	796,478	168,544
2057	53	0	0	20,580,106	14,406,074	1,383	968	1,645	7,409	735,242	155,586
2058	54	0	0	18,997,832	13,298,482	1,276	893	1,518	6,839	678,714	143,624
2059	55	0	0	17,537,210	12,276,047	1,178	825	1,401	6,313	626,532	132,581
2060	56	0	0	16,188,885	11,332,220	1,088	761	1,294	5,828	578,362	122,388
2061	57	0	0	14,944,225	10,460,958	1,004	703	1,194	5,380	533,895	112,978
2062	58	0	0	13,795,258	9,656,681	927	649	1,102	4,966	492,848	104,292
2063	59	0	0	12,734,628	8,914,240	856	599	1,018	4,584	454,956	96,274
2064	60	0	0	11,755,543	8,228,880	790	553	939	4,232	419,977	88,872
2065	61	0	0	10,851,734	7,596,214	729	510	867	3,907	387,688	82,039
2066	62	0	0	10,017,413	7,012,189	673	471	800	3,606	357,881	75,732
2067	63	0	0	9,247,239	6,473,067	621	435	739	3,329	330,366	69,909
2068	64	0	0	8,536,277	5,975,394	573	401	682	3,073	304,966	64,534
2069	65	0	0	7,879,977	5,515,984	529	371	630	2,837	281,519	59,573
2070	66	0	0	7,274,135	5,091,894	489	342	581	2,619	259,875	54,992
2071	67	0	0	6,714,873	4,700,411	451	316	537	2,417	239,895	50,764
2072	68	0	0	6,198,609	4,339,026	416	291	495	2,231	221,451	46,861
2073	69	0	0	5,722,038	4,005,426	384	269	457	2,060	204,425	43,259
2074	70	0	0	5,282,107	3,697,475	355	248	422	1,902	188,708	39,933
2075	71	0	0	4,875,999	3,413,199	328	229	390	1,755	174,199	36,863
2076	72	0	0	4,501,114	3,150,780	302	212	360	1,620	160,806	34,028
2077	73	0	0	4,155,052	2,908,536	279	195	332	1,496	148,443	31,412
2078	74	0	0	3,835,597	2,684,918	258	180	306	1,381	137,030	28,997
2079	75	0	0	3,540,702	2,478,491	238	167	283	1,275	126,495	26,768
2080	76	0	0	3,268,480	2,287,936	220	154	261	1,177	116,769	24,710
Total:		8,008,946	8,008,946	4,460,887,055	3,122,620,939	299,684	209,779	356,464	1,605,919	159,369,048	33,724,306
Peak:		389,013	389,013	164,732,832	115,312,982	11,067	7,747	13,164	59,304	5,885,223	1,245,380

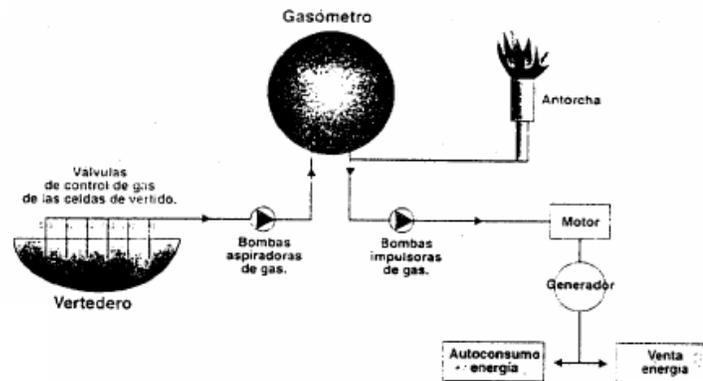
## Anexo D: Sistema de Recolección de gas de Vertedero (GRS)

Es necesario tener una comprensión básica de la naturaleza y operación de los sistemas de recolección de GRS para conocer mejor los elementos fundamentales que conforman un proyecto de GRS y los factores de riesgo inherentes al manejo del gas como recurso. Un sistema típico de recolección de GRS está constituido de los siguientes componentes:

- Campo de recolección del GRS (pozos y canales);
- Tubería de recolección (laterales, secundarias, principales, etc.);
- Sistema de retiro y disposición de condensados;
- Sistema de soplado y accesorios relacionados; y
- Combustión del GRS.

La implementación de estos componentes como estrategia de manejo del GRS tiene un gran potencial de generar ingresos por la creación de créditos de reducción de emisiones de GHG a través del desarrollo del mercado internacional de carbono.

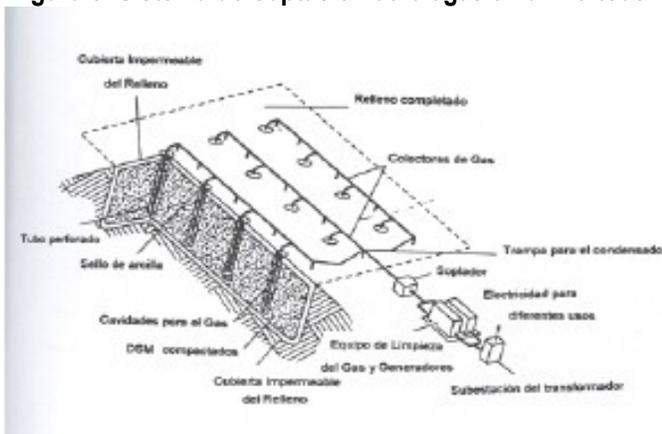
Figura 7: Sistema básico de captación y conducción de Biogás.



### Campo de Recolección de GRS

Este campo consta de una red vertical de pozos de extracción y/o de zanjas o canales de recolección del GRS, los cuales se instala dentro de la masa de residuos. El principio básico de operación es bastante simple, pues solo requiere aplicar una succión para extraer los gases de la masa de residuo hasta un nivel cercano a la tasa a la cual el gas va a ser generado dentro del área de influencia del pozo o canal.

**Figura 8: Sistema de Captación de biogás en un vertedero.**



Fuente: Transforma. Regulación eléctrica: avances y tendencias. Año 2 número 4 mayo de 2003. COMISION REGULADORA DE ENERGIA. CRE. Unidad de reestructuración eléctrica. <<http://www.cre.gov.mx>>

El objetivo ideal es establecer un gradiente neutro de presión/succión continuamente sobre toda la superficie del relleno. Puesto que la condición ideal no puede lograrse a costos razonables, es importante hacer un balance del costo-beneficio entre la opción de instalar pozos adicionales en una red más apretada junto con un sistema de tapones complementario y el valor inherente a la recuperación del combustible como recurso.

El costo de incrementar la extracción del GRS hasta aproximadamente 75 por ciento del gas que es generado es prácticamente lineal. Sin embargo, para lograr altas eficiencias de recuperación se puede utilizar una red de pozos/canales de extracción bien apretada y/o un sistema de cobertura sintético, aunque esta opción implica un mayor incremento en el costo de capital con relación a la ganancia que se obtiene en la recuperación del gas.

Los pozos verticales son típicamente instalados en el relleno una vez se han finalizado las operaciones, y así mismo, ofrecen las siguientes ventajas:

- mejora el control de las emisiones de gases;
- el campo de pozos puede ser ampliado en cualquier momento en función de la variabilidad de las condiciones en el relleno; y,
- se minimiza la recolección de condensados.

Para maximizar la eficiencia de la recolección, los pozos deben ubicarse teniendo en cuenta la profundidad del residuo, su edad y la configuración geométrica del sitio. Cuando existe incertidumbre respecto a la migración subterránea del GRS, los pozos ubicados cerca de los límites exteriores del residuo deben agruparse más de tal forma que actúen como un sistema de control de migración.

A continuación se presentan algunas de las reglas generales para la instalación de pozos verticales de extracción:

- mantener un mínimo de 3 a 6 m de espesor de masa de residuos sobre las perforaciones del pozo para minimizar la entrada de aire al sistema de recolección;
- la profundidad desde la superficie a las perforaciones debe incrementarse en los pozos ubicados cerca de las pendientes laterales; y
- la instalación de pozos a lo largo de las pendientes laterales más inclinadas (4:1) es limitada cuando se usa equipo de perforación convencional.

Las condiciones pueden no ser totalmente idénticas en cada relleno, sin embargo las anteriores reglas son una buena guía para asegurar un correcto funcionamiento el sistema de recolección y para minimizar la entrada de aire hacia el sistema de antorcha o la planta de GEGRS.

Los canales horizontales de recolección del GRS son normalmente utilizados cuando el sitio aún está activo. A continuación de la colocación y compactación de una capa de residuo, se instalan tuberías de recolección perforadas que luego son cubiertas con otra capa de residuo. Esto permite que el gas sea recolectado desde el residuo ubicado directamente debajo de la zona donde se está llevando a cabo la disposición. Debido a que esta técnica puede controlar las emisiones del GRS solo en áreas activas del sitio, los canales horizontales de recolección no son generalmente muy confiables para el control localizado de gases.

En general, los principios de operación de los pozos verticales y canales horizontales son los mismos. Ambos tipos de recolección deben ser equipados con secciones telescópicas de tubería no perforada para permitir un asentamiento normal del residuo, el cual ocurre tiempo después. Se ha encontrado que cuando se utiliza un equipo económico de extracción una succión entre 10 y 15 pulgadas de columna de agua en el cabezal del pozo o canal, es suficiente para maximizar zonas de influencia y minimizar la entrada de aire dentro del residuo. El radio de la zona de influencia con este vacío oscila entre 20m y 100m, dependiendo de la heterogeneidad y otras características asociadas del residuo.

El sistema de recolección del GRS debe ser utilizado conjuntamente con unas buenas prácticas de manejo de los lixiviados. Los lixiviados que se acumulan dentro del residuo pueden afectar considerablemente la tasa de recuperación del gas debido a que el líquido en los pozos y canales limita su capacidad de recolección y transporte. En sitios extremadamente húmedos, la recuperación efectiva del gas puede caer hasta niveles de menos del 50% con respecto a la cantidad de GRS que se estima hay disponible.

## Anexo E: Proceso de tratamiento de residuos animales

Cuenta con 1 línea de trituración y 2 digestores, con una capacidad para procesar 50 toneladas al día de producto crudo y de producir 15 toneladas de harinas que se mezclan posteriormente con el CDR (combustible derivado de residuo) hasta un 2% del PCI.

El proceso, dispone de una caldera mixta (un quemador de gas y grasa animal) con una capacidad de 5 toneladas de vapor/hora. Además, las salidas de vapor poseen las condiciones necesarias para su utilización en la limpieza de las áreas de trabajo de la planta, consiguiendo de esta manera un grado de desinfección superior al que se lograría con agua caliente, al tiempo que se reduce considerablemente el consumo de agua.

Dentro del proceso se llevan a cabo las siguientes operaciones:

- Recepción de los cadáveres y los MER
- Tratamiento: trituración (hasta obtener un tamaño de partículas menor o igual a 50 mm) y digestión térmica ( $T > 133^{\circ}\text{C}$  durante un tiempo mínimo continuado de 20 minutos y a 3 bar de presión absoluta)
- Separación y almacenamiento de aceites-grasas y producto harinoso
- Las grasas se valorizan energéticamente para la producción de vapor en las calderas y las harinas se mezclan con el CDR (Combustible Derivado de Residuos) hasta un 2% del PCI.

La cámara de refrigeración es capaz de mantener hasta un máximo de 100 toneladas de material a una temperatura máxima de  $2^{\circ}\text{C}$ , con el fin de poder absorber posibles picos de entrada de material a la instalación.

Para evitar en todo lo posible los olores, los gases causantes de los mismos son sometidos a un proceso de desodorización. En un primer lavador vertical la corriente gaseosa es enfriada con agua, quedando retenido el posible polvo y partículas en suspensión. Esta corriente gaseosa pasa a un segundo lavador horizontal de tres etapas y es lavada con agua, hipoclorito sódico y sosa, produciéndose la oxidación, neutralización y decantación de los compuestos generadores de malos olores y partículas en suspensión.

No existe ventilación natural al exterior, ni siquiera en la entrada de la materia prima al proceso, ya que la planta está dotada de una antecámara o cortavientos que engloba el camión completo con el consiguiente

juego automático de puertas. Los suelos del área de proceso de la planta están cubiertos de resina sintética antideslizante y de alta resistencia que permite una impermeabilización total de la zona de trabajo.

La harina que se obtiene supone el 30% del material tratado, el 15% son grasas y el 55% agua, que se condensa, tratándose los condensados como agua residual. La planta dispone de una instalación depuradora físico-químico-biológica con deshidratación de fangos para una capacidad de 75 metros cúbicos diarios. La depuradora trata todas las aguas del proceso y de limpieza de la planta.

### **Tratamiento de residuos animales**

Digestores de 5000 kg/ciclo  
Caldera mixta

**Anexo F: Equipos para cogeneración.**

<b>Nº.</b>	<b>DESCRIPCION DEL EQUIPO</b>	<b>MONTO(\$)</b>	<b>PROCESO</b>
1	Partes para paneles electron. Control de caldera y turbogenerador	1,006,205.1	Caldera 6/turbogene.26 mw
2	Reductores p/ventiladores de tiro inducido caldera 6.	15,150.5	Caldera 6
3	Elementos sobrecalentador, codos, tuberia sin costura, p/caldera.	94,459.3	Caldera 6
4	Cemento refractario, analizador de oxigeno y y cable caldera 6.	91,237.2	Caldera 6
5	Planta desmineralizadora p/agua de relleno	405,454.1	Caldera 6
6	Valvulas p/linea de vapor directo, extrac. Y escape turbogenerador.	19,095.3	Turboge 7.5
7	Sistema de poder interruptor	15,455.0	Caldera 6
8	TRASFORMADOR DE 2,400 A 480 v	16,330.8	Caldera 6
9	Tablero completo desarmado	385,719.1	Caldera 6
10	Variadores de velocidad p/sistema automatico de control de combustion	128,120.8	Caldera 6
11	Transformador westinghouse de 2000 a 2500 kva	22,614.3	Subest.electri.
12	Tablero para turbo 26, torre enfriamiento y caldera 6	394,052.0	Subest.electri.
13	Banco de baterias y cargador para turbog. 26 mw	19,986.3	Turbogene.26 mw
14	Valvulas y equipo para instrumentacion de caldera 6 y turbogenerador	43,133.5	Caldera 6
15	Motores con valvulas p/sopladores de hollin	20,341.9	Caldera 6
16	Toberas p/medicion de flujo y filtros p/agua para caldera y turbogeneradores	17,528.0	Caldera 6
17	Motores electricos para bombas de alimentacion de caldera	5,032.1	Caldera 6
18	Cable electrico p/instalacion de sistema del turbo de 26 mw, calderas y torre enfriamiento	43,252.1	Subest.electri.
19	Una unidad hidraulica con sus equipos y acces. P/alimentadores de bagazo	14,141.8	Caldera 6
20	Cable de cobre p/instalacion de motores	20,978.8	Caldera 6
21	Una torre de enfriamiento desarmada	1,023,006.8	Turbogen. 26 mw
22	Calibrador de relays p/tableros electricos de planta cogeneradoras.	17,282.2	Turbogeneradores

23	Transformador de 26 mw	568,900.6	Subset.electri.
24	Sistema de iluminacion	11,028.8	Toda la planta
25	Empaque para eje de turbina	27,526.5	Turbogen. 26 mw
26	Materiales electricos	27,130.6	Turbogen. 26 mw
27	Valvulas turbogenerador y caldera 6	46,261.0	Caldera 6
28	Valvulas p/caldera 6 y turbogenerador 26 mw	21,819.6	Caldera 6/
29	Instrum. Para proteccion y control, equipos electricos de medicion y control p/turbogenerador	32,961.1	Turboge. 26 mw
30	Transformador de potencia p/subestacion electr. De 7.5 mva 13800/2400 v	60,046.0	Subest.electri.
31	Anclas de metal fundido para fijar ladrillo y cemento refractario a las paredes de calderas	11,695.6	Caldera 2
32	Panel de control y medic. P/disyuntor principal de salida 69 kv, panel de control barra, panel p/control y medicion de transfor.	139,441.0	Subest.electri.
33	Terminales universales p/aluminio, conectores de p/cable de aluminio, conect. P/aluminio y cobre conect. T de aluminio, grapas paralelas de cobre grapas de soporte de barras.	4,677.4	Subest.electri.
34	345 pies de banda de hule	3,864.3	Caldera 6
35	Valvulas	5,726.2	Caldera 1
36	Columnas de acentro de control de motores	26,514.8	Subest.electri.
37	Un panel usado	72,164.2	Subest.electri.
38	Poleas p/conductor de bagazo, trampas y valvulas para calderas	23,437.8	Caldera 6
39	Operadores de damper y transductores electroneumaticos	7,272.0	Caldera 2
40	Aisladores, pararrayos 15.3 mcov y 2.55 mcov, piezas de barra de cobre 1/4"x4"x12" y mat. Elec.	24,450.0	Subest.electri.
41	Transformador electricos y accesorios	167,584.1	Subest.electri.
42	Reductores de velocidad	30,549.7	Caldera 4 reac.
43	Angulares, canales, vigas y lamina p/caldera	23,517.8	Caldera 2
44	Tubos para calderas	23,339.0	Caldera 2
45	Chumacera, carcaza, juegos de sellos, aro sellador p/ventilador de tiro inducido de cald.	8,785.8	Caldera 4 reac.
46	4 interrup. Usados,600 amp ge,3 tanques 69kv	45,525.0	Subest.electric.
47	3 valvulas de control tipo mariposa fisher c.	12,296.8	Caldera 1

48	Partes y accesor. Planta generadoras d/energ.	189,648.5	Turbog.26 mw
49	Partes y accesor. Planta generadoras d/energ.	90,700.0	Turbog.26 mw
50	Partes y accesor. Planta generadoras d/energ.	126,500.0	Turbog.26 mw
51	Unidad hidraulica p/alimentadores de bagazo	19,500.0	Caldera 2
52	Una grua viajera para sala de maquinas de cogene	20,000.0	Turbogeneradores
53	Laminas para piso de caldera	7,500.0	Caldera 2
54	Tuberia de +/-4.5" sin costura norma astha10613	10,495.1	Caldera 2
55	Tuberia p/caldera y economizador de caldera	62,312.4	Caldera 2
56	Material aislante para calderas	19,164.2	Caldera 2
57	Tubos para calentador de aire de caldera 2	26,006.4	Caldera 2
58	Equipo y materiales p/cubrir tuberia de turbo	5,897.7	Calderas 1 y 2
59	Transformador de potencia 1000 kva,13.8 kv	25,530.0	Calderas 1 y 2
60	Transformador p/interperie de aceite rebobinado de 12000 kva	85,601.9	Subest.electric.
61	Motores p/accionamiento de interruptor en panel de control y accesorios par excitatriz	5,820.0	Turbog. 7.5 mw
62	Cable para interconexion subestacion electrica	4,690.4	Subest.electric.
63	Equipo para instrumentacion de caldera	13,215.0	Caldera 2
64	Equipo para instrumentacion de caldera	9,655.2	Caldera 2
65	Partes y accesorios planta generadora	903,754.0	Turbog. 26 mw
66	Motores electri. Para ventiladores de caldera	46,859.0	Caldera 2
67	Estator de generador de corriente y conden. Del turbo.26 mw	1,203,628.1	Turbog. 26 mw
68	Especiadores, tubos de calderas, vueltas para sobrecalentador de caldera	46,859.0	Caldera 2
69	Elementos del superheater	16,900.0	Caldera reac.
70	Tuberia para caldera	6,601.8	Caldera 2
71	Tuberia para caldera	906.2	Caldera 2
72	Valvulas y juntas de expansion p/linea de interconexion vapor directao y extraccion de turbogenerador de 7.5 mw	14,503.8	Turbog.7.5 mw
73	8 planchas de acero firmex original de 3/16"x 73"x96"	4,723.8	Caldera 2
74	Trampas p/linea de vapor directo, linea de extraccion y escape del turbogenerador. Equipo para doblar tubo.	111,270.0	Turbog. 7.5 mw

75	Cemento refractario para caldera	34,018.9	Caldera 2
76	Ejes para ventilador de caldera	10,033.2	Caldera 2
77	Equipo y materiales para cubrir tubería de turbogeneradores	5,897.7	Turbog. 7.5 mw
78	Cable para conexiones varias	24,915.0	Subest.electri.
79	Bombas de corriente directa para lubricación auxiliar de turbogeneradores	14,764.9	Turbogeneradores
80	Equipo para instrumentación para calderas y operadoras de damper	23,588.0	Caldera 2
81	Vigas y columnas p/caldera y edificios de cogener	79,107.6	Caldera 6
82	Equipo de medición y monitoreo de potencia	34,919.1	Subest.electri.
83	Instrumentos para caldera	6,631.0	Caldera reac.
84	Laminas expandidas para parrillas de caldera	17,640.0	Caldera 6
85	Chumaceras p/ventiladores de calderas, valvulas, cheques, trampas y flanges p/purgas de fondo, purga continua, niveles y productos, línea de alimentación de agua y vapor directo de cal.	10,739.0	Caldera 2
86	Elementos sopladores de hollin con su accionamiento para caldera.	21,556.0	Caldera 2
87	Un rotor para turbogenerador	991,550.3	Turbog. 26 mw
88	Valvulas, trampas y flanges para caldera	16,211.3	Caldera 2
89	Tablero de control para entrada a línea de transmisión	14,387.4	Subest.electri.
90	Instrumentos p/protección y control, equipos electricos de medición y control de turbogene.	32,961.1	Turbogens. 7.5 y 26 mw
91	Banco de baterías para turbogeneradores	18,819.0	Turbog. 7.5 mw
92	Tubería y complementos de tub. Para línea de agua de alimentación y vapor directo de caldera.	124,228.0	Caldera 2
93	Repuestos para turbogenerador para sustituir cables de puente y casa de máquinas	18,004.4	Turbog. 26 mw
94	Tubería para caldera 6	117,207.7	Caldera 6
95	Partes de turbogenerador g.e. de 10 kva y estator del generador del turbog. De 10 mw	224,553.9	Turbog. 10 mw
96	Un rotor del generador g.e. de 10 mw	211,348.2	Turbog. 10 mw
97	Repuestos p/turbogeneradores de 5 y 7.5 mw	70,081.0	Turbog. 7.5 mw
98	Vigas p/transformadores, subest. De 69 kv, piso de nivel 10 en la sala de máquinas, laminas para	11,298.4	Turbog. 26 mw

	tuberia de agua de enfriamiento del turbog. 26 mw y chumacera de caldera.		
99	Vigas y columnas para caldera	23,517.8	Caldera 2
100	Dos operadores de damper neumaticos	21,216.0	Caldera 2
101	Rachem cat.hvis-10,hvbt-1r,hvbt-2r	15,819.5	Caldera 2
102	63 ELEMENTOS DE 2 1/2"D.E.×180mw P/CALENTADOR SECUNDARIO.	173,437.0	Caldera 2
103	Repuestos y equipo auxiliar p/turbog.26 mw	132,503.7	Turbog. 26 mw
104	Sellos de valvulas	27,661.0	Turbog.7.5 mw
105	Disco de asiento y cojinetes de empuje para turbogenerador de 5.0 mw	15,551.2	Turbog.7.5 mw
106	Bobina para generador electrico	10,620.8	Turbog. 26 mw
107	6 cajas con 3 motores trifasicos, 1 de 500hp y 2 de 1250 hp.	203,880.0	Caldera 2
108	Instrumentacion para turbogene. De 26 mw	36,544.0	Turbog. 26 mw
109	Cemento refractario y anclas p/caldera 6	88,441.6	Caldera 6
110	Materiales y equipo para turbog.26 mw, tableros de 13.8 kv, proteccion de transformadores potenciales de medicion y reles para medicion de en tableros de 13.8 kv.	34,648.9	Turbog. 26 mw
111	Fibra aislante para caldera 6	33,156.7	Caldera 6
112	Un motor de 80 hp y uno de 1250 hp para conductores	62,950.6	Caldera 6
113	Transmisores de nivel del tanque alimentador	10,947.3	Caldera 1
114	Acero estructural (vigas angulares y canales para calderas)	32,683.7	Caldera 1
115	Material aislante para caldera	17,742.3	Caldera 1
116	Operadores de damper marca westinghouse	5,886.0	Caldera 1
117	Motores electricos	23,152.8	Caldera 1
118	Anclas de hierro fundido	5,336.2	Caldera 1
	<b>Total</b>	<b>11,433,493.2</b>	