

*Original study sponsored by Banco Interamericano de Desarrollo*

## **GUÍA PARA LA RECUPERACIÓN DE ENERGÍA Y MATERIALES DE RESIDUOS**

**NICKOLAS J. THEMELIS, MARIA ELENA DIAZ BARRIGA, PAULA ESTEVEZ,  
AND MARIA GAVIOTA VELASCO**

*TRADUCIDO POR ISABEL ERPEL*

*EDITORES, PROF. ALEX GODOY, UNIVERSIDAD DEL DESARROLLO, CHILE*

*FERNANDA PAZ CABANAS, COLUMBIA UNIVERSITY, U.S.A.*

*Producido por*

**COLUMBIA UNIVERSITY  
EARTH ENGINEERING CENTER**



*ENGLISH EDITION: JULY 2013*

*PORTUGUESE EDITION; DECEMBER 2015*

*SPANISH EDITION: SEPTEMBER 2016*

## RESUMEN EJECUTIVO

---

### **Introducción y alcance**

El desarrollo y crecimiento económico de la población urbana en la región de latino america y el caribe (ALC) ha resultado en la generación de una creciente cantidad de residuos sólidos municipales (RSM) los cuales están sobrepasando la capacidad actual de los rellenos sanitarios. Esta situación ha llevado a los gobiernos a evaluar opciones alternativas, tales como reducción de desechos, reciclaje y generación de energía a partir de residuos o waste-to-energy (WTE), para desviar el flujo de residuos a vertederos.

WTE es una tecnología de tratamiento térmico con recuperación de energía, que se ha convertido en una de las opciones preferidas en la mayoría de los países del norte de Europa, Japón, en varias ciudades de los EE.UU., y cada vez más en China. Sin embargo, la alta inversión y costos de operación de esta tecnología, sumado a la falta de información y comunicación con la población respecto a los impactos ambientales de WTR, han impedido su desarrollo en ALC.

El objetivo de este documento es proporcionar una nota de orientación técnica, destinada a proveer información tecnológica, financiera y ambiental básica sobre instalaciones de WTE. Se espera que esta Nota de Orientación permita a los responsables políticos y administradores de servicios de gestión de residuos sólidos en ALC a tomar decisiones informadas acerca de la viabilidad de esta opción de tratamiento para cualquier caso específico. Esta Guía se divide en dos partes: los capítulos 1 a 6 describen los aspectos generales de las tecnologías de WTE y desarrollo de proyectos; los capítulos 7 a 10 presentan estudios de casos de aplicación WTE en la región de ALC.

### **Aspectos técnicos de WTE**

Existen varios enfoques y tecnologías para mejorar las prácticas de tratamiento de residuos sólidos, que van desde la reducción de la generación de residuos mediante un mejor diseño de productos y envases, el reciclaje de materiales utilizables, compostaje de residuos verdes, y la combustión con recuperación de energía. A nivel mundial, más del 80% del post-reciclaje urbano total de RSM se depositan en vertederos (alrededor de mil millones de toneladas por año), y sólo el 20% de estos residuos se dispone en rellenos sanitarios.

Siguiendo la Jerarquía de la Gestión de Desechos, varios de los países más desarrollados han establecido el objetivo de reducir el vertido de residuos sólidos mediante el aumento de prevención de desechos, reciclaje y tasas de recuperación de energía como opciones viables para la gestión de residuos.

El capítulo 1 de esta guía examina los factores que determinan la energía química almacenada en los diferentes constituyentes de los RSM. Plásticos y otros productos petroquímicos consisten principalmente de carbono e hidrógeno, y por lo tanto, tienen el mayor contenido energético. Son seguidos por materiales biogénicos, tales como papel, alimentos y desechos verdes que también constan de carbono e hidrógeno, pero además contienen aproximadamente 50% de oxígeno. Éstos son seguidos por metales y otros compuestos inorgánicos que no tienen energía utilizable. El

contenido de humedad de los RSM absorbe el calor durante la combustión, y por lo tanto disminuye su valor de calentamiento.

El Capítulo 2 describe las tecnologías de combustión que se han desarrollado para recuperar energía de los RSM. En términos generales, involucran la combustión de "RSM tales como se reciben" sobre una parrilla en movimiento ("combustión en parrilla"), la trituración de los RSM y la combustión en una parrilla móvil o en un lecho fluidizado, y el tratamiento mecánico-biológico de RSM.

En el Capítulo 3 se describen los procesos que utilizan la combustión parcial de los RSM para producir un gas de síntesis ("gasificación"), o aumentar la temperatura de residuos petroquímicos en ausencia de oxígeno para producir un combustible líquido ("pirólisis").

El capítulo 4 examina el estado actual de la industria mundial de WTE, incluyendo el número y tipos de plantas que utilizan las diferentes tecnologías de WTE. Alrededor del 80% de la capacidad mundial de WTE se basa en tecnologías de "combustión de parrilla" y esto incluye a las plantas WTE que se ha construido en todo el mundo en la última década. Esto es principalmente debido a la simplicidad de la operación, la alta disponibilidad de planta (por ejemplo, para el número de horas a pleno funcionamiento por año -algunos de los proveedores de hornos de combustión de parrilla garantizan más de 8.000 horas/año), y las relativamente bajas necesidades de personal.

#### **Aspectos ambientales y económicos de la WTE**

El capítulo 5 se centra en la tecnología WTE dominante, es decir, la combustión en una parrilla móvil. El capítulo proporciona información detallada sobre el funcionamiento de una planta de WTE, el balance de materia y energía típica, la energía recuperada por tonelada de DSM, los controles ambientales (sistemas de control de la contaminación del aire utilizados y las emisiones resultantes), y la gestión de las cenizas de fondo y cenizas volantes producidas durante el proceso de combustión.

El Capítulo 5 también discute el capital proyectado, costos, ingresos y las necesidades de tierras para este tipo de instalaciones en funcionamiento. Además, se describe cómo implementar WTE en un municipio, incluyendo: el procedimiento a seguir para invitar a los proveedores de tecnologías WTE a invertir en un nuevo proyecto, los actores involucrados en este proceso, e información para orientar a los funcionarios que están considerando construir una planta de WTE.

El capítulo 6 presenta las conclusiones extraídas de desarrollar esta Guía.

#### **Casos de Estudio**

Sobre la base de algunos supuestos hipotéticos, los Capítulos 7 a 9 evalúan la viabilidad de proyectos específicos de WTE en tres ciudades de ALC: Valparaíso (Chile), Toluca (México) y Buenos Aires (Argentina). Las ciudades se han seleccionado teniendo en cuenta: (i) las economías de escala (considerando que el costo por tonelada de tratamiento térmico disminuye apreciablemente con el tamaño de la planta), y (ii) la capacidad económica de estas ciudades (teniendo en cuenta la alta inversión y los costes operativos de este tipo de tecnología). La tecnología seleccionada para los tres casos es la "combustión de parrilla", ya que es la tecnología de WTE más ampliamente probada. Los casos de estudio muestran qué información debe ser desarrollada con el fin de construir una planta de este tipo, incluyendo la calidad y cantidad de los

RSM, el estado actual y proyectado del sistema de gestión de RSM; los costos operativos y de capital proyectados, las fuentes de ingresos proyectadas, y los cálculos del valor presente neto (VPN) y la tasa interna de retorno (TIR).

La principal conclusión de estos casos de estudio es que teniendo en cuenta las tarifas de rellenos sanitarios en América Latina, por lo general la alternativa de WTE, sólo será económicamente viable si se proporciona el apoyo del gobierno. Por ejemplo, para el proyecto de WTE en Chile, al punto de equilibrio después de operar 20 años y a una TIR del 5%, la tarifa de entrada requerida sería de 38 US \$/ton. Además, se llegó a la conclusión de que para tener una tarifa de entrada asequible para el proyecto de WTE es necesario tener una disponibilidad muy alta de planta. Esto está relacionado con la calidad y cantidad de los RSM proporcionados a la planta; es decir, la solución debe considerar las tasas de recolección y transporte, como de la robustez del sistema de gestión de residuos sólidos en general.

El Capítulo 10 examina la aplicación de WTE en la configuración de isla, mediante la descripción de tres plantas existentes en las islas del Caribe y el Atlántico Norte.

### **Proceso de toma de decisiones**

Esta nota técnica propone que los gobiernos nacionales sitúen a la gestión sostenible de residuos en lo alto de su lista de prioridades de proyectos esenciales de infraestructura, de manera similar a lo que se ha hecho en el pasado con el agua potable, electricidad e infraestructura de tratamiento de aguas residuales. Específicamente, para la alternativa de WTE, un análisis a corto y largo plazo de su impacto en el sistema de gestión de residuos sólidos debe considerar los costos y análisis financiero, la calidad y cantidad de RSM necesario para garantizar el funcionamiento continuo del proyecto, la adición de una fuente de energía renovable, la cantidad de tierra conservada debido a la disminución de residuos depositados en vertederos, y los beneficios de gases de efecto invernadero y ambientales en comparación con otras alternativas de tratamiento y eliminación.

En las dos últimas décadas, la industria de WTE en Europa, América del Norte y Asia han desarrollado tecnologías capaces de alcanzar estándares de emisiones aceptables, representando fuentes viables de energía termoeléctrica. Por el momento, la tecnología de WTE dominante, practicada en más de 600 plantas en más de cuarenta países, es la "combustión de parrilla" de "RSM tales como se reciben" con producción de electricidad y calor. Sin embargo, los procesos alternativos, tales como la combustión de lecho fluido circulante, se están desarrollando y es posible que uno o más de ellos puedan resultar en menores costes de capital por tonelada de RSM procesado, en comparación con la combustión de parrilla de RSM tal y como se reciben. Por lo tanto, las solicitudes de propuestas para construir una planta de WTE deben estar abiertas a todas las tecnologías siempre que cumplan los criterios técnicos y ambientales requeridos.

En el acuerdo contractual para la construcción de un proyecto de WTE deberá incluir el compromiso férreo de la empresa contratista que la planta funcionará a la disponibilidad de la planta especificada (horas por año a pleno rendimiento), entregar a la red la tasa especificada de electricidad producida por tonelada de RSU procesados, y alcanzar continuamente los estándares ambientales especificados. El municipio anfitrión también debe comprometerse por contrato a recopilar y proporcionar a la planta de WTE el volumen específico diario y anual de RSU; y que este material está dentro del rango especificado de valores caloríficos.

A pesar de ser una importante opción de tratamiento, la WTE por lo general no es económicamente viable sin apoyo de gobierno. Sin embargo, conforme las ciudades de ALC se van moviendo de vertederos abiertos a los rellenos sanitarios, el verdadero costo de rellenar se incrementará hasta el punto de que la solución de WTE podría ser económicamente competitiva debido a la recuperación de energía, requerimiento de tierra mucho menor, y otras potenciales ventajas. Por otra parte, las comparaciones económicas desarrolladas en esta guía se basan en un ciclo de vida de una planta de WTE de 20 años, mientras que algunas de las instalaciones de WTE existentes ya han alcanzado su cuadragésimo año y continuarán operando en el futuro previsible. Por lo tanto, la inversión en una planta de WTE representa un patrimonio generado por el municipio para las generaciones futuras.

## **AGRADECIMIENTOS**

---

Los autores agradecen la importante contribución de expertos internacionales que revisaron los primeros borradores de la guía del BID y dieron sugerencias de mejoras: el Sr. Jorgen Haukohl y la Sra. Bettina Kamuk de Ramboll Energy, Dinamarca; los Dres. Johannes Martin y Ralf Koralewska de Martin GmbH, Alemania; el Dr. Atilio Savino de ISWA y ARS, Argentina; el Sr. Anthony Orlando y los ingenieros superiores de Covanta Energy, EE.UU.; al Sr. Antonis Mavropoulos, EPEM-Grecia y D-residuos, para su revisión final del manuscrito para el BID.

Los autores agradecen también al Dr. Horacio Cristian Terraza y su personal en el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) por iniciar este esfuerzo, su minuciosa revisión de la versión final y las muchas recomendaciones útiles para su mejora. Gracias también al Sr. Nathiel Egosi de RRT Diseño e Ingeniería por proporcionar una estimación preliminar del costo de capital y la distribución de planta de una Instalación de Recuperación de Materiales (ver Apéndice 5; y la Sra. Liliana Themelis del CEE por participar y contribuir a todas las visitas de campo.

Los autores también agradecen a las siguientes personas por su importante contribución a los casos de estudio:

**Valparaíso-Chile:** Sr. Esteban Alvez, gerente general de vertedero El Molle de Stericycle (Valparaíso, Chile) y revisor del caso de estudio de Valparaíso.

**Toluca-México:** Sr. Jorge A. Mejía León, gerente del Relleno Sanitario Toluca de RED Ambiente; Sr. Santiago Velasco por facilitar las reuniones y los contactos del equipo de proyecto en Toluca, México.

**Buenos Aires, Argentina:** Sra. Natali Pelcman Ganfer, Master en Earth Resources Engineering, Columbia University por su importante contribución al caso de estudio de Argentina.

Sr. Marcello Rosso, Director de Operaciones de CEAMSE (Argentina) por la revisión y contribuir al caso de estudio de Buenos Aires.

Prof. Marcela Delucca del Instituto de Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Buenos Aires para proporcionar información sobre la generación y composición de los RSU Buenos Aires.

Prof. Ana Corbi para la organización de las reuniones del equipo de proyecto con las autoridades de energía en Buenos Aires.

Sra. Florencia Thomas del CEAMSE (Argentina) para revisar el primer borrador del caso de estudio de Buenos Aires.

## TABLA DE CONTENIDOS

---

<b>Resumen ejecutivo .....</b>	<b>2</b>
<b>agradecimientos .....</b>	<b>5</b>
<b>Tabla de Contenidos .....</b>	<b>6</b>
<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>12</b>
<b>Lista de Tablas .....</b>	<b>15</b>
<b>PRIMERA PARTE.....</b>	<b>19</b>
<b>1. La necesidad de una gestión sostenible de los residuos de los residuos sólidos .....</b>	<b>19</b>
1.1 Estado actual de la gestión global de residuos.....	19
1.2 Introducción a la gestión de residuos sólidos .....	19
1.3 Recuperación de materiales ("reciclaje") y energía ("WTE").....	27
<b>2. Tecnologías de tratamiento térmico.....</b>	<b>29</b>
2.1 Calor químico almacenado en los RSU .....	29
2.2 Efecto de la humedad y materiales inertes en EL valor calorífico de los RSU .....	29
2.3 Combustión en parrilla.....	32
2.4 Combustión de combustible derivado de residuos (RDF).....	34
2.5 Combustión en lecho fluidizado.....	36
2.6 Producción de combustibles secundarios a través de tecnología de Tratamiento Mecánico Biológico (TMB).....	39
<b>3. Tecnologías de gasificación .....</b>	<b>44</b>
3.1 Proceso de fundición directa JFE.....	44
3.2 Proceso Energos de gasificación y combustión de parrilla .....	45
3.3 Proceso de lecho fluidizado Ebara.....	49
3.4 Proceso de gasificación y fusión Thermoselect.....	50
3.5 Proceso WTE asistido por plasma.....	51
3.6 Pirólisis.....	53
3.7 Aplicación de diversos procesos WTE en Japón.....	53
3.8 Comparación preliminar de otras opciones WTE .....	55

<b>4. El estado actual de la tecnología WTE .....</b>	<b>62</b>
<b>5. Planificación y construcción de una planta WTE.....</b>	<b>68</b>
<b>5.1 Aplicabilidad de las plantas WTE .....</b>	<b>68</b>
<b>5.2 Selección del tamaño del horno y planta WTE .....</b>	<b>72</b>
<b>5.3 Materiales que pueden ser procesados por la combustión de parrilla.....</b>	<b>72</b>
<b>5.4 Configuración de la instalación WTE .....</b>	<b>75</b>
<b>5.5 Selección del sitio para la planta de WTE .....</b>	<b>76</b>
<b>5.6 Recepción de los residuos de construcción y bunker .....</b>	<b>79</b>
<b>5.7 Cámara de combustión .....</b>	<b>81</b>
<b>5.8 Recuperación de energía .....</b>	<b>82</b>
<b>5.9 Factor de eficiencia térmica R1 de la Unión Europea .....</b>	<b>83</b>
<b>5.10 Control de emisiones de las plantas WTE .....</b>	<b>83</b>
<b>5.10.1 Sistemas de APC (Control de la emisiones a la atmósfera).....</b>	<b>86</b>
<b>5.10.2 Monitoreo de emisiones .....</b>	<b>93</b>
<b>5.11 Ceniza de la planta WTE .....</b>	<b>95</b>
<b>5.12 Balances de energía y masa .....</b>	<b>97</b>
<b>5.13 Economía de WTE .....</b>	<b>98</b>
<b>5.14 Combinación de planes para una nueva WTE con aumento del reciclado .....</b>	<b>101</b>
<b>5.15 Normas de emisión .....</b>	<b>103</b>
<b>5.16 Personal complementario para planta WTE de tamaño medio de tres líneas .....</b>	<b>103</b>
<b>5.17 Costos de capital y de operación.....</b>	<b>104</b>
<b>5.18 Ingresos .....</b>	<b>105</b>
<b>5.19 Partes principales de una planta WTE .....</b>	<b>106</b>
<b>5.20 Proveedores de instalaciones WTE .....</b>	<b>106</b>
<b>5.21 Modelos de negocio utilizados en relación con la propiedad de una planta de WTE durante un periodo a plazo (normalmente de 20 años) .....</b>	<b>106</b>
<b>5.22 Ciclo del proyecto.....</b>	<b>107</b>
<b>5.23 Proceso de adquisición.....</b>	<b>107</b>
<b>5.24 Uso de Consultor independiente y monitor del proceso de adquisición .....</b>	<b>108</b>
<b>5.25 Obligaciones contractuales del contratista general y del Municipio.....</b>	<b>108</b>

5.26 Cronograma típico para la terminación del proyecto .....	109
5.27 Problemas regulatorios, sociales y otros .....	110
5.28 Riesgos y efectos positivos relacionados con la implementación de WTE .....	112
5.29 Proyectos WTE en la región de América Latina y el Caribe .....	113
<b>6. Uso de Papel y Plásticos de RSU en la Producción de Cemento .....</b>	<b>118</b>
6.1 El proceso de producción de cemento .....	118
6.2 Combustibles utilizados en la producción de cemento .....	120
6.2.1 Combustibles alternativos derivados de residuos sólidos municipales .....	120
6.3 Poder Calorífico Superior (HHV) y el carbono biogénico de Balcones EF .....	121
6.4 Estudio de las emisiones de dioxinas cuando hay co-combustión de EF/RDF .....	123
6.5 Efecto del uso de EF/RDF en las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de la producción de cemento .....	123
6.6 Conclusiones de uso de AF y EF en la producción de cemento .....	125
<b>7. Conclusiones de la guía .....</b>	<b>128</b>
<b>Apéndices de la parte 1 .....</b>	<b>129</b>
Apéndice 1: Lista de proveedores de WTE .....	129
Apéndice 2: Costos de capital reportados de algunas plantas WTE .....	131
Apéndice 3: Plantas WTE que operan en el mundo .....	132
<b>Bibliografía de la Parte 1 .....</b>	<b>133</b>
<b>Referencias adicionales a la Parte 1 de la Guía .....</b>	<b>135</b>
<b>SEGUNDA PARTE .....</b>	<b>139</b>
<b>8. Estudio de caso 1: Valparaíso, Chile.....</b>	<b>139</b>
8.1 Datos del país.....	139
8.2 Gestión de Residuos en Chile .....	139
8.3 Razones para la selección de la región de Valparaíso para el estudio de caso de Chile	140
8.4 Visión general de Valparaíso .....	140
8.5 Gestión de residuos en la Región de Valparaíso .....	141
8.6 Disposición actual de los RSU en la Región de Valparaíso .....	143
8.7 Tarifas aplicadas .....	145



8.8 Capacidad propuesta y potencial de generación de energía .....	145
8.9 Sitio seleccionado para la planta WTE .....	146
8.10 Límites de emisión proyectados.....	147
8.11 Proyección de costos de la planta WTE .....	148
8.12 Proyección de ingresos de la planta WTE .....	150
8.13 Análisis financiero de WTE para el área de Valparaiso .....	152
8.14 Partes interesadas .....	154
8.15 Conclusiones del estudio de caso de Chile .....	154
<b>Apéndices del Estudio de caso de Chile .....</b>	<b>156</b>
<b>Apéndice 1: Marco legal.....</b>	<b>156</b>
1.1. Leyes y reglamentos relacionados con la gestión de residuos .....	157
1.2. Leyes y reglamentos relacionados a energía.....	157
<b>Apéndice 2 al Estudio de caso de Chile: Los posibles interesados .....</b>	<b>159</b>
<b>Referencias al estudio de caso de Chile .....</b>	<b>161</b>
<b>9. Estudio de caso 2: Toluca, México .....</b>	<b>163</b>
9.1 Datos del país.....	163
9.2 Gestión de Residuos en México.....	163
9.3 Otra información de antecedentes pertinente .....	164
9.4 Razones para seleccionar el Municipio de Toluca para el Estudio de Caso de México	164
9.5 Información general del Toluca.....	165
9.6 Gestión de residuos en Toluca .....	165
9.7 Disposición actual de los RSU en Toluca .....	168
9.8 Capacidad propuesta y potencial de generación de energía .....	171
9.9 Sitio seleccionado para la planta de WTE .....	172
9.10 Límite de las emisiones proyectadas .....	173
9.11 Proyección de costos de la planta WTE .....	174
9.12 Ingresos proyectados de la planta WTE .....	176
9.13 Análisis financiero de WTE para Toluca.....	179
9.14 Partes interesadas .....	180
9.15 Conclusiones al Estudio de Caso de México .....	182

<b>Apéndices del estudio de caso de México.....</b>	<b>183</b>
<b>Apéndice 1: marco legal .....</b>	<b>183</b>
1.1 Leyes y reglamentos relativos a la gestión de residuos.....	183
1.2 Leyes y reglamentos relativos a la generación de electricidad .....	186
<b>Apéndice 2 del estudio de caso de México: Bancos de desarrollo.....</b>	<b>186</b>
<b>Apéndice 3 del estudio de caso de México: Los posibles interesados .....</b>	<b>188</b>
<b>Referencias al estudio de caso de México .....</b>	<b>191</b>
<b>10. Estudio de caso 3: Buenos Aires, Argentina.....</b>	<b>193</b>
<b>10.1 Datos del país.....</b>	<b>193</b>
<b>10.2 Gestión de residuos en Argentina.....</b>	<b>193</b>
<b>10.3 Razones para seleccionar el Área Metropolitana de Buenos Aires para el Estudio de Caso de Argentina.....</b>	<b>195</b>
<b>10.4 Información general del Área Metropolitana de Buenos Aires.....</b>	<b>195</b>
<b>10.5 Gestión de residuos en el Área Metropolitana de Buenos Aires.....</b>	<b>197</b>
<b>10.5.1 Gestión de Residuos Sólidos en la Ciudad de Buenos Aires.....</b>	<b>198</b>
10.5.1.1 "Generación" de RSU en la Ciudad de Buenos Aires.....	198
10.5.1.2 Caracterización de RSU de Buenos Aires.....	198
10.5.1.3 Reciclaje.....	199
10.5.1.4 Recolección .....	200
10.5.1.5 Estaciones de transferencia de residuos (WTS).....	201
<b>10.5.2 Gestión de Residuos Sólidos en el Gran Buenos Aires.....</b>	<b>204</b>
10.5.2.1 Compostaje.....	204
10.5.2.2 Depósito en vertederos.....	204
<b>10.6 Tarifa aplicada .....</b>	<b>205</b>
<b>10.7 Capacidad proyectada y potencial de generación de energía de la planta WTE.....</b>	<b>205</b>
<b>10.8 Sitio seleccionado para la planta WTE .....</b>	<b>206</b>
<b>10.9 Costos proyectados de la planta WTE .....</b>	<b>207</b>
<b>10.10 Ingresos proyectados de la planta WTE .....</b>	<b>209</b>
<b>10.11 Análisis financiero de WTE para Buenos Aires.....</b>	<b>210</b>
<b>10.12 Conclusiones al Estudio de caso de Buenos Aires .....</b>	<b>212</b>

<b>Apéndices del Estudio de caso de Argentina.....</b>	<b>212</b>
<b>Apéndice 1: Marco legal.....</b>	<b>212</b>
<b>Apéndice 2: Encuesta de Gestión de residuos en Buenos Aires.....</b>	<b>213</b>
<b>Referencias al Estudio de Caso de Argentina .....</b>	<b>221</b>
<b>11. Aplicación de WTE en Islas.....</b>	<b>222</b>
<b>11.1 Introducción .....</b>	<b>222</b>
<b>11.2 Bermudas .....</b>	<b>223</b>
<b>11.3 Martinica .....</b>	<b>226</b>
<b>11.4 St. Barth .....</b>	<b>228</b>
<b>11.5 Jamaica .....</b>	<b>230</b>
<b>11.6 Conclusiones de la aplicación de WTE en las islas .....</b>	<b>233</b>
<b>Referencias a la aplicación de WTE en islas .....</b>	<b>235</b>

## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 1 Gestión integrada sostenible de los residuos.....	25
Figura 2 Jerarquía de la gestión de residuos.....	27
Figura 3 Escalera de gestión sostenible de residuos mediante la recuperación de materiales y energía a partir de RSM <sup>8,9</sup> .....	29
Figura 4 Efecto de los componentes y la humedad en el poder calorífico de los RSU <sup>11</sup> .....	30
Figura 5 Variación del valor calorífico de los RSU a plants Europea WTE <sup>12</sup> .....	31
Figura 6 Partes de una instalación de combustión de parrilla (WTE Koralewska, R., Martin GmbH, presentación en WTERT Bi-anual reunión de octubre del 2006).....	33
Figura 7 Entradas de materia y energía y salidas en una planta WTE (dibujo esquemático EEC) .....	34
Figura 8 Diagrama esquemático de la unidad de combustión SEMASS (figura EEC).....	35
Figura 9 Cambio en el comportamiento del lecho de sólidos con el aumento del flujo de gas y la caída de presión a través del lecho (F. Neubacher, tecnología de lecho fluidizado WTE, ESST (Springer) p.11853) .....	37
Figura 10 Reactor de lecho fluido Neumuenster quemando RDF.....	38
Figura 11 Lecho fluido circulante (CFB) de la Universidad de Zhejiang, WTE .....	38
Figura 12 Ejemplo de lecho fluido burbujeante .....	39
Figura 13 Diagrama del proceso TMB.....	40
Figura 14 producción de CSR por el proceso de TMB en Europa, 2008 (en miles de toneladas).....	41

Figura 15 Costes de producción y la utilización de una tonelada de csr, 2006 <sup>18</sup> .....	42
Figura 16 Diagrama de flujo simplificado y balance de masa de la planta Nehlsen de biosecado tmB en Stralsund, Alemania <sup>17</sup> .....	43
Figura 17 El proceso de fundición directa JFE.....	45
Figura 18 Unidades de combustion y gasificador de energos <sup>20,21</sup> .....	46
Figura 19 Unidades de recuperación de calor y control de contaminación atmosférica del ENERGOS.....	47
Figura 20 Proceso de gasificación de lecho fluido Ebara.....	50
Figura 21 El proceso de gasificación Thermostelect.....	51
Figura 22 La antorcha de plasma Europlasma.....	51
Figura 23 El reactor Europlasma para la destrucción de materiales que contienen amianto	52
Figura 24 El gasificador de plasma Alter NRG <sup>29</sup> .....	53
Figura 25 Número de plantas vs capacidad de la planta en Europa (ISWA, datos de 2004) (EEC).....	66
Figura 26 Correlación entre PIB/año y la aplicación de la incineración de residuos (EEc).69	
Figura 27 Correlación entre el PIB/cápita y la aplicación de la incineración de residuos (EEc).....	69
Figura 28 Las economías de escala para la incineración de residuos (EEC) .....	70
Figura 29 Vista en alzado de un diseño planta WTE de parrilla de combustión (EEC) .....	78
Figura 30 Plan de sitio para planta de dos líneas x 960 toneladas/día (EEC) .....	79
Figura 31 Cámara de combustión WTE con parrilla móvil (Kozłowska, R., Martin GMBH, Presentación bi-anual WTERT, octubre de 2006).....	81
Figura 32 Emisiones de dióxido de carbono (toneladas métricas de CO <sub>2</sub> /MWh) de diversas fuentes de energía .....	85
Figura 33 Emisiones de dióxido de azufre (g/kWh) de diversas fuentes de energía <sup>34</sup> .....	86
Figura 34 Emisiones de óxido de nitrógeno (g/kWh) de diversas fuentes de energía <sup>34</sup> .....	86
Figura 35 Sección transversal de un filtro de mangas .....	91
Figura 36 Bloques de hormigón a base de cenizas WTE utilizados para protección de la costa y la recuperación de tierras.....	96
Figura 37 Costos de inversión de capital WTE (EEC).....	99
GUÍA PARA LA RECUPERACIÓN DE ENERGÍA Y MATERIALES DE RESIDUOS	13

Figura 38 Costos operativos WTE (EEC) .....	99
Figura 39 Flujo de materiales dentro y fuera de una planta WTE (EEC) .....	102
Figura 40 Partes interesadas en WTE.....	112
Figura 41 Diagrama de flujo del proceso de cemento (Zhang) .....	120
Figura 42 Fotografía de muestras de pellet y “fluff” de Balcones .....	122
Figura 43 Efecto estimado de reemplazar Carbón por EF en la producción de una tonelada métrica de clinker .....	124
Figura 44 Efecto estimado de reemplazar carbón por EF en la producción de una tonelada métrica de clinker, excluyendo la emisiones evitadas de GEI de vertido de EF .....	125
Figura 45 Localización de la Región de Valparaíso en Chile (EEC) .....	141
Figura 46 Área geográfica del estudio de caso de Valparaíso (EEC) .....	142
Figura 47 Foto aérea del vertedero El Molle (EEC).....	146
Figura 48 Distribución de generación de RSU en México (2008) (EEC) .....	164
Figura 49 Ubicaciones geográficas de Toluca y Ciudad de México (EEC).....	165
Figura 50 Composición de RSU en Toluca en 2009. (EEC) .....	166
Figura 51 Proyección de Generación de RSU en Toluca: 2009 - 2015 (EEC) .....	167
Figura 52 Proyección de la composición de los RSU en Toluca en 2015 (EEC).....	167
Figura 53 Localización de los dos rellenos sanitarios de Toluca y vertederos no regulados (EEC) .....	170
Figura 54 Mapa de Toluca mostrando sitio potencial para la planta WTE de Toluca (EEC) .....	172
Figura 55 Área de San Antonio la Isla que muestra la tierra adicional que rodea al relleno sanitario (EEC) .....	173
Figura 56 La Ciudad de Buenos Aires y sus 48 barrios (EEC) .....	196
Figura 57 La Ciudad de Buenos Aires y Gran Buenos Aires (en azul) (EEC).....	197
Figura 58 Tasas de generación de RSU en la Ciudad de Buenos Aires (EEC) .....	198
Figura 59 Rutas de recolección de residuos sólidos urbanos en la Ciudad de Buenos Aires (CEE) .....	201
Figura 60 División actual de la ciudad en seis zonas y ubicación de las tres estaciones de transferencia (EEC) .....	202

Figura 61 Mapa que muestra el relleno sanitario aCCESO Norte III y las tres estaciones de transferencia que sirven a la Ciudad de Buenos Aires (EEc).....	203
Figura 62 Rutas de recolección en la Ciudad de Buenos Aires (EEC).....	204
Figura 63 Coordenadas del vertedero Acceso Norte III (EEC).....	207
Figura 64 Composición de los RSU de las Bermudas (2000) (EEC).....	224
Figura 65 Instalación Tynes Bay de tratamiento de residuos (EEC).....	224
Figura 66 Fuentes de residuos en Martinica (EEC).....	226
Figura 67 La planta WTE Martinica (CEE).....	227
Figura 68 Planta WTE de St. Barth (EEC).....	229
Figura 69 Fuentes de residuos en St. Barth (2009) (CEE).....	230
Figura 70 Caracterización de los residuos de Jamaica (EEC).....	231
Figura 71 Wastesheds de Jamaica (CEE).....	232

## LISTA DE TABLAS

---

Tabla 1 Emisiones de la planta de Averoy (al 11% de oxígeno) <sup>21</sup> .....	47
Tabla 2 Parámetros de funcionamiento de PLANTAS Energos <sup>20,22,25</sup> .....	48
Tabla 3 Tecnologías de tratamiento térmico utilizadas en Japón.....	54
Tabla 4 Análisis FODA para las alternativas de TECNOLOGÍAS WTE.....	56
Tabla 5 Materia prima, producto de energía, y capacidad total de las tecnologías WTE existentes.....	62
Tabla 6 Hornos WTE construidos desde el año 2000 utilizando las tecnologías de combustión de parrilla Martin.....	63
Tabla 7 Co-combustión de desechos médicos en Europa (ISWA, 2004).....	73
Tabla 8 Co-combustión de lodos de aguas residuales en Europa (ISWA, 2004).....	74
Tabla 9 Ejemplos de requisitos de área del terreno.....	77
Tabla 10 Efecto de la aplicación de MACT por la industria de wte en EE.UU. ....	84
Tabla 11 Sistemas principales de APC en plantas WTE.....	86
Tabla 12 Balance de Energía.....	97
GUÍA PARA LA RECUPERACIÓN DE ENERGÍA Y MATERIALES DE RESIDUOS	15

Tabla 13 Balance de Masa.....	98
Tabla 14 Proyectos MDL registrados y las correspondientes RCE.....	101
Tabla 15 Normas de emisión .....	103
Tabla 16 Principales características de ALC .....	115
Tabla 17 Ratios de sustitución de combustibles fósiles por combustibles alternativos (AF) en los países europeos (Aranda et al., 2013) .....	120
Tabla 18 Concentración de C, H y O y HHV medido en cuatro materiales secos .....	122
Tabla 19 Inventario de las fuentes de dioxinas de 2012 de Estados Unidos, en gramos de EQT .....	123
Tabla 20 Lista de Proveedores de WTE .....	129
Tabla 21 costos de capital reportados de algunas plantas WTE.....	131
Tabla 22 Generación de residuos por Municipio.....	142
Tabla 23 Composición de los RSU de Valparaíso y poder calorífico .....	143
Tabla 24 Costos de recolección/transporte y eliminación de diversos municipios en 2010 .....	145
Tabla 25 Comparación de límites WTE con estándares internacionales.....	147
Tabla 26 Estimación de costo de capital .....	148
Tabla 27 Costos de operación.....	149
Tabla 28 Precios al contado (US\$/MWh).....	151
Tabla 29 VAN a tasas de descuento del 5%, 10%, 15% y la TIR para los tres escenarios	153
Tabla 30 Tarifas aplicadas requeridas a tasa de descuento del 5%, 10% y 15%.....	153
Tabla 31 Lista de posibles partes interesadas.....	159
Tabla 32 Composición de los RSU de Toluca (2010) y poder calorífico.....	166
Tabla 33 Datos de funcionamiento de dos rellenos sanitarios que sirven a Toluca (noviembre de 2010).....	171
Tabla 34 Normas de emisión de la NOM-098-SEMARNAT-2002 para instalaciones de incineración en México en comparación con normas de emisión de la U.E. (11% de O <sub>2</sub> , base seca) .....	173
Tabla 35 Estimación de costo de capital .....	174



Tabla 36 Costos de operación.....	175
Tabla 37 Costos de generación de la CFE.....	177
Tabla 38 VAN a tasas de descuento del 5%, 10%, 15%, y la TIR para los tres escenarios .....	179
Tabla 39 Tarifa aplicada requerida para tasas de descuento del 5%, 10%, 15%.....	180
Tabla 40 Partes interesadas involucradas en el desarrollo de una instalación WTE en Toluca, México.....	188
Tabla 41 RSU generados en Argentina en 2004.....	193
Tabla 42 Crecimiento de la población en la Ciudad de Buenos Aires, Gran Buenos Aires y Argentina.....	197
Tabla 43 Composición de los RSU de Buenos Aires (2008) y su valor calorífico.....	198
Tabla 44 Características de los módulos del vertedero Acceso Norte III.....	205
Tabla 45 Estimación de los Costos de capital.....	207
Tabla 46 Gastos de operación.....	208
Tabla 47 Resumen de costos e ingresos.....	210
Tabla 48 VAN a tasas de descuento del 5%, 10%, 15% y la TIR.....	211
Tabla 49 Tarifa aplicada requerida para tasas de descuento del 5%, 10% y 15%.....	211
Tabla 50 Área de islas de miembros prestatarios del BID, población y el PIB.....	222
Tabla 51 Emisiones de chimeneas.....	225
Tabla 52 Emisiones garantizadas.....	228
Tabla 53 Emisiones 2009.....	230
Tabla 54 PIB y generación de residuos per cápita.....	234

---

## INTRODUCCIÓN

---

El rápido desarrollo económico y crecimiento de la población urbana, han dado como resultado la generación de enormes cantidades de residuos sólidos urbanos (RSU) que no pueden, por más tiempo, ser depositadas en vertederos improvisados de antaño. Esto ha llevado a la E.U., EE.UU. y otros países desarrollados a adoptar la llamada "jerarquía de gestión de residuos" que da prioridad a la reducción de residuos, el reciclaje, el compostaje y energía (WTE) por sobre el depósito en rellenos sanitarios. Los rellenos sanitarios protegen aguas superficiales y subterráneas y reducen las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera por lo que son preferibles a los vertederos. Sin embargo, se ha estimado que sólo el 20% de los rellenos globales son sanitarios<sup>1,2</sup>.

La gestión sostenible de residuos es parte integral del desarrollo sostenible, volviéndose cada vez más importante en la agenda del medio ambiente urbano de ciudades y pueblos en la región de América Latina y el Caribe (ALC). Aunque un considerable esfuerzo se ha dirigido para aumentar las tasas de reciclaje; es decir, la recuperación de materiales de los RSU, la experiencia internacional ha demostrado que después que todo el reciclaje ha sido realizado, sigue habiendo una gran fracción de residuos sólidos que debe ser tratada térmicamente para recuperar su contenido energético, también llamado waste-to-energy (WTE), o en ser depositada en vertederos.

Desde 1995, el *Earth Engineering Center* (EEC, "Centro de Ingeniería de la Tierra") de Columbia University ha llevado a cabo numerosos estudios de investigación sobre los aspectos de la gestión de residuos, publicando sus resultados en más de un centenar de tesis y trabajos técnicos. La misión del EEC, y sus organizaciones hermanas en doce naciones, es identificar y ayudar al avance de los medios más adecuados para la gestión de residuos sólidos. Este estudio realizado por el EEC de Columbia University se llevó a cabo a petición del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y está dirigido específicamente para la examinación y descripción de lo último en tecnologías de tratamiento térmico que se pueden utilizar en las ciudades de la región de ALC.

Una amplia gama de empresas del sector privado visitan las autoridades gubernamentales de los países miembros prestatarios del BID, y ofrecen diversas tecnologías novedosas para el tratamiento térmico de los RSU. Sin embargo, estos funcionarios pueden no estar bien informados acerca de los fundamentos de la conversión térmica, las opciones tecnológicas disponibles en el mercado, sus impactos ambientales, y el capital y costos de operación asociados. Por lo tanto, esta Guía tiene el objetivo de otorgar orientación técnica a estos países al momento de evaluar la viabilidad de la implementación de proyectos WTE.

La Guía está organizada en dos partes. La Parte 1 describe la necesidad de una gestión sostenible de residuos, las diversas formas de tratamiento térmico de los RSU, las tecnologías de gasificación, el estado actual de las tecnologías WTE, y directrices para la planificación y construcción de una planta WTE. La segunda parte, Casos de Estudio, presenta tres casos de lo que serían las primeras plantas WTE, en Chile, Argentina y México; y el potencial del uso de conversión de residuos en energía en las islas del Caribe. A propósito, la parte principal de la Guía se separó de los casos de estudio debido a que el material que se presenta en la Parte 1 se puede aplicar a cualquier ciudad, mientras que cada caso se refiere a una ciudad y nación específica y puede diferir de los otros casos de estudio presentados en la Guía.

## PRIMERA PARTE

---

### 1. LA NECESIDAD DE UNA GESTIÓN SOSTENIBLE DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS

---

#### 1.1 ESTADO ACTUAL DE LA GESTIÓN GLOBAL DE RESIDUOS

---

Desde el comienzo de la historia, los seres humanos han generado y dispuesto de residuos sólidos en vertederos improvisados o con fuego. Después de la revolución industrial, cerca del final del siglo 18, la cantidad de bienes utilizados y luego descartados por la gente aumentó tanto que era necesario que las ciudades proporcionaran vertederos e incineradoras para desechar residuos. La gestión de los residuos sólidos urbanos o municipales (RSU) se convirtió en un problema desde mediados del siglo 20, cuando el consumo de bienes, y la correspondiente generación de RSU, se fue multiplicando.

En respuesta, los países más avanzados desarrollaron diversos medios y tecnologías para tratar los desechos sólidos. Estos van desde la reducción de residuos mediante el diseño de productos y envases, al reciclado de materiales utilizables, el compostaje de residuos verdes, combustión con recuperación de energía, comúnmente llamada conversión de residuos en energía (WTE), y el depósito en vertederos sanitarios que evita las emisiones acuosas y gaseosas al medio ambiente. Se ha estimado que post-reciclaje, los RSU mundialmente ascienden a más de 1.200 millones de toneladas, de los cuales 1.000 millones terminan en vertederos y 200 millones son tratados por diferentes tecnologías WTE. Además, sólo el 20% de los residuos sólidos urbanos en vertederos se dispone en rellenos sanitarios que reducen las emisiones gaseosas y acuosas al medioambiente<sup>1,2</sup>.

#### 1.2 INTRODUCCIÓN A LA GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

---

Según Christensen (2011), la gestión de los residuos sólidos es tan antigua como la civilización humana, aunque sólo se considera una disciplina de ingeniería desde aproximadamente un siglo. El cambio de énfasis en la limpieza pública de las ciudades a la gestión de residuos moderna fue impulsado principalmente por la industrialización, que introdujo nuevos materiales y productos químicos, cambiando drásticamente los tipos y composición de los residuos, y por la urbanización que volvió la gestión de residuos en las zonas urbanas una complicada y costosa operación logística.

Los residuos sólidos se pueden clasificar en municipales (residenciales y comerciales), industriales, de construcción y demolición, y otros tipos de residuos. Los residuos sólidos urbanos (RSU) son el material más heterogéneo en la tierra, ya que incluyen los restos de casi todos los materiales utilizados por la humanidad: Alimentos y otros recursos naturales orgánicos, papeles, plásticos, telas, cuero, metales, vidrio, etc.

Es importante darse cuenta de que varios sistemas están tratando con desechos o elementos que podrían convertirse en residuos.

Seis sistemas diferentes pueden ser convenientemente identificados:

- Tratamiento de residuos en-casa: ‘Desecho’ puede utilizarse en la localidad o en una simbiosis industrial; este último ocurre cuando una industria utiliza directamente "residuos" de otra industria como recurso en su producción. Por ejemplo virutas de madera de baja calidad podrían utilizarse para la generación interna de energía en un hogar. En principio esto no es un "residuo" de acuerdo con nuestra definición, pero el tratamiento de residuos en-casa podría ser una iniciativa importante en la promoción de la minimización o prevención de residuos, como se discutirá más adelante.
- Tirar basura/manejo de residuos: tirar basura en términos de los residuos desechados en el campo, a lo largo de las líneas de transporte o en las zonas públicas se encuentra en todas partes, aunque en una escala variable. Tirar basura es por lo general en forma de envases y periódicos, pero también desechos de frecuencia variable (por ejemplo, los residuos de la construcción y renovación de productos de línea blanca) pueden aparecer ‘botados’ en el campo o en zonas abandonadas. Tirar basura y desperdicios arrojados demandarán en el futuro la limpieza pública de las zonas afectadas y por lo tanto pueden convertirse en una parte del sistema de gestión de residuos público.
- Sistema de retorno: los productos usados pueden ser devueltos a la tienda donde se compraron o a una tienda similar en función de la estructura de negocio. Botellas de bebidas retornables y latas con un depósito son comunes. La recuperación del depósito es el incentivo económico para el consumidor para devolver los artículos. También pueden existir sistemas de retorno sin depósitos como parte de acuerdos voluntarios entre las autoridades ambientales y las cadenas comerciales, como un elemento en el perfil ambiental de una rama o como parte de la responsabilidad del productor legalmente impuesto. Tales sistemas podrían implicar, por ejemplo pilas, medicamentos, neumáticos para automóviles y equipos electrónicos.
- Sistema de gestión de residuos municipales (públicos o privados): Manejo organizado de los residuos municipales suelen ser un asunto público, aunque muchos de los elementos del sistema pueden ser de propiedad y operación privada. Los residuos municipales son el desperdicio que se genera por los ciudadanos y obras civiles y desperdicios similares de pequeñas empresas e industrias. El público es la autoridad gobernante.
- Sistema de Gestión de residuos industriales: El término residuo industrial se utiliza para los residuos de origen industrial que se encuentran en composiciones particulares de gran cantidad o en cantidades más pequeñas pero peligrosas. Estos últimos, generalmente se manejan en el sistema de gestión de residuos peligrosos. Los residuos industriales se tratan a menudo caso por caso, ya que las grandes cantidades y características especiales determinan las formas de disposición. Los sistemas para la gestión de los residuos en una industria pueden ser una parte integrada de la aprobación ambiental o concesión de licencias de la industria de las autoridades.
- Sistema de gestión de residuos peligrosos: La naturaleza de los residuos peligrosos exige formas especiales y reglas en la recogida, almacenamiento y transporte de los residuos. También las instalaciones de tratamiento y eliminación tienen características especiales y reglamentos. Esto normalmente conduce a un mayor costo por tonelada que el costo común para los residuos sólidos municipales.

### ***Criterios de Gestión de Residuos***

La visión de Christensen (2011) es que el sistema ideal de gestión de residuos probablemente no existe, pero puede ser útil identificar algunos de los criterios principales que la gestión de los residuos como servicio y obligación pública debe considerar y tratar de equilibrar. Los siguientes criterios debieran ser considerados en todos los planes de gestión de residuos:

- Proporcionar un manejo personalizado y robusto de todos los residuos con un mínimo de esfuerzo para el cliente y el ciudadano.
- Asegurar la carga más baja posible en el medio ambiente en términos de ruido y contaminación del aire, agua y suelo.
- Proporcionar un máximo de recuperación de recursos a partir de los residuos y reducir al mínimo el uso de los recursos en el manejo de residuos.
- Ser una ocupación segura y saludable para los trabajadores ofreciendo un trabajo no monótono y retos alcanzables.
- Proporcionar poco impacto en la ciudad con respecto al tráfico, gases de los vehículos, el ruido, los accidentes de tráfico y el vertido de residuos.
- Incluir las consideraciones estéticas y arquitectónicas en el establecimiento de instalaciones de recogida y tratamiento de residuos.
- Respetar, como mínimo, las leyes, reglamentos y código de buenas prácticas.
- Ser económicamente aceptables y justos.

Estos criterios ideales están parcialmente en conflicto: por ejemplo, el cumplimiento de los criterios ambientales aumenta los costos. Todos los sistemas de manejo de residuos deben identificar qué criterios son los más importantes y luego alcanzar un compromiso aceptable al momento de llevarlos a cabo. No hay relación simple que pueda combinar estos criterios aparentemente contradictorios en una función de un criterio único para ser optimizado, a menos que todos los criterios sean forzados a términos económicos.

### ***La necesidad de una planificación adecuada***

El error más común en el diseño de un sistema de gestión de residuos sólidos es considerarlo sólo como una cuestión técnica, como algo que se refiere a las obras públicas, infraestructura y financiación. Este error normalmente se traduce en planes llenos de tecnicismos, independientes de las condiciones locales y poco realistas. Aún más, da lugar a los planes que ignoran la importancia de las interacciones sociales y el papel específico de la comunicación. En contraste, hay necesidad de una visión multidimensional que abarque todos los aspectos de la gestión de residuos sólidos, específicamente los problemas técnicos, sociales, económicos y políticos.

El PNUMA señala que en todo el mundo, existe una creciente necesidad de soluciones sostenibles y coherentes a los problemas de gestión de residuos sólidos. La gestión de residuos sólidos parece ser más compleja en países en vías de desarrollo y en transición, donde el creciente volumen y el tipo de residuos, como resultado del crecimiento económico, la urbanización y la industrialización, se está convirtiendo en un problema creciente para los gobiernos nacionales y locales, lo que hace más difícil asegurar una gestión sostenible y eficaz.

### ***Tecnologías de Tratamiento de Residuos***

La elección de la tecnología de tratamiento puede desempeñar un papel importante en el cumplimiento de la mayor parte de los criterios anteriores y determina en gran medida el éxito de un sistema de gestión de residuos sólidos. Sin embargo, no existe una tecnología de tratamiento de residuos que se ajuste perfectamente a todas las áreas y a todos los tipos de residuos.

A continuación se presentan brevemente las técnicas más comunes de tratamiento de residuos sólidos.

- **Recuperación de materiales:**

La gestión sostenible de los RSU requiere que se hagan todos los esfuerzos posibles para separar los materiales reciclables, por ejemplo, fibra de papel, metales, y algunos tipos de plásticos y vidrio, de la corriente de los RSU. Los materiales reciclables debieran ser separados en la fuente, es decir, en hogares, empresas e instituciones. El coste del reciclado es luego compartido por los ciudadanos (tiempo y esfuerzo para separar los materiales reciclables) y por los municipios (separar vehículos de recogida y sistemas de procesamiento). La experiencia en muchas comunidades ha demostrado que la colección y procesamiento de flujo único resulta en tasas de reciclaje apreciablemente más altas y más económica que la colección de flujo múltiple. Los materiales reciclables a ser clasificados son especificados por la comunidad en base a los mercados disponibles; en general, metales, papel y cartón y ciertos tipos de plásticos y vidrio son reciclables. Los materiales reciclables recogidos son transportados a una instalación de recuperación de materiales (Material Recovery Facility, MRF) donde se clasifican a cabo, de forma mecánica o manual, entre materiales comercializables y un residuo no utilizable que es arrojados en vertederos o utilizado como combustible en una planta de WTE.

- **Pretratamiento mecánico:**

Es considerado por muchas personas como método de pre-tratamiento, ya que se utiliza generalmente en conjunto con tratamientos de residuos biológico o térmico. Su objetivo es recuperar materiales valiosos a partir de los flujos de residuos, eliminar elementos contaminantes, separar un flujo de residuos en más corrientes o para homogeneizar los residuos con el fin de optimizar otros procesos.

- **Compostaje aeróbico y anaeróbico:**

Desechos de parques y jardines, también llamados desechos "verdes" o "de patio", se pueden separar también en la fuente y compostados aeróbicamente (es decir, en presencia de oxígeno) en hileras abiertas, en montones cubiertos a través del cual se inyecta aire (sistema Gore Cover), o reactores "en vasos". El producto compostado tiene un pequeño valor nutricional y puede ser utilizado como acondicionador del suelo en jardines y parques. La práctica habitual es que los ciudadanos lleven sus desechos verdes a la planta de compostaje y se lleven el producto de compost para su uso en sus jardines. Compostaje de residuos verdes se utiliza ampliamente en los EE.UU., con casi el 50% de estos residuos compostados aeróbicamente<sup>3</sup>. Algunas comunidades también recogen los desechos de alimentos por separado y los abonan en reactores diseñados especialmente para la digestión anaeróbica (DA), es decir, en ausencia de oxígeno, recuperando así un biogás que contiene aproximadamente 50% de metano y una "torta" que, después del curado en aire durante un par de semanas, se utiliza también como acondicionador de suelos<sup>3</sup>. Los desechos de alimentos también pueden ser compostados aeróbicamente en sistemas cerrados que están equipados con bio filtros u otros dispositivos para evitar la emisión de olores desagradables a los alrededores<sup>4</sup>. La recogida y tratamiento de residuos de alimentos es mucho más costoso que para los desechos verdes y se practica en pocas comunidades. Por ejemplo, menos del 3% de los residuos de alimentos que se generan en los EE.UU. se procesan de este modo. Los residuos sólidos que quedan después de la recuperación de materiales y un producto de compost se denominan residuos post-reciclaje. Pueden ser tratados térmicamente para recuperar su contenido de energía química o eliminarse en vertederos, como se discute a continuación.

- **Recuperación de energía:**

La mayoría de los residuos post-reciclaje son compuestos químicos orgánicos hechos de hidrógeno (H) y carbono (C) y se pueden utilizar como combustible. Cuando reaccionan con oxígeno a una temperatura relativamente alta (llamado "combustión"), forman vapor de agua (H<sub>2</sub>O) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y liberan una gran cantidad de energía. Por lo tanto, se puede afirmar que los RSU contienen energía química que, durante la combustión, se transforma en energía térmica. La energía química almacenada en RSU post-reciclaje es típicamente de 10 MJ/kg (Mega Joule por kilogramo) o 2,8 MWh/ton (megavatio-hora por tonelada), aunque hay una amplia variación de este valor. La forma simple, y más común, para la recuperación de la energía almacenada de los RSU es por oxidación completa, es decir, la combustión, en hornos de diseño especial. Sin embargo, hay otras formas de tratamiento térmico, a saber, la oxidación parcial y la formación de un gas sintético ("gasificación"), o el calentamiento de los desechos no reciclados de plástico para convertirlos en aceite sintético ("pirólisis"). En conjunto, todos los métodos de tratamiento térmico para la recuperación de energía o un combustible a partir de residuos sólidos se denominan residuos a energía ("waste-to-energy (WTE)).

- **Tratamiento biomecánico (TBM):**

El TBM es un método relativamente nuevo (desarrollado en la década de 1990) para el tratamiento de residuos sólidos y que básicamente se utiliza para el tratamiento de residuos sin clasificar o residuales (después de algunos materiales reciclables removidos en la fuente). El concepto fue originalmente reducir la cantidad de residuos destinados a vertedero, pero las tecnologías de TBM hoy en día también son vistas como plantas que recuperan combustible, así como fracciones de material. Como el nombre sugiere la tecnología combina las tecnologías de tratamiento mecánico (pantallas, tamices, imanes, etc.) con las tecnologías biológicas (compostaje, digestión anaeróbica).

Dos tecnologías principales se encuentran disponibles: pretratamiento mecánico biológico (MBP), el cual primero elimina una fracción de RDF y luego trata biológicamente los residuos restantes antes de que la mayor parte de éstos sean vertidos, y la estabilización biológica mecánica (MBS), que primero abona los residuos para su secado antes de la extracción de una fracción grande de RDF. Sólo una pequeña fracción se deposita en vertederos. Esta última tecnología también se conoce como biosecado. Dentro de cada una de las dos tecnologías principales, una serie de variaciones está disponible dependiendo de los residuos recibidos y el enrutamiento de la fracción de RDF. (Christensen, 2011)

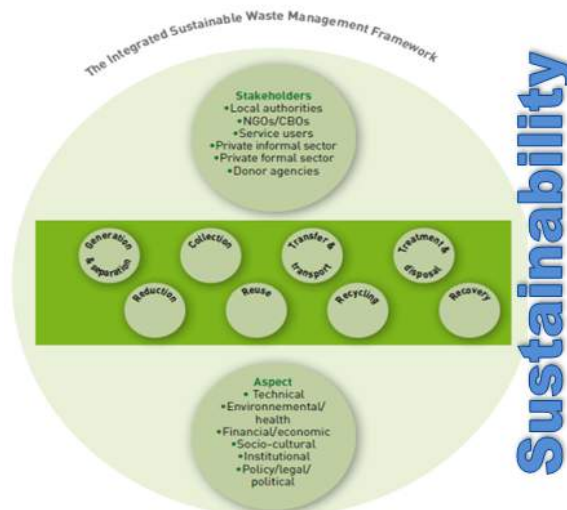
- **El depósito en vertederos:**

Los residuos posteriores al reciclaje que no son tratados térmicamente deben ser depositados en vertederos. Esta es la forma antigua de hacer frente a los residuos sólidos por la humanidad y todavía se utiliza por un estimado de 80% de la población mundial. Hay dos problemas principales asociados con los vertederos tradicionales: las precipitaciones de lluvia y las reacciones bioquímicas dentro de los lixiviados de vertedero que contienen ácidos orgánicos que, si se escapan al medio ambiente, pueden contaminar las aguas superficiales y subterráneas por muchas décadas; También, el biogás generado por estas reacciones contiene hasta un 55% de metano (CH<sub>4</sub>) y aporta aproximadamente el 3% de los gases de efecto invernadero (GEI) que se cree resultan en el cambio climático<sup>5</sup>.

En reconocimiento de esta condición, varios países han puesto en práctica los rellenos sanitarios que están equipados para la recogida y el tratamiento de los efluentes líquidos y para capturar lo más posible del gas de vertedero.

***Gestión Integrada y Sostenible de Residuos (GISRS)***

Klundert y Anschutz consideran que la Gestión Integrada y Sostenible de Residuos es una herramienta dinámica que incluye aspectos que van desde la formulación de políticas y el desarrollo institucional al diseño técnico de soluciones integradas para la manipulación y eliminación de residuos.





## FIGURA 1 GESTIÓN INTEGRADA SOSTENIBLE DE LOS RESIDUOS

El concepto de GISRS difiere mucho del enfoque convencional hacia la gestión de los residuos mediante la búsqueda de participación de los interesados, que abarca la prevención de residuos y recuperación de recursos, incluyendo las interacciones con otros sistemas y promover una integración de diferentes escalas de hábitat (ciudad, barrio, hogar). GISRS no hace frente a la gestión de residuos como una mera cuestión técnica, sino que también reconoce el factor político y social tan importante. (Klundert y Anschutz, 1999).

### ***GISR Dimensiones***

Como se muestra en la Figura 1, el marco GISR de análisis consta de tres dimensiones:

- Las partes interesadas (círculo superior de la Figura 1);
- Los elementos del sistema de residuos físicos, por ejemplo generación, almacenamiento, colección, etc. (caja en la Figura 1); y
- Los aspectos, por ejemplo, técnico, medioambiental, etc. del sistema de gestión de residuos sólidos (círculo inferior en la Figura 1).

Un actor (parte interesada) es una persona u organización que tiene una participación, un interés en - en este caso- la gestión de residuos. Las partes interesadas, por definición, tienen diferentes funciones e intereses en relación con la gestión de residuos; el reto del proceso GISRS es conseguir que se pongan de acuerdo para cooperar con un propósito común, el de mejorar el sistema de residuos.

Los elementos del sistema de residuos se refieren a la forma en que se manejan los residuos sólidos y dónde terminan. En particular, este último tiene importantes implicaciones ambientales y por esta razón un número de ministerios ambientales nacionales han tomado la idea de una jerarquía de gestión de residuos como una directriz política operativa. Las prioridades de gestión de residuos, que se muestran en la Figura 2, son también una piedra angular del enfoque GISRS y dan prioridad a la prevención de residuos, minimización, reciclado y otras formas de recuperación de materiales.

La tercera dimensión de GISRS se refiere a los aspectos de sustentabilidad. Estos aspectos se pueden definir como principios, o lentes, a través del cual el sistema de residuos existente pueda ser evaluado y con el cual un sistema nuevo o ampliado pueda ser planificado (ONU-Hábitat, 2010, Klundert y Anschutz, 2001). Para que el sistema nuevo o el sistema ampliado pueda ser sostenible, debe tener en cuenta todos los aspectos técnicos, ambientales, de salud, económico-financieros, socio-culturales, institucionales, legales y políticos (véase el Cuadro 1).

El orden preferido de prioridad de los diferentes métodos de manejo de desechos se muestra gráficamente en la "Jerarquía de Gestión de Residuos" (Figura 2). Por supuesto, como en cualquier regla, pueden haber excepciones. Por ejemplo, casi el 90% de los plásticos que se generan en los EE.UU. no se reciclan por diversas razones; es mucho más preferible que los plásticos no reciclados (NRP) sean tratados térmicamente en lugar de ser depositados en vertederos. Además, un estudio de Columbia University demostró que la práctica de California (EE.UU.) de utilizar los desechos verdes como tapa todos los días en los rellenos sanitarios, en lugar del suelo, es ambientalmente preferible a rastrear el compostaje de este material<sup>3</sup>. La Jerarquía de la Gestión de Desechos (Figura 2) coloca rellenos sanitarios que utilizan el biogás capturado para producir electricidad por encima de los vertederos que queman el biogás en las erupciones que, al menos, evitan la emisión de metano a la atmósfera.

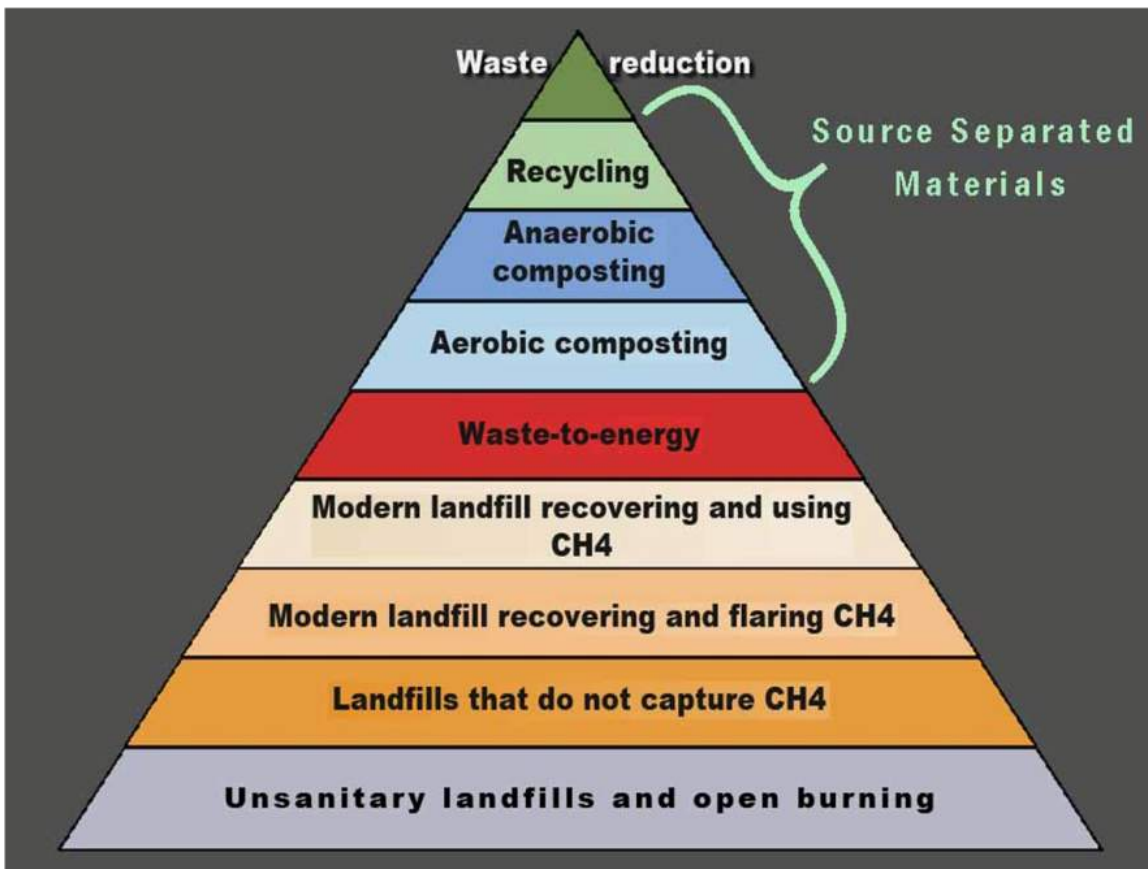


FIGURA 2 JERARQUÍA DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS<sup>6</sup>

**Cuadro 1: Aspectos del sistema de residuos**

Los aspectos técnicos se refieren a la aplicación práctica observable y el mantenimiento de todos los elementos de desecho: qué equipo e instalaciones están en uso o previstas; la forma en que están diseñados; lo que están diseñados para hacer; si trabajan en la práctica; y cuán limpia la ciudad es sobre una base consistente.

Los aspectos ambientales se centran en los efectos de la gestión de residuos en tierra, agua y aire; sobre la necesidad de la conservación de los recursos no renovables; control de la contaminación y problemas de salud pública.

Los aspectos sanitarios tienen que ver con el hecho de que la gestión de residuos está estrechamente relacionada con la protección de la salud humana, ya que su gestión inadecuada, ineficaz o no existente plantea un grave peligro para la sociedad.

Los aspectos económico-financieros pertenecen a la presupuestación y contabilidad de costes en el sistema de gestión de residuos y en relación con la economía local, regional, nacional e internacional. Algunas cuestiones específicas son: la privatización; la recuperación y reducción de costos; el impacto de los servicios ambientales en las actividades económicas; el mercado los productos básicos y cómo las infraestructuras de reciclaje se conectan a él; eficiencia de los sistemas de gestión de residuos sólidos municipales; dimensiones macroeconómicas de uso y conservación de recursos; y la generación de ingresos.

Los aspectos socio-culturales incluyen la influencia de la cultura sobre la generación de residuos y la gestión en los hogares y en las empresas e instituciones; la comunidad y su participación en la gestión de residuos; las relaciones entre los grupos y comunidades, entre las personas de diferentes edades, sexo, origen étnico y las condiciones sociales de los trabajadores de desecho.

Aspectos institucionales se refieren a las estructuras políticas y sociales que controlan e implementan la gestión de residuos: la distribución de funciones y responsabilidades; Las estructuras de organización, procedimientos y métodos implicados; las capacidades institucionales disponibles; y los actores como el sector privado que podrían participar. La planificación es a menudo considerada la principal actividad en relación con los aspectos institucionales y de organización.

Los aspectos de política/jurídicos/políticos abordan las condiciones de contorno en las que existe el sistema de gestión de residuos: establecimiento de metas y prioridades; determinación de funciones y su jurisdicción; el marco legal y normativo existente o previsto; y el proceso de toma de decisiones básico

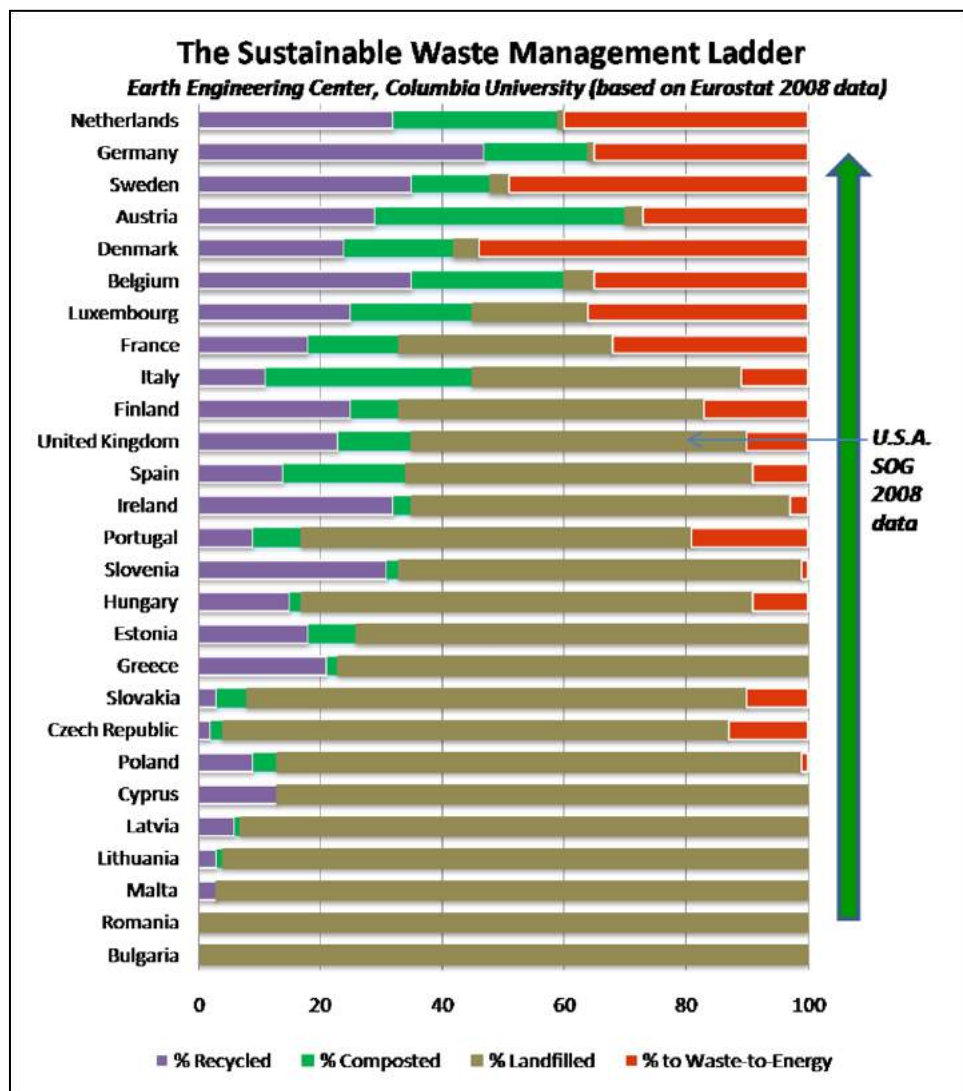
Source: <http://www.greengrowth.org/partners.asp>

### 1.3 RECUPERACIÓN DE MATERIALES ("RECICLAJE") Y ENERGÍA ("WTE")

Como se señaló anteriormente, la gestión sostenible de los RSU requiere que se hagan todos los esfuerzos posibles para separar los materiales reciclables o compostables de la corriente de los RSU. Estos materiales deben ser separados del resto de los RSM en la fuente, es decir, en hogares y negocios, porque una vez que se mezclan con residuos de alimentos, pañales desechables y otros desechos "húmedos", la separación se hace muy difícil y el valor de los materiales reciclables se reduce apreciablemente. Sin embargo, es muy importante que el municipio decida, e informe al

público, en cuanto a los materiales que son negociables; de lo contrario, los desechos "reciclados" terminan en vertederos. Un ejemplo de la falta de mercados para ciertos materiales de desecho es el hecho de que, a pesar de una gran cantidad de esfuerzo por parte de las comunidades y las empresas, sólo el 7% de los residuos plásticos generados en los EE.UU. se reciclan<sup>7</sup>.

Algunas personas creen que una nueva planta de WTE reducirá la tasa de reciclaje en una comunidad. En realidad, lo contrario es cierto: comunidades que están dispuestas a gastar dinero y esfuerzo en el reciclaje pronto se dan cuenta de que hay propiedades de materiales y límites económicos en cuanto a la cantidad de RSU que se puede reciclar. Entonces, buscan el próximo medio disponible para reducir su dependencia de los vertederos: Recuperación de energía y metales por WTE. Este efecto se hace evidente en la "Escala de Gestión Sostenible de Residuos" del EEC que se basa en datos de Eurostat<sup>8</sup> y Columbia/datos de la encuesta BioCycle<sup>9</sup> (Figura 3). Este gráfico muestra claramente que las naciones que han reducido o incluso eliminado el depósito en vertederos, lo han hecho por medio de una combinación de materiales y recuperación de energía.



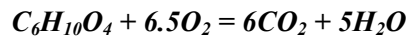
## 2. TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO TÉRMICO

---

### 2.1 CALOR QUÍMICO ALMACENADO EN LOS RSU

---

RSM post-reciclaje que no se depositaron en vertederos pueden ser el combustible de un horno de WTE y, por lo tanto, es necesario conocer su valor calorífico. Utilizando datos de la composición química de un RSU "típico" por Tchobanoglous et al<sup>10</sup>, y los pesos atómicos de los elementos respectivos, Themelis et al<sup>11</sup> demostraron que la fórmula química  $C_6H_{10}O_4$  se aproxima mucho a la mezcla de compuestos orgánicos en los RSU. Por coincidencia, hay diez compuestos orgánicos, tales como ácido adípico y diacetato de etilenglicol, que tienen la misma fórmula molecular. El calor de formación de estos compuestos orgánicos es de aproximadamente 960 MJ/kilomol. la combustión completa de los compuestos orgánicos en RSM se representa por la siguiente ecuación química:



Esta reacción es altamente exotérmica y en la temperatura de combustión de 1.000 °C el calor calculado de combustión es 2,7 MJ/kilomol de compuesto orgánico. Puesto que el peso molecular de  $C_6H_{10}O_4$  es de 146 kg/kilomol, el calor "teórico" de la reacción (es decir, en la ausencia de materiales no combustibles y humedad) se calcula a ser de 18,5 MJ/kg.

### 2.2 EFECTO DE LA HUMEDAD Y MATERIALES INERTES EN EL VALOR CALORÍFICO DE LOS RSU

---

La humedad y los materiales no combustibles contenidos en los RSM disminuyen su poder calorífico. Para cuantificar estos efectos, se supone que la planta WTE proporciona vapor para una planta de energía estándar y que los gases de escape salen del sistema de la caldera a 120 °C y 0,135 MPa. En consecuencia, la pérdida de calor en la humedad del agua en la alimentación se calcula que es 2,6 MJ/kg de humedad en el RSM. Los materiales no combustibles en la alimentación, principalmente vidrio y metales, terminan en su mayoría en las cenizas de fondo. Si se supone que la ceniza sale de la cámara de combustión a aproximadamente 700 °C, la pérdida de calor que corresponde a materiales inorgánicos alimentados con los combustibles se estima que es la siguiente:

- Vidrio y otros materiales inorgánicos: 0,63 MJ/kg de vidrio en los RSM
- Hierro y otros metales: 0,54 MJ/kg de metales en los RSM

Por lo tanto, los materiales no combustibles afectan el valor de calentamiento del RSM como sigue:

$$\text{Poder calorífico de la mezcla de RSU} = (\text{valor calorífico de los combustibles}) \times (X_{\text{combustibles}}) - (\text{pérdida de calor debido al agua en la alimentación}) \times (X_{\text{H}_2\text{O}}) - (\text{pérdida de calor debido al vidrio en la alimentación}) \times (X_{\text{vidrio}}) - (\text{pérdida de calor debido al metal en la alimentación}) \times (X_{\text{Metal}}) \text{ MJ/kg}$$

Donde  $X_{\text{combustibles}}$ ,  $X_{\text{H}_2\text{O}}$ , etc., son las fracciones (% en masa) de materia combustible, agua, etc., en los RSM.

Sustituyendo los valores numéricos para el calor de la combustión y por las pérdidas de agua y calor inorgánica:

$$\text{Poder calorífico de la mezcla de RSU} = 18.5X_{\text{combustibles}} - 2.6X_{\text{H}_2\text{O}} - 0.6X_{\text{vidrio}} - 0.5X_{\text{Metal}} \text{ MJ/kg}$$

La línea gruesa en la Figura 4 es un gráfico de la ecuación anterior en comparación con el porcentaje de humedad. Se puede observar que esta ecuación se corresponde bien con los datos experimentales sobre el valor de calentamiento de los RSU de varias fuentes. Las otras líneas rectas son gráficos similares para otros materiales orgánicos.

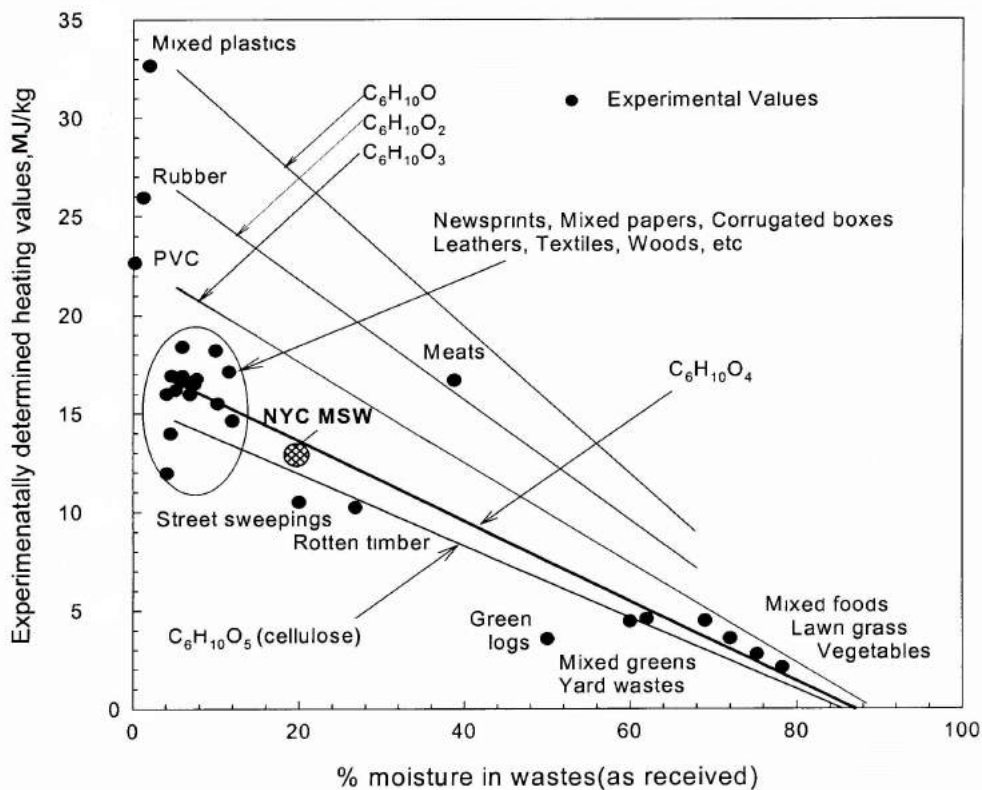
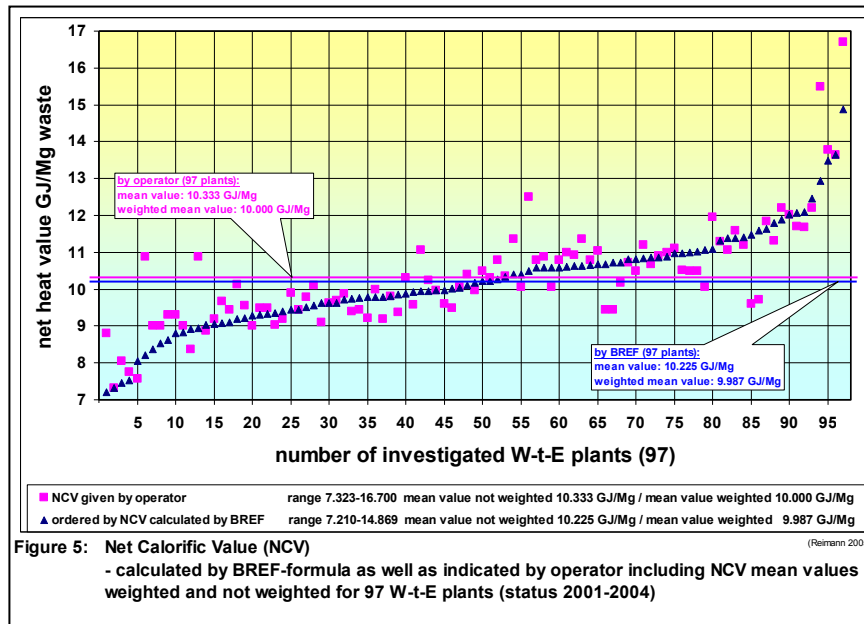


FIGURA 4 EFECTO DE LOS COMPONENTES Y LA HUMEDAD EN EL PODER CALORÍFICO DE LOS RSU<sup>11</sup>

Por supuesto, el poder calorífico de los RSU puede variar mucho de un país a otro y de una ciudad a otra. Esto se puede ver en la Figura 5 que muestra los valores caloríficos de residuos sólidos quemados en 97 plantas WTE en toda Europa<sup>12</sup>. Valores calóricos varían desde un mínimo de



aproximadamente 8 MJ/kg y un máximo de más de 14 MJ/kg. Los valores altos corresponden a plantas que queman una mezcla de RSU y residuos industriales; los valores bajos a alta humedad en el RSU. El valor medio ponderado de los 97 plantas WTE es de 10 MJ/kg. Cabe señalar que el carbón de lignito, todavía utilizado en muchas partes del mundo, tiene un valor calorífico en el mismo rango, o inferior. El valor de 10 MJ/kg corresponde a aproximadamente 2,8 MWh (megavatios-hora) de energía térmica por tonelada. Este número debe tenerse en cuenta a la hora que personal de ventas proponga procesos que pueden recuperar más energía que la almacenada químicamente en los RSU.

FIGURA 5 VARIACIÓN DEL VALOR CALORÍFICO DE LOS RSU A PLANTS EUROPEA WTE<sup>12</sup>

Como se dijo anteriormente, la única alternativa al vertido de RSU post-reciclaje probada es la combustión o gasificación para recuperar electricidad, calor, gas de síntesis y metales. A nivel mundial, hay más de 800 plantas de tratamiento térmico, la mayoría de ellas en la U.E., Japón, los EE.UU. y China. Algunas de las instalaciones WTE más eficientes térmicamente se encuentran en el norte de Europa, ya que recuperan 0,5 MWh de energía eléctrica además de más de 0,5 MWh de energía térmica para la calefacción urbana. En cuanto a las instalaciones sólo eléctricas, el

promedio de instalaciones en EE.UU. recupera 0,55 MWh de energía eléctrica (neto) por tonelada de RSU procesados, mientras que las nuevas instalaciones, por ejemplo, AEB Ámsterdam, proporcionan a la red más de 0,7 MWh de electricidad por tonelada de desecho sólido municipal (DSM).

### 2.3 COMBUSTIÓN EN PARRILLA

---

En la combustión en parrilla WTE (“Grate Combustion” en inglés), las bolsas de DSM y otros residuos se descargan de los vehículos de recolección en el búnker de residuos en un edificio completamente cerrado (Figura 6). Por lo general, el búnker de desecho es suficientemente grande para contener materia prima de más de una semana. Una grúa de garra carga los sólidos en la tolva de alimentación del horno WTE y un alimentador en la parte inferior de la tolva empuja los residuos a la parrilla en movimiento. La parrilla puede estar inclinada o vertical y, o bien refrigerado por aire o refrigerado por agua. El movimiento mecánico de la parrilla, y también la fuerza de la gravedad en el caso de una parrilla inclinada, mueve lentamente el lecho de sólidos a través de la cámara de combustión. La oxidación a alta temperatura en la cámara de combustión reduce objetos del tamaño de una maleta grande en cenizas que se descargan en el extremo inferior de la parrilla.



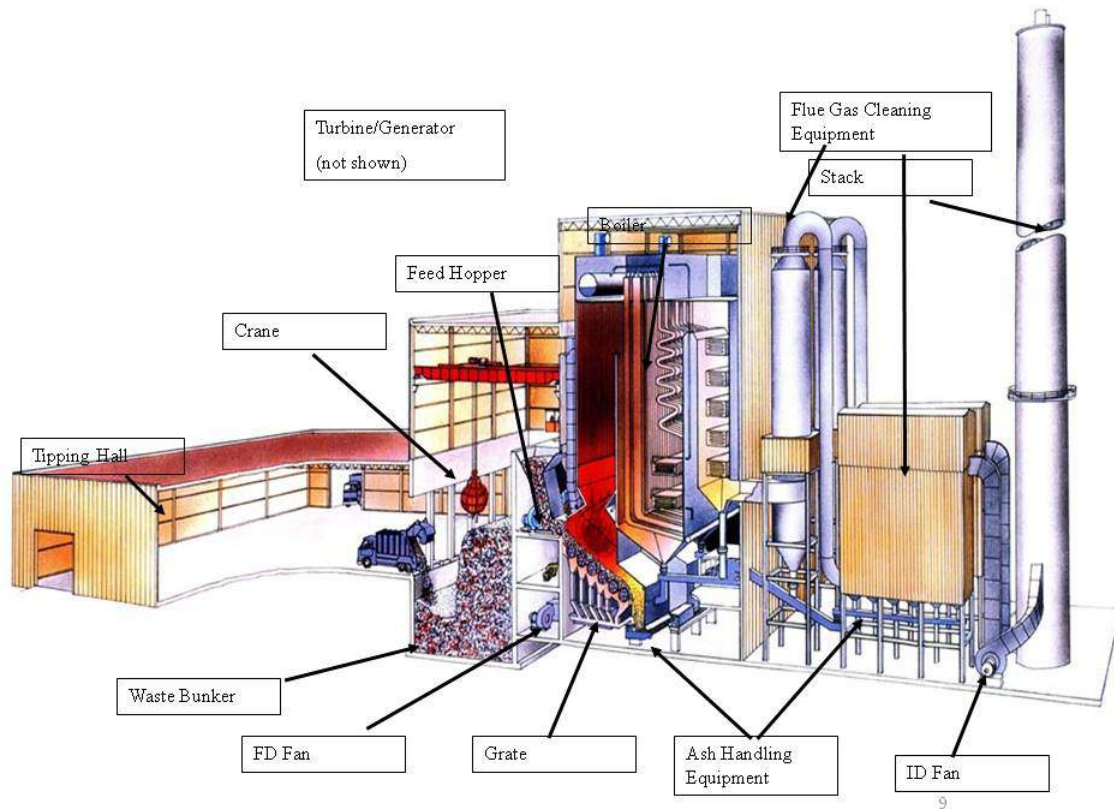


FIGURA 6 PARTES DE UNA INSTALACIÓN DE COMBUSTIÓN DE PARRILLA (WTE KORALEWSKA, R., MARTIN GMBH, PRESENTACIÓN EN WTERT BI-ANUAL REUNIÓN DE OCTUBRE DEL 2006)

La Figura 7 muestra el diagrama de flujo de una instalación de WTE y el material aproximados y entradas y salidas de energía.

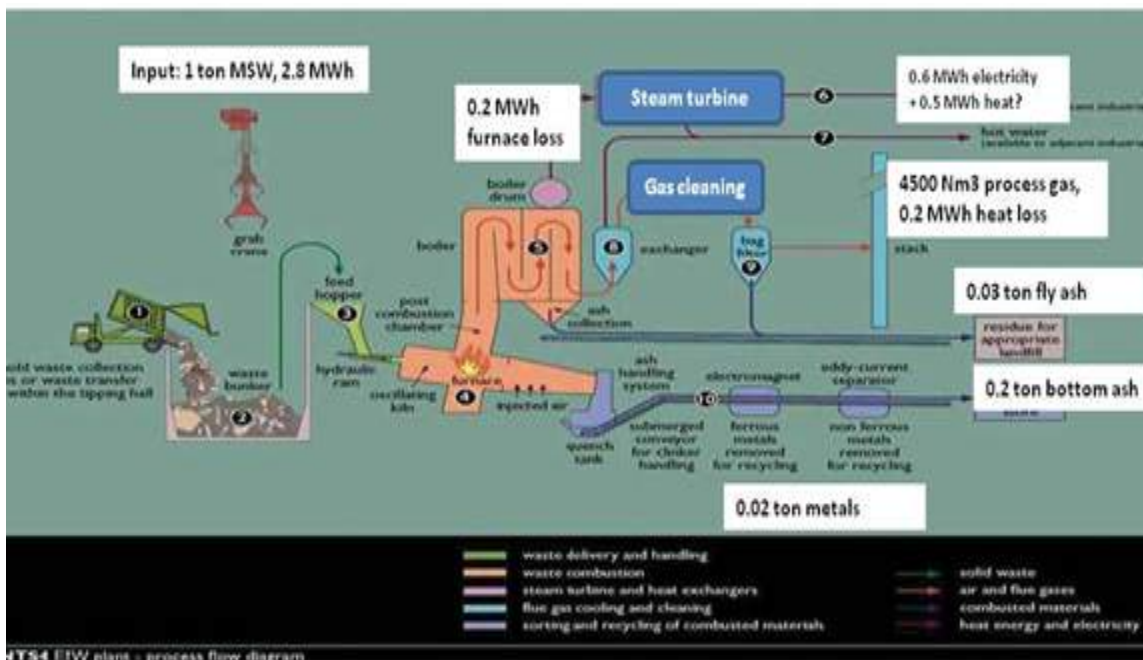


FIGURA 7 ENTRADAS DE MATERIA Y ENERGÍA Y SALIDAS EN UNA PLANTA WTE (DIBUJO ESQUEMÁTICO EEC)

El calor contenido en los gases de combustión se transfiere, a través de la pared de agua de horno refrigerado por agua y tubos sobrecalentadores, al vapor de alta presión que impulsa el generador de la turbina. El vapor de baja presión de los gases de escape del generador se puede utilizar para la calefacción urbana. Las instalaciones WTE más eficientes son co-generadoras de electricidad (> 0,6 MWh) y calefacción urbana (> 0,5 MWh) por tonelada de RSU procesados. A modo de ejemplo, 28 plantas WTE proporcionan aproximadamente el 35% de las necesidades de calefacción urbana de Dinamarca.

La mayoría de las plantas WTE construidas en la última década son del tipo de combustión de parrilla. Un estudio el año 2007 de tres tecnologías dominantes (Martin, Von Roll, Keppel Seghers)<sup>13</sup> mostró un crecimiento constante de cerca de tres millones de toneladas de capacidad de quema masiva por año en el período 2000-2006.

## 2.4 COMBUSTIÓN DE COMBUSTIBLE DERIVADO DE RESIDUOS (RDF)

La tecnología de combustible derivado de residuos (RDF) representa el avance más simple posible sobre la parrilla de combustión de RSU tal como se reciben. El concepto original de RDF era permitir la separación de materiales comercializables de la alimentación de RSU antes de su entrada en la cámara de combustión. Básicamente, este proceso consiste en una única trituración de los RSM, la clasificación de algunos de los materiales reciclables, y luego quemar el RDF resultante. En los EE.UU., hay 12 instalaciones WTE RDF, con capacidades que van de 360 a 2.700 toneladas por día y en el proceso total alrededor de seis millones de toneladas métricas al año de RSU (es decir, el 20% de la capacidad de EE.UU. WTE). Una variación del proceso RDF también se utiliza en Europa, donde el proceso de Tratamiento Biomecánico (TBM) trata RSU mixtos y produce un

producto RDF que es co-quemado con carbón en las centrales eléctricas y de cemento que deben estar provistas de sistemas de Control de la Contaminación del Aire (APC) con el mismo rendimiento que las plantas WTE.

La instalación SEMASS WTE en Rochester, Mass., es uno de los mejores ejemplos de la aplicación con éxito de la tecnología RDF. Se compone de tres unidades de 900 toneladas métricas/día cada una y pre-tritura los RSU a menos de 15 cm de tamaño en un molino de martillos, elimina aproximadamente el 50% de su contenido de metales ferrosos haciendo pasar el material triturado a través de un separador magnético, y a continuación, lo almacena en un edificio adyacente al de WTE. Desde allí, un alimentador de correa transmite a los conductos de alimentación de las calderas; una segunda cinta transportadora devuelve el material no utilizado de nuevo al edificio de almacenamiento RDF. Este sistema de alimentación es similar a un motor de gas en el que sólo parte del combustible fluye en el carburador mientras el resto vuelve a la bomba de combustible.

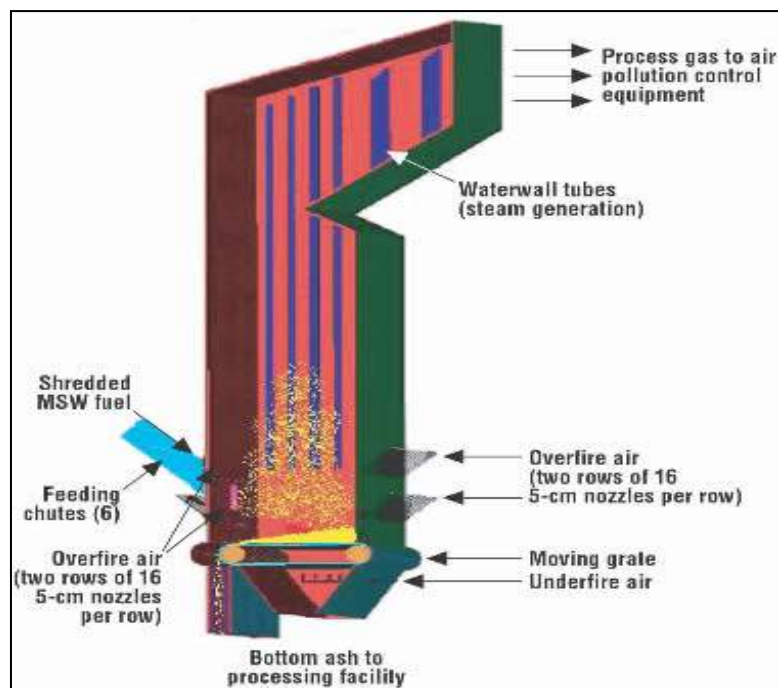


FIGURA 8 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA UNIDAD DE COMBUSTIÓN SEMASS (FIGURA EEC)

En las plantas de combustión de parrilla, el operador de la grúa siempre mantiene la tolva de alimentación completa. En contraste, la caldera SEMASS (Figura 8) se alimenta a través de un canal inclinado alimentado por un transportador a una velocidad tal que la alimentación no se acumula en el conducto si no que se transporta en una corriente de aire de forma que entra en el horno en una estado cuasi-fluidizado; por lo tanto, una fracción de la alimentación se quema en suspensión mientras que el resto se deposita en el extremo de la parrilla horizontal y se mueve lentamente hacia el extremo de alimentación.

Dado que no todo el contenido en hierro se recupera antes de la combustión, SEMASS transmite las cenizas de fondo a través de separadores magnéticos, para recuperar los metales ferrosos, y luego separadores de corrientes de Foucault, para recuperar metales no ferrosos. Es interesante observar

que el metal ferroso post-combustión, recuperado de la ceniza de fondo, alcanza un valor de mercado superior al recolectado de la corriente de pre-combustión. Desde una perspectiva de ingeniería de la reacción, la trituración de DSM de alta heterogeneidad a un tamaño y composición de partícula más uniforme debe ser beneficioso: las tasas de calor y masa se incrementan con un tamaño de partícula más pequeño y un cierto grado de homogeneización debe facilitar el control de la combustión en el horno. Dado que las tasas de secado, volatilización, y de combustión serían más altas, la productividad específica (por ejemplo, toneladas por unidad de volumen de la cámara de combustión) de WTE desmenuzado también debe ser mayor que el WTE de combustión en parrilla. Sin embargo, para una mayor adopción de la tecnología RDF, estas ventajas deben traducirse en menores costos operativos y de capital que la tecnología de combustión en parrilla.

Casi todas las plantas RDF WTE de gran tamaño están en EE.UU.; una de ellas, de 1.800 toneladas/día de capacidad fue construida cerca de Palm Beach, Florida, cuando el condado estaba generando 2.900 toneladas/día de RSU. En el intervalo de veinte años, la generación de residuos aumentó a 5.900 toneladas/día y el condado decidió construir una segunda planta WTE de 3.000 toneladas/día de capacidad. Es interesante que la nueva planta será una instalación de quema masiva, ya que será menos costosa de construir y operar. Lo mismo ocurrió en Honolulu, Hawai, donde se eligió la combustión en parrilla de quema masiva para una expansión de 700 toneladas/día de una planta WTE que es del tipo RDF.

---

## 2.5 COMBUSTIÓN EN LECHO FLUIDIZADO

---

El proceso de fluidización convierte un lecho de sólidos en un fluido mediante la introducción de un flujo de gas a través de la parte inferior del lecho. Este fenómeno se puede ilustrar en la Figura 9 que muestra un lecho de partículas sólidas colocadas sobre una placa perforada en un cilindro vertical. Como se inyecta un gas a través de la placa a una tasa de flujo constantemente en aumento, al principio las partículas permanecen en reposo. Sin embargo, como el flujo de gas aumenta las partículas se levantan y el lecho de sólidos comienza a comportarse como un líquido de ebullición. En esta etapa, el movimiento de la cama se describe como "burbujeo de lecho fluidizado" (BFB); si hay una abertura a través de la pared, una parte del material del lecho burbujeante fluiría a través de esta abertura ("corriente de desbordamiento"). Si el caudal de gas se incrementa aún más, las partículas se levantan del lecho fluido y se pueden llevar hacia fuera del reactor por el flujo de gas ("corriente de arrastre"). Por ejemplo, esto es lo que ocurre con las pequeñas partículas de residuos sólidos urbanos en el reactor SEAMASS que se discutió en la sección anterior (Figura 8).

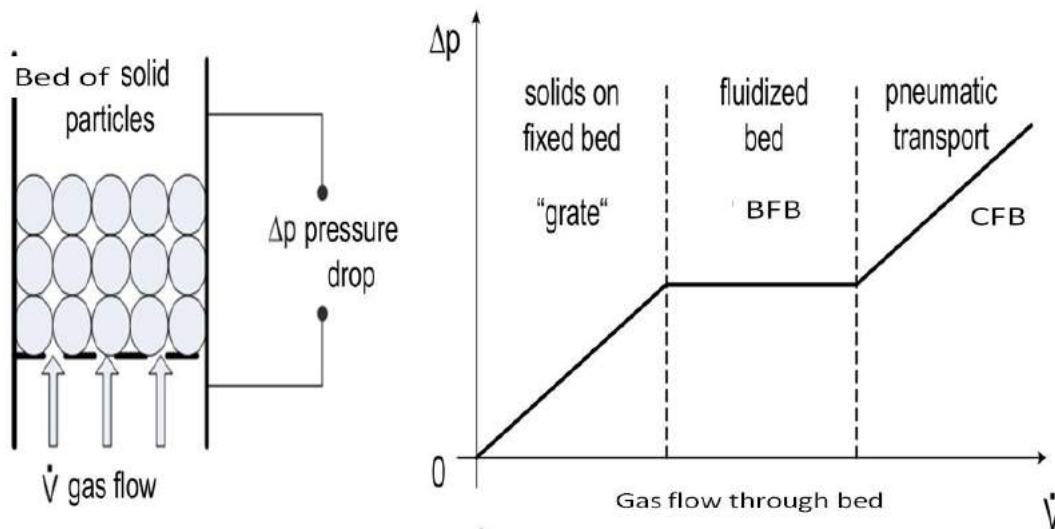


FIGURA 9 CAMBIO EN EL COMPORTAMIENTO DEL LECHO DE SÓLIDOS CON EL AUMENTO DEL FLUJO DE GAS Y LA CAÍDA DE PRESIÓN A TRAVÉS DEL LECHO (F. NEUBACHER, TECNOLOGÍA DE LECHO FLUIDIZADO WTE, ESST (SPRINGER) P.11853)

El proceso de fluidización se utiliza ampliamente en la tostación de zinc y otros minerales de procesamiento, en madera y calderas de biomasa, y muchas otras aplicaciones. También se ha aplicado a la combustión de combustibles sólidos derivados de la transformación de los RSU, con más frecuencia por medio de "lecho fluido circulante". La aplicación más frecuente se denomina lecho fluido circulante (CFB) donde la corriente de arrastre del reactor de lecho fluido pasa a través de un ciclón que separa la mayor parte de los sólidos de la corriente de gas y los devuelve al reactor de lecho fluido para su posterior procesamiento. Un medio de transferencia de calor, tal como la arena, se añade al lecho fluido y se recircula.

La Figura 10 muestra la configuración de un reactor de lecho fluido circulante que se utiliza para la combustión de RDF en Neumuenster, Alemania. El RSU (210.000 ton/año, 9 MJ/kg) se tritura, y se separan en metales y materiales inorgánicos; el resto se somete a biorreacción y secado y las resultantes 103.000 toneladas de RDF (14,1 MJ/kg) se queman en un lecho fluido circulante. El calor de combustión se utiliza para co-generar electricidad y calor. Hay algunos reactores de lecho fluido RDF en Europa y varios en China (Figura 11).

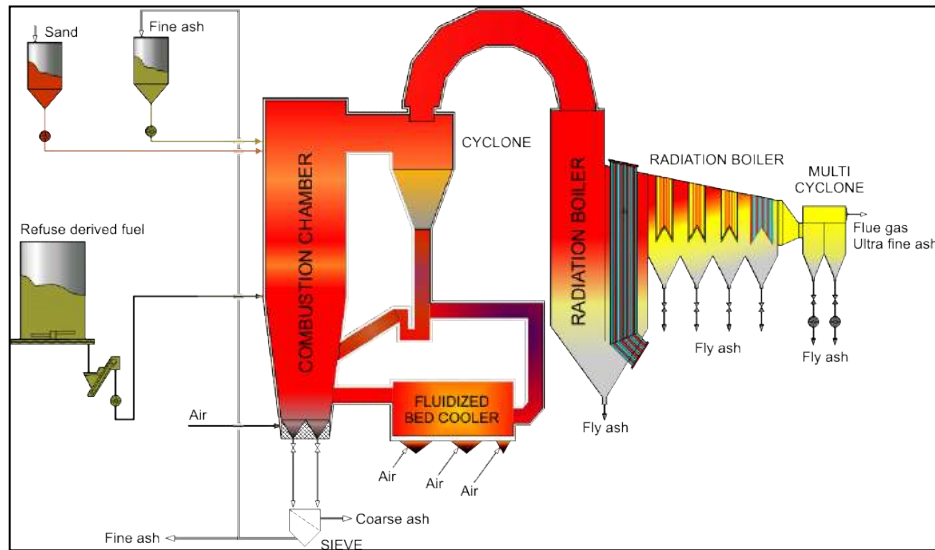


FIGURA 10 REACTOR DE LECHO FLUIDO NEUMUENSTER QUEMANDO RDF<sup>14</sup>

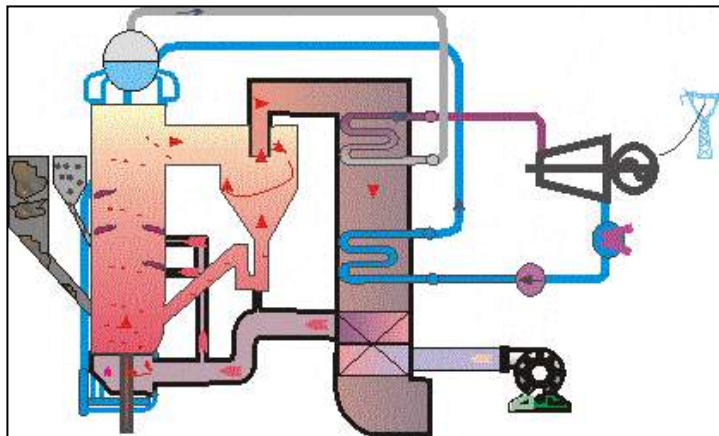


FIGURA 11 LECHO FLUIDO CIRCULANTE (CFB) DE LA UNIVERSIDAD DE ZHEJIANG, WTE<sup>15</sup>

Recientemente ha llegado a la atención del Earth Engineering Center (EEC) que una de 500 planta de WTE con una capacidad de 500 ton/día está prevista en Arizona, la cual se basará en el principio de lecho fluido burbujeante (BFB) (Figura 12). Los desarrolladores de este proyecto (Reclamation Power Group) aconsejan al EEC, que el costo proyectado de esta planta es de US \$50 millones. Esto corresponde a aproximadamente la mitad del costo de capital, por tonelada de capacidad, de una instalación de combustión de parrilla convencional, como se explica en una sección posterior de la Guía. El proveedor de esta tecnología en América del Norte (Energy Products de Idaho) está

incluido en la lista de proveedores de WTE. La tecnología de lecho fluido WTE, al igual que todas las tecnologías, avanza constantemente y solicitudes de propuestas para el tratamiento térmico de los RSU en la región de ALC no deben excluir las tecnologías convencionales o novedosas, a condición de que puedan cumplir con los criterios de rendimiento que se describen en una sección posterior de esta Guía.

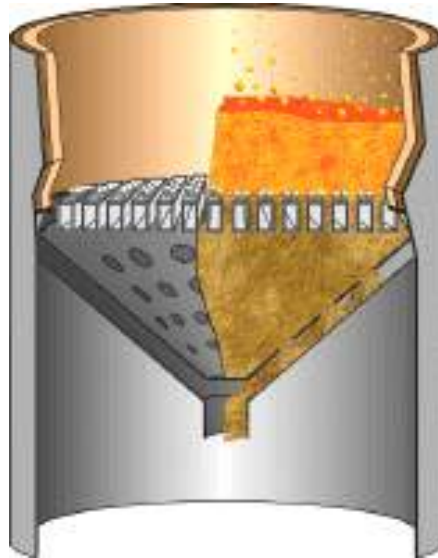


FIGURA 12 EJEMPLO DE LECHO FLUIDO BURBUJEANTE<sup>16</sup>

## 2.6 PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLES SECUNDARIOS A TRAVÉS DE TECNOLOGÍA DE TRATAMIENTO MECÁNICO BIOLÓGICO (TMB)

El tratamiento mecánico biológico (TMB) es una variación del proceso de RDF desarrollado en Europa. Como se señaló anteriormente, los RSU contienen alimentos y desechos del jardín que van desde aproximadamente un 25% en las naciones desarrolladas a 50-55%, y superior, en el mundo en desarrollo. Estos materiales orgánicos naturales contienen una gran cantidad de humedad y la eliminación parcial de ésta aumenta el valor calorífico de los residuos sólidos parcialmente secos. Los procesos de TMB se han desarrollado desde 1995 con el objetivo de separar la mezcla de RSU en tres fracciones sólidas: Los materiales reciclables, orgánicos naturales que son compostados aeróbica o anaeróbicamente, y un residuo de combustible que se llama "combustible sólido recuperado" (CSR).

La Figura 13 muestra la secuencia del proceso y los productos del proceso de TMB en la que el RSU triturado se separa en un recipiente cilíndrico giratorio ( "tromel") a una fracción fina, orgánica que se compostada y una fracción de gran tamaño que se ordena mecánicamente a materiales reciclables ( metales, un poco de papel, algunos plásticos, etc.) y al combustible de CSR.

La Figura 13 muestra también la variante "TBM" del proceso de TMB, donde la separación mecánica se lleva a cabo después de que el RSU triturado se somete a "biosecado" por medio del flujo de aire a través del lecho de los sólidos triturados. Durante las diversas operaciones unitarias del proceso de TMB, una gran parte de la humedad se expulsa y algunos de los compuestos orgánicos se hacen reaccionar con el dióxido de carbono (compostaje o biosecado) o metano (digestión anaeróbica).

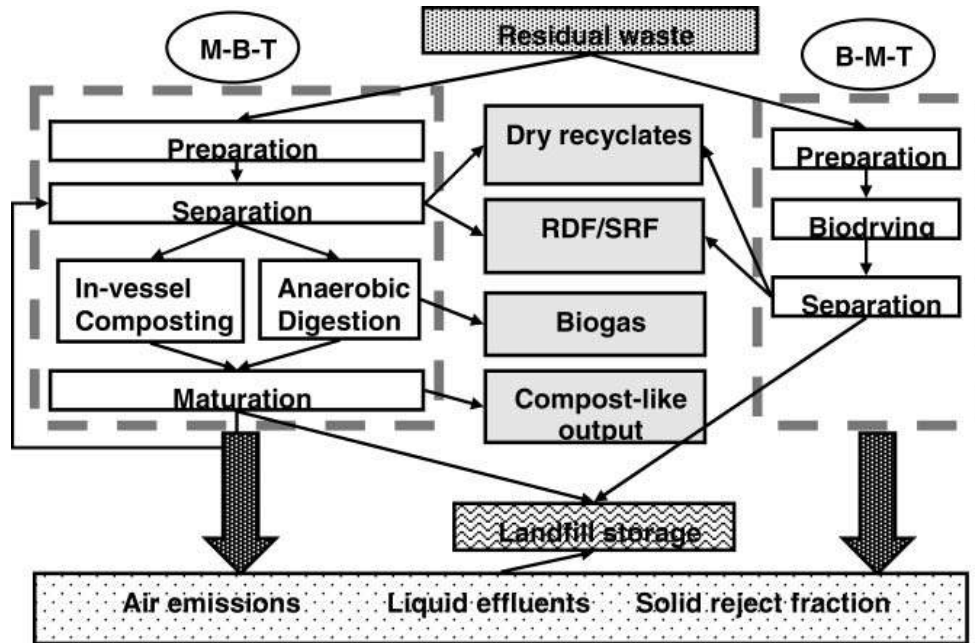


FIGURA 13 DIAGRAMA DEL PROCESO TMB.<sup>17</sup>

Para el año 2006, la capacidad de TMB había aumentado a cerca de cinco millones de toneladas de CSR, sobre todo en Alemania y otros países europeos (Figura 14). Hay varios tipos de tales procesos y algunos han tenido más éxito que otros. La corriente de materiales reciclables puede ser tan buena como los materiales reciclables separados en origen y es comercializable. Sin embargo, la calidad y el aspecto visual del producto de compost pueden no ser lo suficientemente bueno para ser utilizado, incluso cuando se administra de forma gratuita. Además, el producto combustible "CSR" contiene una cantidad relativamente alta de cloro y metales volátiles por lo que las plantas de recepción de co-combustión deben proporcionar para esto en sus calderas y sistemas de control de contaminación atmosférica. Por lo tanto, hay casos en que estos dos productos no son aceptables en el mercado y terminan en los vertederos; en tales casos, el TMB sirve para clasificar materiales reciclables y disminuir la cantidad de RSU que terminan en vertederos.



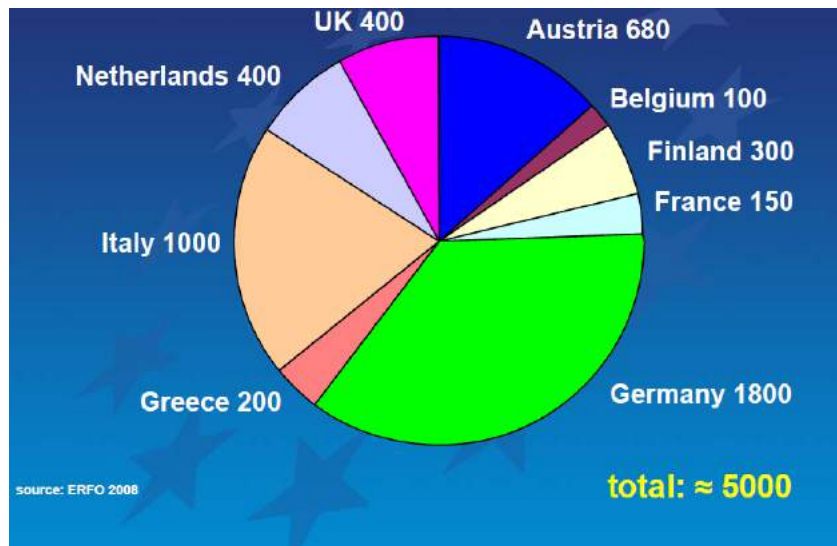


FIGURA 14 PRODUCCIÓN DE CSR POR EL PROCESO DE TMB EN EUROPA, 2008 (EN MILES DE TONELADAS)<sup>18</sup>

Cuando el CSR se utiliza para co-combustión en centrales eléctricas o los hornos de cemento, los usuarios demandan una "tasa de entrada", es decir, tiene un valor negativo. Sin embargo, esta tasa de entrada es mucho más baja que la tasa de entrada requerida por las plantas WTE en la misma zona y esta diferencia proporciona el incentivo económico para producir CSR. La Figura 15 muestra los diversos componentes de los costes de producción SRF, incluyendo los precios negativos ("cuotas de compuerta") pagados a varias plantas de co-combustión en Alemania. Se puede observar que la tasa de entrada pagada a dichas plantas oscila entre 10-18 euros (US\$ 14-15) para el alto poder calorífico SRF a 34-60 euros (US\$ 48-84) por tonelada de bajo poder calorífico SRF.

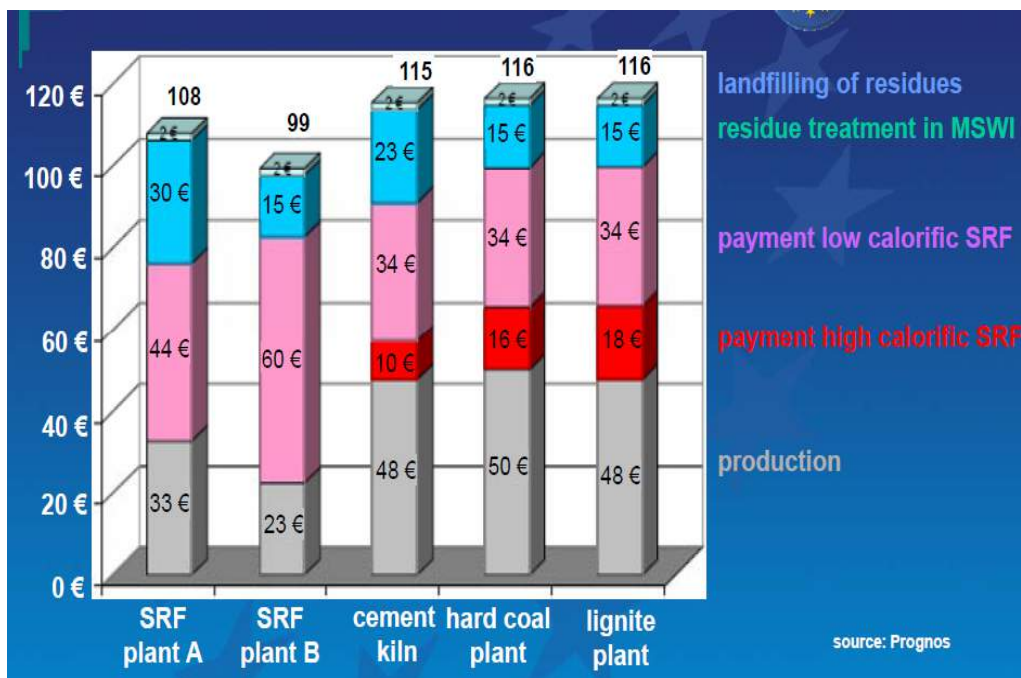


FIGURA 15 COSTES DE PRODUCCIÓN Y LA UTILIZACIÓN DE UNA TONELADA DE CSR, 2006<sup>18</sup>

El TMB fue desarrollado en Europa, principalmente en respuesta a la Directiva sobre vertederos de la UE (LFD, 99/31/CE) que requiere la eliminación gradual de los vertederos debido a su potencial para producir gas de vertedero y los lixiviados. Su objetivo es producir un combustible que puede ser co-combustionado en plantas a base de carbón y también de cemento, evitando así la necesidad de construir una planta de WTE. Sin embargo, ya que este combustible tiene un valor negativo en el mercado de co-combustión, es necesario considerar si vale la pena para una región construir varias plantas de TMB de pequeño tamaño que sirven a un número de municipios, y luego transportar el CSR producido a un WTE regional para la combustión con recuperación de energía.

Un municipio que quiere implementar WTE puede considerar el proceso de TMB más simple posible, con lo que la RSU se tritura y se somete a biosecado por medio del flujo de aire a través del lecho de sólidos. Después de biosecado, los materiales no-combustibles (metales, vidrio, inerte) estarían separados; el CSR resultante se puede suponer que tiene una masa igual a 60% de los RSM originales y un valor calorífico 66% (es decir,  $100/60 = 1,66$ ) más alta que el RSM original. Para el caso hipotético de procesamiento de un millón de toneladas de RSM, la economía de una planta de TMB seguido de una planta de WTE que quema el producto de CSR del TMB se pueden comparar con la construcción de una instalación de combustión de parrilla convencional que quema DSM en bruto como sigue:

***costo de capital de 1 millón de toneladas de TMB + 0,6 x costo de capital de 1 millón de toneladas de WTE < costo de capital de 1 millón de toneladas de WTE "tal como se reciben"***

En el caso anterior, la combinación de TMB + WTE será atractiva cuando el coste de capital de la planta de 1 millón de toneladas de TMB es sustancialmente menor que 40% del costo de capital del millón de toneladas de WTE. Por ejemplo, supongamos que el costo de capital de una WTE de un

millón de toneladas construida en América Latina es de US \$500 por tonelada anual de capacidad. Por lo tanto, de acuerdo con el razonamiento anterior, para que la combinación TMB + WTE sea atractiva, la planta TMB debería costar menos de US \$200 por tonelada de capacidad anual. Por supuesto, debería haber comparaciones adicionales de los costos de operación y producción de energía de las dos alternativas, pero el reembolso del costo de capital es el principal componente de costos en las plantas WTE.

La discusión anterior indica que la operación de TMB para la región de ALC debe ser lo más sencilla posible y no tan complejo como el diagrama de flujo de la planta de biosecado TMB de 70.000 ton/año de la Figura 16. Sin embargo, como todas las tecnologías, el TBM avanza constantemente; por lo tanto, las solicitudes de propuestas para el tratamiento térmico de los RSU en la región de ALC debe solicitar comunicaciones de todas las tecnologías probadas y luego comparar los respectivos costos de capital y operativos.

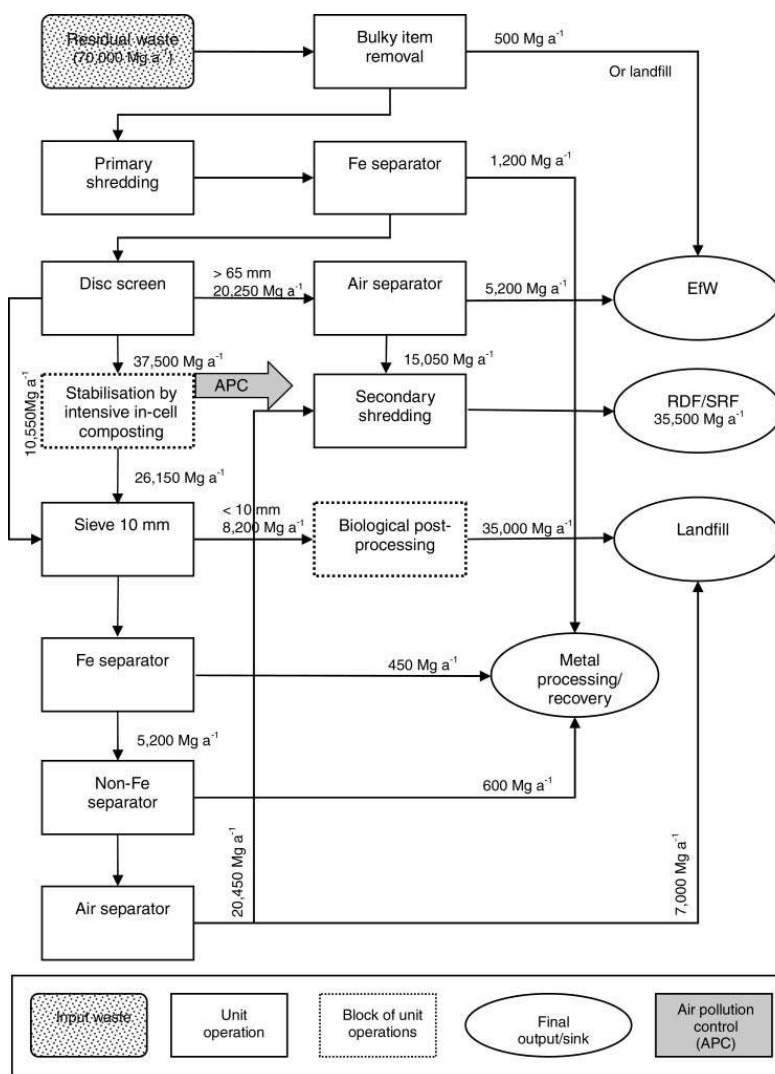


FIGURA 16 DIAGRAMA DE FLUJO SIMPLIFICADO Y BALANCE DE MASA DE LA PLANTA NEHLSSEN DE BIOSECADO TMB EN STRALSUND, ALEMANIA<sup>17</sup>  
 GUÍA PARA LA RECUPERACIÓN DE ENERGÍA Y MATERIALES DE RESIDUOS

### 3. TECNOLOGÍAS DE GASIFICACIÓN

---

Los procesos WTE llamados "gasificación" son de hecho una combinación de oxidación parcial y la volatilización de los compuestos orgánicos contenidos. La gasificación en el primer horno es seguido por la combustión de los gases volátiles y la generación de vapor en un segundo horno, o mediante el uso del gas de síntesis en un motor de gas o turbina. Japón es el mayor usuario de gasificación de RSU en el mundo. Como se verá más adelante, la tecnología principal utilizada es la combustión de parrilla de "RSU tal como se recibió" pero hay más de un centenar de plantas de tratamiento térmico basadas en procesos relativamente nuevos como la fundición directa (JFE, Nippon Steel), el proceso de fluidificación Ebara, y el proceso de gasificación y fusión Thermoselect. Estos procesos tienen emisiones tan bajas como el proceso de combustión WTE convencional y producen una ceniza vitrificada que se puede utilizar beneficiosamente en vertederos exteriores.

El transporte de RSU "tal como fueron recogidos" de un municipio a otro no está permitido en Japón. Como resultado, las instalaciones de combustión de parrilla son relativamente pequeñas. Además, los DSM de varias comunidades se procesa a un derivado de desechos de combustibles en instalaciones RDF locales y luego se transporta a un WTE central que sirve a varias comunidades. Además, a todas las plantas WTE se les exige vitrificar su ceniza después de la combustión, por medio de horno eléctrico, o fusión de plasma térmica, u otros medios. Estas regulaciones permiten la introducción de procesos de tratamiento térmico que serían consideradas poco rentables en otras naciones desarrolladas.

#### 3.1 PROCESO DE FUNDICIÓN DIRECTA JFE

---

El reactor de Fundición Directa JFE asemeja a un pequeño horno de hierro donde las partículas de alimentación se introducen a través de la parte superior de un eje vertical (Figura 17). Varias plantas WTE de fundición directa han sido construidas por JFE y también, en una versión similar, por Nippon Steel. El DSM se tritura y se convierte en RDF, secando la fracción orgánica en un horno rotatorio para luego extruir el producto bajo presión en partículas cilíndricas de largo 15-mm y diámetro 20-mm. El material producido en varias instalaciones RDF a continuación se transporta a una instalación de Fusión Directa regional, donde se quema y se recupera energía. Por ejemplo, la planta de fundición directa Fukuyama es abastecida por siete instalaciones RDF situadas en municipios atendidos por la instalación de FD.

El RDF se alimenta por medio de un alimentador de sacacorchos en la parte superior del horno de cuba. A medida que la alimentación desciende a través del horno, es gasificada y sus componentes inorgánicos se funden a escoria y metal, que se juntan al fondo del eje. El producto de gas se quema en una caldera contigua para generar vapor que se utiliza para generar electricidad en una turbina de vapor, igual que en WTE convencional.

El aire se introduce en el horno a través de toberas primarias, secundarias y terciarias, situadas a lo largo de la altura del eje. El aire primario, cerca de la parte inferior del eje, se enriquece a

aproximadamente 30% de oxígeno con el fin de generar las altas temperaturas requeridas para fundir la escoria y metal en la parte inferior del horno.

La combinación de RDF-FD puede manejar hasta 65% de agua en los residuos sólidos urbanos (el rango permitido habitual es de 40-50%), que en el horno de secado se reduce a 5-6%. El proceso requiere la adición de coque (alrededor de 5% de RDF), que se añade junto con el RDF en la parte superior del eje, así como suficiente cal para formar una escoria fluida en la parte inferior del horno. El proceso JFE produce escoria y glóbulos de metal (10% de RDF), que se utilizan de manera beneficiosa, y cenizas volantes (2% de RDF) que contiene metales volátiles y se depositan en vertederos. La escoria y el metal de desbordamiento del horno se enfrían rápidamente en un tanque de agua para formar pequeñas partículas esféricas de metal y escoria. El contenido de cobre de la fracción de metal es aparentemente demasiado alto para ser utilizado en la fabricación de acero y demasiado bajo para ser adecuado para la fundición de cobre; su uso principal es como un contrapeso de grúas y otras aplicaciones de lastre.

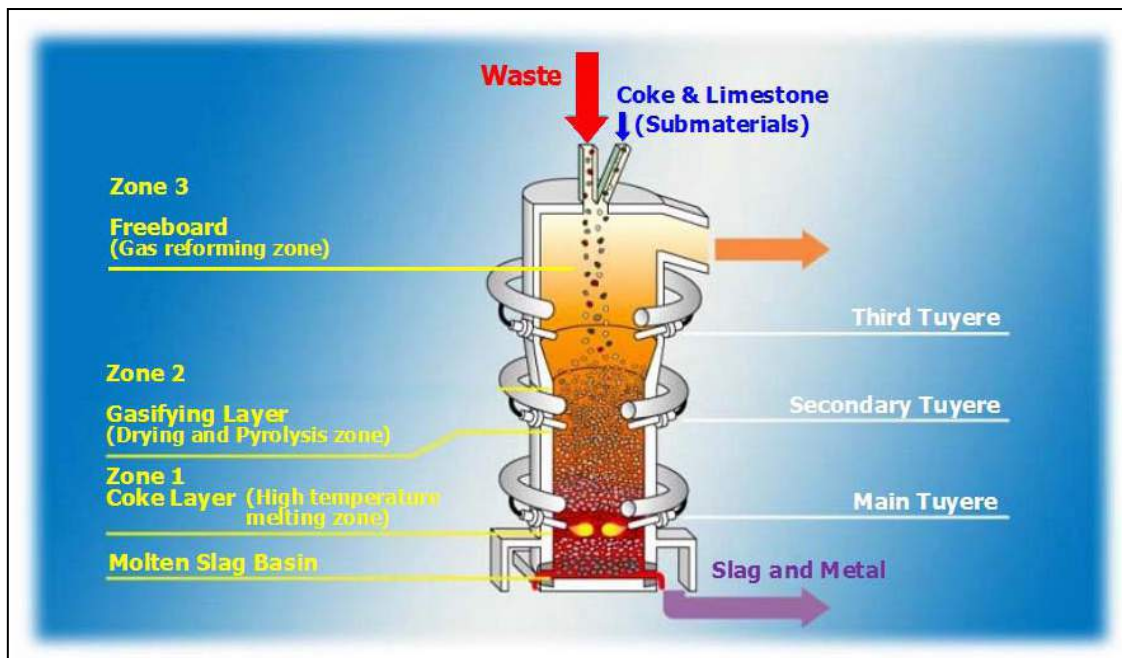


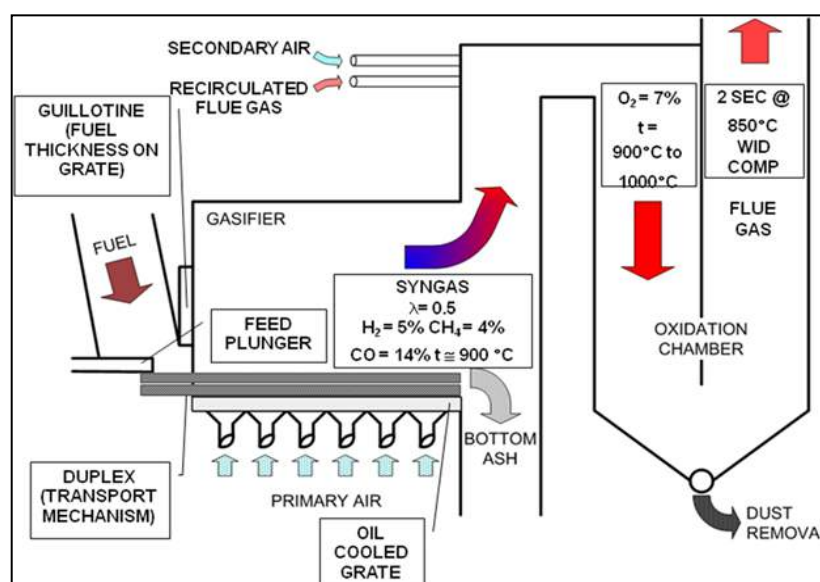
FIGURA 17 EL PROCESO DE FUNDICIÓN DIRECTA JFE<sup>19</sup>

### 3.2 PROCESO ENERGOS DE GASIFICACIÓN Y COMBUSTIÓN DE PARRILLA

La tecnología Energos de combustión de parrilla y gasificación se encuentra en operación en seis plantas en Noruega, una en Alemania y una en el Reino Unido. Energos es parte del grupo ENER-G, con sede cerca de Manchester, Reino Unido. Esta tecnología fue desarrollada en Noruega en la década de 1990 con el fin de proporcionar una alternativa económica para la combustión de parrilla WTE con emisiones bajas a la atmósfera y flexibilidad en materia prima. Todas las plantas que

operan tratan RSU más corrientes adicionales de residuos comerciales o industriales<sup>20,21</sup>. Las plantas que actualmente operan varían en capacidad de 10.000 a 78.000 toneladas por año<sup>22</sup>.

El material de alimentación a una planta de Energos es RSM post-reciclaje mezclado con una cantidad menor de otros flujos de residuos. Estos incluyen los residuos industriales y residuos de centros de recuperación de materiales (MRF). Antes del tratamiento térmico, los materiales son triturados en una trituradora de alto torque, bajas rpm y luego los metales ferrosos son eliminados magnéticamente<sup>20,23</sup>. En la primera cámara del proceso Energos, la materia prima se oxida parcialmente y gasifica en una parrilla móvil en condiciones de oxígeno sub-estequiométricas (relación aire-combustible,  $\lambda=0,5-0,8$ ); la combustión del carbono fijado en la parrilla resulta en carbono orgánico total (COT) de <3% en la ceniza WTE<sup>20,21</sup>. Los gases volátiles que se generan en la cámara de gasificación se queman entonces completamente en una cámara contigua, el calor de los gases de combustión se transfiere al vapor de agua en un sistema de recuperación de calor. Las

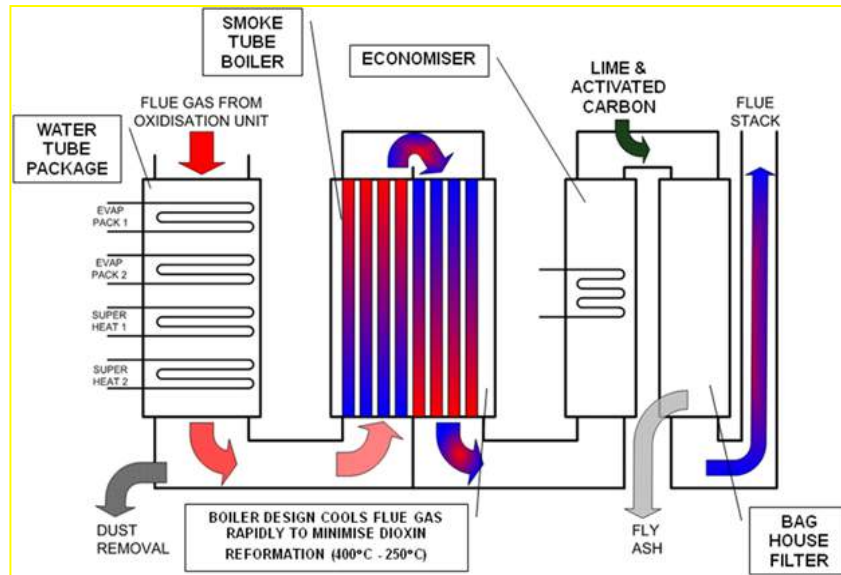


temperaturas alcanzan hasta 900°C en la cámara de gasificación y hasta 1,000°C en el cámara de oxidación<sup>20</sup>. La formación de NOx se mantiene relativamente baja (alrededor de 25% del límite de la UE)<sup>24</sup>, cualquier dioxinas en la alimentación se destruyen en la cámara de combustión, y el enfriamiento rápido conseguido en el generador de vapor de recuperación de calor minimiza la formación de dioxinas. Un diagrama esquemático de la cámara de gasificación y combustión se muestra en la Figura 18.

FIGURA 18 UNIDADES DE COMBUSTION Y GASIFICADOR DE ENERGOS<sup>20,21</sup>

Después del generador de vapor de recuperación de calor (Figura 19), el gas de combustión entra en el sistema de limpieza de gases de combustión en seco que consiste en lavado seco con cal, inyección de carbón activado, un filtro de bolsa, y un silo de polvo de filtro<sup>24</sup>. La cal absorbe compuestos ácidos en el gas de combustión y el carbón activado absorbe dioxinas y moléculas de metales pesados<sup>25</sup>. Las emisiones se controlan continuamente. La Tabla 1 muestra las mediciones de emisiones típicas de la planta Averoy de Energos en Noruega. Estas medidas fueron tomadas por

una agencia independiente (TÜV NORD Umweltschztz) para la Agencia de Medio Ambiente de



Noruega y se presentan al 11% de oxígeno<sup>21</sup>.

FIGURA 19 UNIDADES DE RECUPERACIÓN DE CALOR Y CONTROL DE CONTAMINACIÓN ATMÓSFERICA DEL ENERGOS

TABLA 1 EMISIONES DE LA PLANTA DE AVEROY (AL 11% DE OXÍGENO)<sup>21</sup>

Parámetro	Límites de la U.E., mg/Nm <sup>3</sup>	Energos, Averoy
Material particulado	10	0.24
Hg	0.05	0.00327
Cd + Ti	0.05	0.00002
Metales	0.5	0.00256
CO	50	2
HF	1	0.02
HCl	10	3.6
TOC	10	0.2
NOx	200	42
NH <sub>3</sub>	10	0.3
SO <sub>2</sub>	50	19.8
Dioxinas, ng/Nm <sup>3</sup> EQT	0.1	0.001

La disponibilidad reportada de las plantas Energos es de aproximadamente 90% (8.000 horas por año)<sup>21</sup>. La materia prima, capacidad anual y otra información sobre las siete plantas que operan se muestran en la Tabla 2.

TABLA 2 PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO DE PLANTAS ENERGOS<sup>20,22,25</sup>

Ubicación de la planta (Año de inicio)	Materia prima	Capacidad anual, toneladas (número de líneas)	Área aproximada de sitio*, m <sup>2</sup>	Energía térmica producida (MWh/año)	MWh, TH por tonelada	Inversión de capital, US\$ millones	Inversión por tonelada de capacidad anual (US\$)
Ranheim, Noruega (1997)	Rechazos de fábricas de papel + diversos residuos comerciales	10.000 (1)	N / A.	25.000	2,5	\$14	\$1.350
Averoy, Región Noruega-Nordmore (2000)	RSU + residuos comerciales	30000 (1)	6.000	69.000	2,3	\$31	\$1.033
Hurum, Noruega (2001)	RSU + residuos comerciales de aeropuerto + rechazos de papel	39.000 (1)	6.000	105.000	2,7	\$26	\$657
Minden, Alemania (2001)	RSU + RDF (residuos de papel y plástico)	39.000 (1)	6.000	105.000	2,7	\$26	\$673
Forus, Región Noruega-Stavanger (2002)	RSU post-reciclaje (18.000 toneladas) + residuos industriales (21.000 toneladas)	39.000 (1)	6.000	105.000	2,7	\$32	\$825
Sarpsborg #1, Noruega (2002)	RSU + residuos comerciales	78.000 (2)	9.000	210.000	2,7	\$41	\$525
Sarpsborg #2, Noruega (2010)	RSU + residuos comerciales	78.000 (2)	9.000	256.000	3,3	\$41**	\$525

\* El área del sitio ha sido estimado por el uso de los siguientes datos proporcionados por Energos: Área de sitio con una línea es de 6.000 metros cuadrados y el área de doble línea es de 9.000 metros cuadrados.

\*\* La inversión de capital para la planta Sarpsborg #2 se supone que es la misma para Sarpsborg #1.

Con los años, las plantas Energos reportan haber tratado más de 1,8 millones de toneladas de residuos post-reciclaje y producir 3.800 GWh de energía térmica en su mayoría. Estas plantas proporcionan calefacción urbana a las comunidades de acogida, así como vapor a las industrias



locales, incluyendo química, farmacéutica, papel y plantas de procesamiento de alimentos<sup>26</sup>. Por ejemplo, la planta Forus que abastece Stavanger, Noruega, es un sistema de cogeneración (CHP); durante los períodos de baja demanda de calor, el vapor se utiliza para producir electricidad que se vende a la red.

Como se muestra en la Tabla 2, estas plantas varían en capacidad anual de 10.000 a 78.000 toneladas. Como es de esperar, las plantas más pequeñas fueron las más costosas de construir, por tonelada de capacidad anual. La planta de Sarpsborg, con una capacidad de 78.000 toneladas por año, fue reportada por Energos a un costo de US \$525 por tonelada anual de capacidad, que se encuentra en el extremo más bajo del costo de capital de las instalaciones mucho más grandes de combustión de parrilla (alrededor de US \$600 por tonelada anual de capacidad). En el extremo inferior de la capacidad, la planta de Averoy cuesta alrededor de US \$1.000 por tonelada anual de capacidad.

### 3.3 PROCESO DE LECHO FLUIDIZADO EBARA

---

El proceso de Ebara (Figura 20) consiste en la combustión parcial de los RSU examinados y desmenuzados en un reactor de lecho fluidizado seguido de un segundo horno en el que el gas producido en el reactor de lecho fluidizado se quema para generar temperaturas de hasta 1,350°C de tal manera que la ceniza es vitrificada a escoria. No hay enriquecimiento de oxígeno. La mayor aplicación del proceso de Ebara es una planta en España de tres líneas de 900 toneladas por día.

El desbordamiento de cenizas del lecho fluidizado se separa de la arena utilizada en el reactor para la fluidización. La separación es por medio de una criba vibratoria inclinada con aberturas de 3-4 mm a través de la cual partículas de arena pueden atravesar, mientras que las partículas de vidrio y metal no pueden. Las cenizas de fondo en Japón no pueden ser utilizadas para aplicaciones tales como la construcción de carreteras y por lo tanto tienen que ser fundidas a escoria, que es el producto sólido final y se puede utilizar en la construcción. La planta española del proceso Ebara produce una red de cerca de 560 kWh por tonelada de RDF.

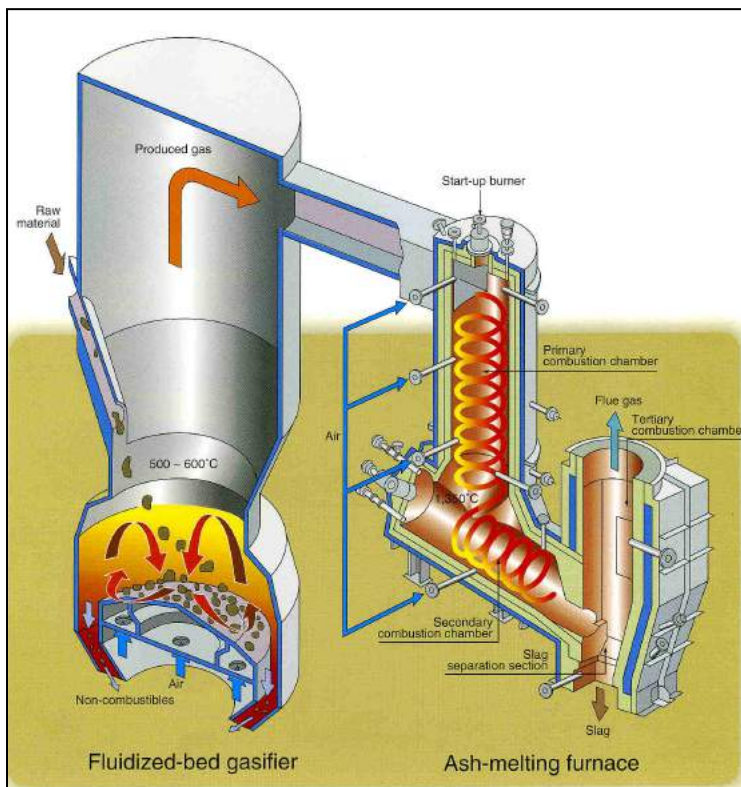
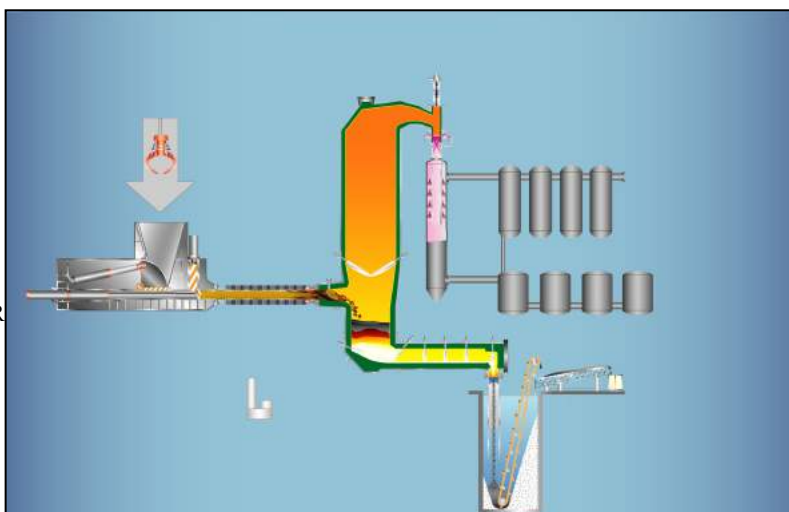


FIGURA 20 PROCESO DE GASIFICACIÓN DE LECHO FLUIDO EBARA<sup>27</sup>

### 3.4 PROCESO DE GASIFICACIÓN Y FUSIÓN THERMOSELECT

La empresa siderúrgica JFE de Japón opera muchas plantas que van desde la combustión de parrilla al proceso de fundición directa JFE descrito anteriormente, y también siete plantas JFE Thermostelect de una capacidad total de 2.000 toneladas por día. El gas de síntesis producido en el horno de Thermostelect (Figura 21) se apaga y limpia antes de su uso en turbinas de gas o motores para generar electricidad. La cantidad de gas de proceso por tonelada de RSU es mucho menor que en la combustión de parrilla convencional. Sin embargo, la limpieza de un gas reductor es más complejo que para gas de proceso de combustión. Además, el proceso Thermostelect utiliza parte de



la electricidad que genera para producir el oxígeno industrial utilizado para la oxidación parcial y la gasificación de los RSM. La expectativa es que el producto de gas de síntesis se puede quemar en una turbina de gas para generar electricidad a una eficiencia térmica mucho más alta que la posible en una planta de WTE convencional utilizando una turbina de vapor.

FIGURA 21 EL PROCESO DE GASIFICACIÓN THERMOSELECT<sup>28</sup>

### 3.5 PROCESO WTE ASISTIDO POR PLASMA

En los últimos años, ha habido un gran interés en la gasificación asistido por plasma de los RSU. Una antorcha de plasma es un dispositivo para la transformación de electricidad a calor haciendo pasar corriente a través de un flujo de gas (FIGURA 22).

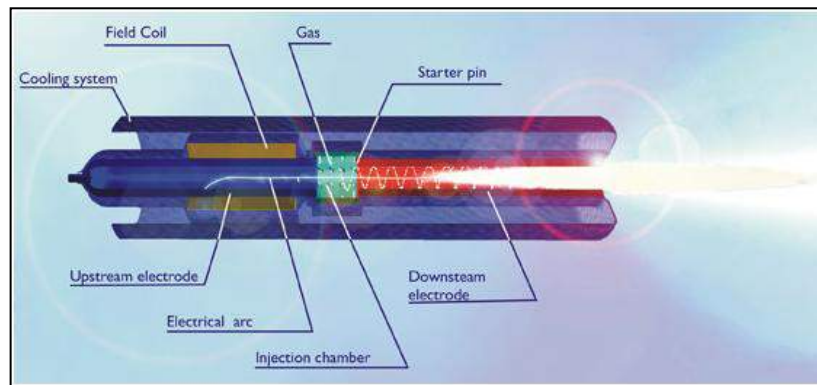


FIGURA 22 LA ANTORCHA DE PLASMA EUROPLASMA<sup>29</sup>

Un estudio de esta tecnología se llevó a cabo por el Earth Engineering Center y está disponible en la web<sup>29</sup>. La tecnología de plasma ha sido utilizado durante mucho tiempo para el recubrimiento de superficie y también para la destrucción de materiales peligrosos, como el amianto (Figura 23).

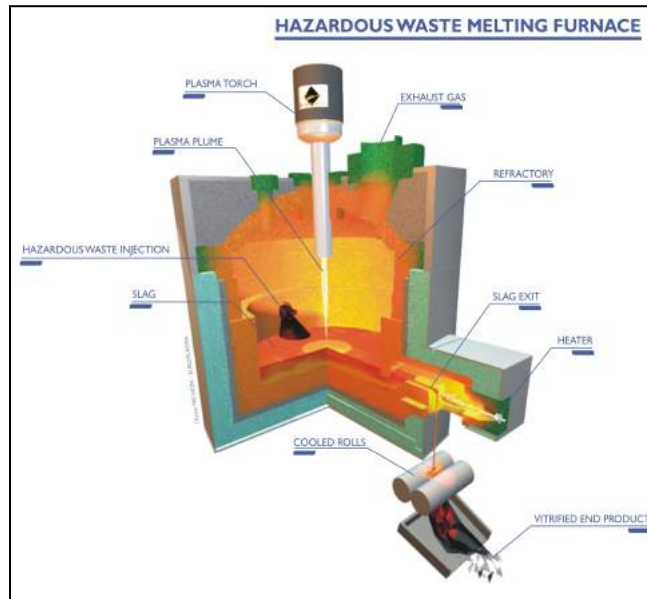


FIGURA 23 EL REACTOR EUROPLASMA PARA LA DESTRUCCIÓN DE MATERIALES QUE CONTIENEN AMIANTO<sup>29</sup>

En el caso de procesamiento de RSU, sopletes de plasma se utilizan para gasificar los sólidos, para romper los gases volátiles, y para vitrificar la ceniza a escoria y glóbulos de metal. El producto de gas de síntesis se quema en un motor de gas o un generador de turbina para producir electricidad o puede ser utilizado para producir combustibles sintéticos. Las tecnologías investigadas en el estudio del EEC fueron el Plasma Westinghouse, propiedad de Alter NRG, Plasco Energy Group, Europlasma, y el proceso InEnTec de Waste Management Inc. La principal ventaja frente a la combustión de parrilla es la dramática disminución en el flujo de gas de proceso, hasta el 75%. Además, la atmósfera reductora en el proceso de gasificación debe dar lugar a menores emisiones de NO<sub>x</sub> que en el proceso de combustión de parrilla. Sin embargo, este estudio demostró que el costo de capital por tonelada de capacidad fueron de la misma magnitud que en la combustión de parrilla. Debido al uso de la electricidad para la gasificación a alta temperatura, se espera que la producción de energía por tonelada de materia prima no será mayor que en el caso de la combustión en parrilla. Por ejemplo, se espera que el proceso de gasificación Alter NRG (Figura 24) se genere alrededor de 0,6 MWh/tonelada de DSM.

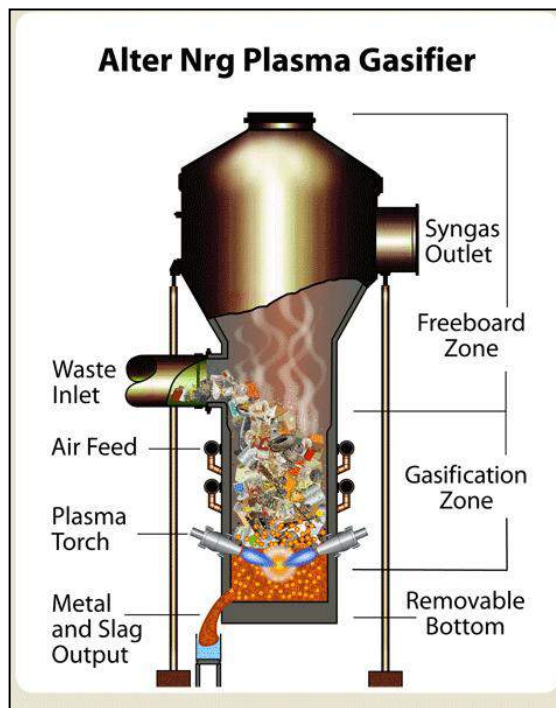


FIGURA 24 EL GASIFICADOR DE PLASMA ALTER NRG<sup>29</sup>

### 3.6 PIRÓLISIS

La pirólisis es el tratamiento térmico de residuos utilizando solamente energía externa, es decir, sin ninguna combustión significativa de los residuos. Por lo tanto, se requiere una inversión inicial mucho mayor de electricidad que la gasificación, donde parte del calor necesario para la gasificación es proporcionado por la combustión parcial de los desechos. Debido a este factor, la pirólisis no es adecuada, y no se ha aplicado a escala industrial, para el tratamiento de RSU que, como se ha señalado antes en este informe, contienen aproximadamente 2,8 MWh de energía química por tonelada de RSU. Sin embargo, la pirólisis se puede aplicar a los residuos plásticos separados en el origen que contienen aproximadamente 8 MWh de energía química por tonelada; Por lo tanto, parte de esa energía se pueden extender para la pirólisis de los residuos. En este momento, la mayoría de los residuos plásticos (90% en los EE.UU.) no se reciclan por razones prácticas; en lugar de ser vertidos, podrían ser quemados o sometidos a la pirólisis.

Varios procedimientos para la pirólisis de residuos plásticos han sido investigados por el Centro de Earth Engineering Center para la Flexible Packaging Association of America (FPA<sup>7</sup>) y algunos fueron encontrados a ser técnica y económicamente viables. Sin embargo, estos procesos no son adecuados para los RSU mezclados y no se discutirán más adelante en este informe.

### 3.7 APLICACIÓN DE DIVERSOS PROCESOS WTE EN JAPÓN

Se puede observar a partir de la discusión anterior, que Japón ha sido un líder en el desarrollo e implementación de tecnologías tradicionales y novedosas de tratamiento térmico. Esta nación genera unos 65 millones de toneladas de RSU, trata térmicamente a 40 millones de toneladas, y recicla el resto. La Tabla 3 se preparó para el BID Guía y enumera todos los tipos de tecnologías WTE utilizados en Japón. Se puede observar que a pesar de la abundancia de otras tecnologías, el 84% de los 37,8 millones de toneladas de RSU listados en la Tabla 3 se procesan en instalaciones de combustión de parrilla.

TABLA 3 TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO TÉRMICO UTILIZADAS EN JAPÓN

	Número de plantas	Todas las plantas, toneladas/día	Promedio de toneladas/día por planta	Porcentaje de capacidad WTE de Japón
Parrilla Martin de acción inversa (66 plantas)*	66	71.500	1.083	62%
Parrilla JFE Völund (Stoker; 54 plantas)*	54	10.100	187	9%
Parrilla horizontal Martin (14 plantas)*	14	7.454	532	7%
Fusión Directa Nippon Steel (28 plantas)	28	6.200	221	5%
JFE Hyper Grate (Stoker; 17 plantas)*	17	4.700	276	4%
Horno rotatorio (15 plantas)	15	2.500	167	2%
JFE Thermoselect (gasificación; 7 plantas)	7	1.980	283	2%
Todos los demás lechos fluidos (15 plantas)	15	1.800	120	2%
Lecho fluido Ebara(8 plantas)	8	1.700	213	1%
Fusión directa JFE (horno de cuba, 14 plantas)	14	1.700	121	1%
Lecho Fluido Hitachi Zosen (8 plantas)	8	1.380	173	1%
Lecho fluido JFE (lodo y RSU; 9 plantas)	9	1.300	144	1%
Otras de fusión directa (9 plantas)	9	900	100	1%
Fisia Babcock (2 forward, 1 parrilla de rodillos)*	3	710	237	1%
Parrilla enfriada por aire Babcock & Wilcox (43)*	43	690	16	1%
<b>Total</b>	<b>310</b>	<b>114.614</b>		<b>100%</b>
Total de toneladas/año (a 330 días-24h/año)		37.822.620		
% total de RSU que van a plantas de combustión de parrilla*				84%

\*Plantas de combustión por parrilla

En el cierre de la sección de gasificación, cabe señalar que a menudo se asume que los procesos de gasificación encontrarán menos resistencia por grupos ambientalistas que se oponen a la "incineración", es decir, la combustión de parrilla con recuperación de energía. De hecho, en el pasado reciente, los mismos grupos se han opuesto a la gasificación, que ellos llaman "la incineración encubierta".

### 3.8 COMPARACIÓN PRELIMINAR DE OTRAS OPCIONES WTE

---

La selección de la opción óptima de gestión de los residuos y, en concreto para nuestro caso, la opción óptima WTE depende en gran medida de las características específicas de la zona de interés, en función de las cantidades de residuos y las propiedades, necesidades de energía y precios, la disponibilidad de fondos, etc.

Para cualquier caso se presenta a continuación una evaluación preliminar y cualitativa de las alternativas de tecnologías WTE con el fin de ser utilizado como una "regla de oro" en general al examinar las posibilidades de las tecnologías WTE aplicadas.

Para este propósito, la metodología de análisis FODA (Fortalezas - Debilidades - Oportunidades - Amenazas) se utiliza para el análisis de la evaluación comparativa de las tecnologías alternativas WTE utilizando los siguientes criterios:

- Criterios técnicos
  - Capacidad para tratar diversos flujos de residuos - especificaciones para los residuos a tratar - requisitos de pre-tratamiento - los requisitos en relación con la gestión de residuos aguas arriba
  - Cantidad de energía que debe recuperarse
  - Referencias a nivel internacional
  - Riesgos de Implementación
  
- Los criterios ambientales
  - Emisiones atmosféricas previstas
  - Contribución a la reducción del calentamiento global
  - Generación de aguas residuales
  - Generación de residuos sólidos y peligrosos
  
- Los criterios sociales
  - Aceptabilidad por parte de los ciudadanos/autoridades
  
- Criterios financieros
  - Costo de Inversión
  - Costo de operación
  - Ingresos
  - Tasa de entrada esperada

Se hace notar que la lista de los criterios antes mencionados no es exhaustiva y se refiere explícitamente a la comparación de plantas WTE alternativas. La lista de criterios debe en cualquier caso ser adaptada (por ejemplo, criterios adicionales deben ser utilizados) al comparar las alternativa de sistemas de gestión de residuos o tecnologías que tienen como objetivo apuntar a productos secundarios diferentes (por ejemplo, TMB o instalaciones de reciclaje).

Sobre la base de los criterios, se evalúan las tecnologías WTE básicas, a saber:

- Incineración de residuos convencionales
- Gasificación
- Pirólisis
- Plasma

Los resultados básicos de esta evaluación para cada grupo de criterios se presentan en la siguiente tabla.

TABLA 4 ANÁLISIS FODA PARA LAS ALTERNATIVAS DE TECNOLOGÍAS WTE

	<b>Fortalezas</b>	<b>Debilidades</b>	<b>Oportunidades</b>	<b>Amenazas</b>
<b>CRITERIO TÉCNICO</b>				
Incineración	<p>Puede tratar múltiples flujos de residuos, sin grandes exigencias en cuanto a las propiedades de entrada, a excepción de la reducción de la humedad</p> <p>Genera cantidades significativas de energía</p> <p>Tecnología completamente referenciada e implementada, con un conocimiento técnico y operación bien desarrollados</p>	<p>Flujos de residuos de bajo poder calorífico reducen la eficiencia de la planta</p> <p>Pequeñas cantidades de energía producida en comparación con otras tecnologías</p>	<p>Puede ser utilizado para el tratamiento de residuos peligrosos / infecciosos</p> <p>Aumento de la eficiencia energética en caso de que el calor producido se pueda utilizar también</p>	<p>Posible reducción significativa de las cantidades de entrada de residuos puede generar problemas técnicos</p> <p>Unidades industriales de energía intensivas (por ejemplo, fábricas de cemento o plantas de energía) son competidores para el aprovechamiento de residuos</p>
Gasificación	<p>Puede tratar múltiples flujos de residuos</p> <p>Genera cantidades significativas de energía, superior a otras tecnologías</p> <p>Más referencias que otras tecnologías no convencionales</p> <p>Conocimiento técnico recientemente aumentado</p>	<p>No hay experiencia a gran escala con los residuos municipales mezclados</p> <p>Problemática en el tratamiento de los residuos con alta humedad (lodos)</p>	<p>Un mayor desarrollo se espera que en el futuro - ha venido desarrollando con una alta tasa en los últimos años</p>	<p>Cambios significativos en la composición de valor calórico/residuos afecta la eficiencia</p> <p>Aparición de limitación técnica no se considera inicialmente</p> <p>Unidades industriales de energía intensivas (por ejemplo, fábricas de cemento o plantas de energía) son competidores para el aprovechamiento de residuos</p>



	<b>Fortalezas</b>	<b>Debilidades</b>	<b>Oportunidades</b>	<b>Amenazas</b>
Pirólisis	<p>Puede tratar múltiples flujos de residuos</p> <p>Genera cantidades significativas de energía, superior a otras tecnologías</p> <p>Bien desarrollado para los flujos de residuos especiales (por ejemplo, los neumáticos)</p>	<p>La tecnología emergente sobre todo en relación con los RSU mezclados para los que no existen experiencias a escala real</p> <p>Exige actividades de pre-tratamiento (por ejemplo trituración, tamizado)</p> <p>Problemática en el tratamiento de los residuos con alta humedad (lodos)</p> <p>Pequeñas cantidades de energía producida en comparación con otras tecnologías</p> <p>Relativamente pequeña experiencia sobre el funcionamiento y los resultados de este tipo de instalaciones</p> <p>La incertidumbre en relación con las tasas de eficiencia y las limitaciones técnicas</p>	<p>Implementado con mayor facilidad en cantidades pequeñas de residuos</p> <p>Se espera que esté mas desarrollada en el futuro</p>	<p>Aparición de limitación técnica no se considera inicialmente</p> <p>Unidades industriales de energía intensivas (por ejemplo, fábricas de cemento o plantas de energía) son competidores para el aprovechamiento de residuos</p>
Plasma	<p>Cuenta con los menores requisitos de pretratamiento en relación con los residuos de entrada</p> <p>Genera cantidades significativas de energía, superior a otras tecnologías</p>	<p>Los tecnología menos desarrollados e implementada, especialmente en relación a los RSU</p> <p>Bajo nivel de experiencia a nivel internacional</p> <p>La incertidumbre en relación con las tasas de eficiencia y las limitaciones técnicas</p> <p>Importantes necesidades energéticas</p>	<p>Posiblemente puede tratar múltiples flujos de residuos</p>	<p>El alto costo puede limitar su desarrollo</p> <p>Aparición de limitación técnica no se considera inicialmente</p> <p>Unidades industriales de energía intensivas (por ejemplo, fábricas de cemento o plantas de energía) son competidores para el aprovechamiento de residuos</p>
<b>CRITERIO AMBIENTAL</b>				
Incineración	<p>Existen sistemas de depuración de aire y tratamiento de aguas residuales completamente modernizadas. contribución significativa a la reducción del efecto invernadero a través de la producción de energía a partir de combustibles no fósiles</p>	<p>Emisiones significativas al aire, los cuales necesitan ser disminuidas</p> <p>Cantidades de aguas residuales significativas, que necesitan ser tratadas</p> <p>Generación de residuos sólidos y peligrosos que necesitan ser gestionados</p>	<p>El desempeño ambiental se mejora sustancialmente cuando también se utiliza la energía térmica</p>	<p>La gestión de los residuos peligrosos es problemático y aumenta el costo de operación</p> <p>Incluso las cenizas de fondo pueden ser demostradas a ser peligrosas</p>
Gasificación	<p>Emisiones pequeñas (emisiones al aire y aguas residuales) en comparación con la incineración</p>	<p>Generación de residuos sólidos y peligrosos que necesitan ser gestionados</p>		<p>La gestión de los residuos peligrosos es problemático y aumenta el costo de operación</p>

	Contribución significativa a la reducción del efecto invernadero a través de la producción de energía a partir de combustibles no fósiles			Incluso el residuo inicialmente considerado no-peligroso puede ser demostrado ser de hecho peligroso
	<b>Fortalezas</b>	<b>Debilidades</b>	<b>Oportunidades</b>	<b>Amenazas</b>
Pirólisis	Emisiones pequeñas (emisiones al aire y aguas residuales) en comparación con la incineración  Contribución significativa a la reducción del efecto invernadero a través de la producción de energía a partir de combustibles no fósiles	Generación de residuos sólidos y peligrosos que necesitan ser gestionados		La gestión de los residuos peligrosos es problemático y aumenta el costo de operación  Incluso el residuo inicialmente considerado no-peligroso puede ser demostrado ser de hecho peligroso
Plasma	Emisiones pequeñas (emisiones al aire y aguas residuales) en comparación con la incineración  Contribución significativa a la reducción del efecto invernadero a través de la producción de energía a partir de combustibles no fósiles	Dado que esta tecnología no se ha implementado en gran escala, puede haber efectos ambientales que no son conocidos		Las reducidas emisiones a la atmósfera no están totalmente probadas y referenciadas
<b>CRITERIO SOCIAL</b>				
Incineración	Las autoridades están empezando a considerar el agua como una solución alternativa de tratamiento de residuos, especialmente para las zonas altamente urbanizadas y las megaciudades	Recepción relativamente negativo de WTE por parte de los ciudadanos  Actitud problemática por los recicladores del sector informal	La percepción social negativa de WTE parece estar cambiando a nivel internacional, especialmente cuando se asocia con beneficios para el cambio climático	Otros interesados en la gestión de residuos, incluidas las industrias que utilizan residuos pueden reaccionar con la aplicación WTE  El desarrollo de nuevas tecnologías WTE comunicadas como "tecnologías limpias" pueden afectar el nivel de aceptación de la incineración
Gasificación	Las autoridades están empezando a considerar el agua como una solución alternativa de tratamiento de residuos - sin embargo, su falta de referencias comerciales sigue siendo un problema	La renuencia en aceptar debido al hecho de que esta es una tecnología relativamente nueva	La percepción social negativa en WTE parece estar cambiando a nivel internacional	En la mente de los ciudadanos esta tecnología es similar a la incineración de residuos
Pirólisis	Las autoridades están empezando a considerar el agua como una solución alternativa de tratamiento de residuos - sin embargo, su falta de referencias comerciales sigue siendo un problema	La renuencia en aceptar debido al hecho de que esta es una tecnología relativamente nueva	La percepción social negativa en WTE parece estar cambiando a nivel internacional	En la mente de los ciudadanos esta tecnología es similar a la incineración de residuos

Plasma		La renuencia en aceptar debido al hecho de que esta es una tecnología relativamente nueva	Es comunicada a ser la tecnología WTE "más limpia"  La percepción social negativa en WTE parece estar cambiando a nivel internacional	En la mente de los ciudadanos esta tecnología es similar a la incineración de residuos
--------	--	---	---	--

	Fortalezas	Debilidades	Oportunidades	Amenazas
<b>CRITERIO FINANCIERO*</b>				
Incineración	Inversión unitaria y costo de operación más pequeño en comparación con otras tecnologías de WTE  Se esperan ingresos por el comercio de energía	Costo de la inversión parece siempre alto en comparación con otras alternativas como los vertederos y TMB	Los beneficios se maximizan si la ubicación del sitio proporciona gastos de recolección reducidos  Aprovechamiento de la energía térmica aumenta los ingresos y la viabilidad  Se espera que los ingresos aumenten en caso de que parte de los residuos tratados se considere renovable  El alto nivel de competencia entre tecnologías WTE puede disminuir el costo de inversión	Muy sensible a la reducción significativa de la cantidad de residuos
Gasificación	Se esperan ingresos por el comercio de energía	Costos de inversión y operación muy altos resultando en el aumento de las tasas de compuerta	Se espera que los ingresos aumenten en caso de que parte de los residuos tratados se considere fuente renovable	
Pirólisis	Se esperan ingresos por el comercio de energía	Costos de inversión y operación muy altos resultando en el aumento de las tasas de compuerta	Dado que no existen unidades de gran escala para RSU, el coste real de la inversión puede ser menor.  Se espera que los ingresos aumenten en caso de que parte de los residuos tratados se considere fuente renovable de energía y los instrumentos de política que promueven la producción de energía renovable están en su lugar	
Plasma	Se esperan ingresos por el comercio de energía	Costos de inversión y operación muy altos resultando en el aumento de las tasas de compuerta	Se espera que los ingresos aumenten en caso de que parte de los residuos tratados se considere fuente renovable de energía y los instrumentos de política que promueven la producción de energía renovable están en su lugar	

\* *The financing elements of WTE plants are further analyzed in section 5.1 and 5.13*

Sobre la base de la evaluación anterior los tomadores de decisiones pueden tener una idea preliminar de los pros y los contras de cada tecnología y basarse en las características específicas de la zona de interés para seleccionar la solución óptima.

Por ejemplo:

- Ventajas de incineración de residuos incluyen:
  - Posibilidad de tratar varias corrientes de desechos
  - La enorme experiencia y conocimientos de los sistemas internacionales de la gran cantidad de plantas que ya operan
  - Coste menor en comparación con otras tecnologías WTE
  - Cantidad significativa de energía producida
  - Bajo nivel de incertidumbre tras su puesta en práctica

Los principales puntos débiles de la tecnología son la generación de residuos peligrosos, así como la percepción pública negativa hacia la incineración de residuos.

- Ventajas de gasificación de residuos incluyen:
  - Aumento de la cantidad de energía producida
  - Nivel relativamente bajo de incertidumbre tras su puesta en práctica
  - Experiencia relativamente aceptable y conocimiento internacional de las varias plantas que ya operan
  - El gran desarrollo que presenta en los últimos años

Los principales puntos débiles de la tecnología son el costo relativamente superior, así como la generación de residuos peligrosos.

- Ventajas de la pirólisis de residuos incluyen:
  - Mayor cantidad de energía producida
  - El desarrollo que presenta en los últimos años siendo una tecnología emergente

El principal punto débil de la tecnología son los importantes requerimientos pre-tratamiento, el bajo nivel de experiencia internacional de la aplicación de esta tecnología sobre todo en altas capacidades, que dan lugar a una gran cantidad de incertidumbre tras su aplicación, el costo relativamente más alto, así como la generación de residuos peligrosos.

- La tecnología de plasma es una tecnología muy nueva sólo recientemente desarrollada en baja escala en el tratamiento de residuos. Su bajo nivel de ejecución aumenta la

incertidumbre para su aplicación y especialmente en relación con su rendimiento (por ejemplo, sobre la energía producida y emisiones al aire). Si, después de su aplicación en mayor escala, su rendimiento resulta ser similar al presentado por sus proveedores, esta tecnología puede ser interesante para el futuro, a pesar del hecho de que cada uno de los costos son relativamente altos.

## 4. EL ESTADO ACTUAL DE LA TECNOLOGÍA WTE

La Tabla 5 resume las tecnologías de WTE presentadas en las secciones anteriores, junto con sus capacidades estimadas y locaciones a través del mundo. Apéndice 3 en la web ([www.WTErt.org](http://www.WTErt.org). Lista Maestra de plantas WTE) enlista más de 800 plantas WTE operando a nivel mundial; su capacidad anual total se estima en alrededor de 195 millones de toneladas. Esta lista muestra que 230 nuevas plantas WTE comenzaron a operar en los años 2000-2011.

La Tabla 6 muestra 105 plantas que fueron construidas desde el 2000 o se encuentran bajo construcción en 22 naciones, basadas en una de la tecnologías de combustión en parrilla disponibles.

TABLA 5 MATERIA PRIMA, PRODUCTO DE ENERGÍA, Y CAPACIDAD TOTAL DE LAS TECNOLOGÍAS WTE EXISTENTES

Proceso WTE	Materia Prima	Producto energético	Estimación* de capacidad anual, toneladas	Continentes/Paises donde se aplican
Combustión en parrilla móvil	RSU tal como se reciben	Vapor de alta presión	<168 millones	Asia, Europa, América
Combustión de horno rotatorio	RSU tal como se reciben	Vapor de alta presión	>2 millones	Japón, EE.UU., U.E.
Energy Answers Process (SEMASS)	RSU triturado	Vapor de alta presión	>1 millones	EE.UU.
RDF para la combustión de parrilla	RSU triturado y clasificado	Vapor de alta presión	>5 millones	EE.UU., U.E
Lecho fluidizado circulante	RSU o RDF triturado	Vapor de alta presión	>11 millones	China, Europa
Lecho fluidizado Ebara	RSU o RDF triturado	Vapor de alta presión	>0,8 millones	Japón, Portugal
Lecho fluidizado burbujeante	RSU o RDF triturado	Vapor de alta presión	>0,2 millones	EE.UU.
Tratamiento biomecánico (TMB o TBM)	RSU triturado y bioreaccionado	RDF para los hornos de cemento y las centrales eléctricas de carbón	>5 millones	U.E.
Proceso de fundición directa	RDF	Vapor de alta presión	>0,9 millones	Japón
Gasificación Thermoselect	RSU tal como se reciben	Gas de síntesis (CO, H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> )	>0,8 millones	Japón
Gasificación asistida por plasma	RSU triturado	Gas de síntesis (CO, H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> )	>0,2 millones	Canada, Japón, Francia
Capacidad Global de WTE			<195 millones	

*\*Basado en los datos compilados por el Earth Engineering Center of Columbia University (earth@columbia.edu)*

**TABLA 6 HORNOS WTE CONSTRUIDOS DESDE EL AÑO 2000 UTILIZANDO LAS TECNOLOGÍAS DE COMBUSTIÓN DE PARRILLA MARTIN**

<b>Año de inicio</b>	<b>País</b>	<b>Nombre de la Planta</b>	<b>Numero de líneas</b>	<b>Rendimiento (toneladas/día)</b>	<b>Capacidad térmica (MWh/h)</b>
2000	Italia	Busto Arsizio	2	504	61
2000	Japón	Iwaki-Nambu	3	390	53
2002	Japón	Tsushima-Yatomi	3	330	48
2000	Francia	Toulouse	2	547	61
2001	Francia	Metz	2	384	41
2001	Francia	Lille	3	1044	111
2004	Japón	Nagoya-Gojougawa	2	560	81
2002	Japón	Koochi	3	600	79
2001	China	Shanghai-Pudong	3	1094	77
2001	Japón	Ryuusen-En	3	317	43
2001	Francia	Melun	2	384	44
2001	Bélgica	Thumaide	2	768	76
2001	Corea del Sur	Kang Nam	3	900	87
2001	Corea del Sur	Jang-Yu	1	199	16
2001	Suiza	Fribourg	1	384	40
2001	Suecia	Göteborg	1	396	45
2003	Japón	Hiroshima-Naka	3	600	78
2002	Japón	Otokuni	1	75	11
2003	Alemania	Mainz 1-2	2	734	89
2002	Francia	Belfort	2	296	31
2001	Corea del Sur	Incheon	2	500	56
2001	Corea del Sur	Guri	2	200	21
2002	Italia	Piacenza	2	360	45
2002	Japón	Tokyo-Itabashi	2	600	84
2002	Eslovaquia	Bratislava	2	524	50
2003	Suecia	Malmö	1	600	87
2002	Japón	Hitoyoshi	2	91	10
2004	Austria	Arnoldstein	1	260	30
2002	Japón	Niihama	3	202	28
2002	Francia	Villefranche sur Saône	1	156	17
2002	Francia	Villefranche sur Saône	1	108	12
2002	Reino Unido	Chineham	1	288	31

2004	Francia	Villers Saint Paul	2	480	53
2003	Francia	Nîmes	1	336	36

<b>Año de inicio</b>	<b>País</b>	<b>Nombre de la Planta</b>	<b>Numero de líneas</b>	<b>Rendimiento (toneladas/día)</b>	<b>Capacidad térmica (MWh/h)</b>
2004	Francia	Le Havre	2	576	61
2003	Suiza	Monthey	1	291	38
2003	Japón	Tochigi	2	237	34
2005	Japón	Sendai	3	600	86
2004	Taiwán	Taichung-Wujih	2	900	100
2003	Francia	Toulouse	2	480	54
2004	España	Bilbao	1	720	71
2004	Reino Unido	Marchwood	2	576	61
2004	Rusia	Moscow	1	200	15
2004	Italia	Brescia	1	552	100
2004	Italia	Trieste III	1	204	22
2004	China	Bing Jiang	3	450	39
2005	Taiwán	Lihster	2	600	67
2005	Austria	Wels	1	576	80
2004	Francia	Est Anjou	1	360	35
2005	Japón	Miyazaki	3	579	73
2006	Japón	Kagoshima	2	530	61
2005	China	Tongxing	2	1320	97
2005	Reino Unido	Portsmouth	2	576	61
2005	China	Guangzhou Likeng	2	900	78
2007	Alemania	Zella-Mehlis	1	518	60
2006	Corea del Sur	Jeon Ju	2	400	54
2005	Reino Unido	Sheffield	1	672	72
2007	Países Bajos	Amsterdam	2	1612	187
2006	Taiwán	Miaoli	2	500	56
2005	Francia	Châlons en Champagne	1	360	35
2007	Francia	Toulouse	1	240	31
2006	China	Zhongshan	2	700	65
2009	Suiza	Zürich-Hagenholz, 2K1/2K3	2	920	96
2009	Suiza	Giubiasco	2	644	67
2007	EE.UU.	Lee County, FL	1	635	69
2006	China	Zhongshan	1	350	32



2007	Francia	Avignon	1	211	21
2007	Francia	Bourgoin Jallieu	2	528	64
2007	China	Fuzhou	2	1320	97
2008	Suecia	Malmö	1	696	90
2008	Macao	Macao	3	864	71
<b>Año de inicio</b>	<b>País</b>	<b>Nombre de la Planta</b>	<b>Numero de líneas</b>	<b>Rendimiento (toneladas/día)</b>	<b>Capacidad térmica (MWh/h)</b>
2008	Francia	Marseille	2	960	126
2007	Italia	Pozzilli (ENERGONUT)	1	322	50
2008	Países Bajos	Twente-Hengelo	1	792	92
2008	Italia	Padova	1	375	44
2008	Alemania	Mainz 3	1	427	48
2009	Bélgica	Thumaide	1	317	39
2009	EE.UU.	Hillsborough County, FL	1	544	65
2010	República Checa.	Brno	2	672	86
2010	Países Bajos	Dordrecht	1	720	75
2010	Suecia	Göteborg	1	377	44
2009	Reino Unido	Nottingham	2	562	54
2010	China	Baoding	2	1200	97
2010	Reino Unido se (Jersey)	Jersey	2	360	38
2012	Suiza	Winterthur	1	324	38
2011	China	Chengdu, Phase II	3	1800	146
2011	China	Foshan Nanhai	3	1500	122
2011	EE.UU.	Honolulu	1	997	106
2011	Bélgica	Thumaide	1	317	39
2012	Suiza	Bern	1	480	57
2011	Corea del Sur	Asan	1	200	29
2011	azerbaidjan	Baku	2	1584	156
2011	China	Dongguan	3	1800	146
2011	Francia	Arques	1	300	33
2012	China	Langfang	2	1000	78
2012	China	Taizhou City	2	1000	75
2012	Italia	Torino	3	1855	206
2012	China	Yuxi	2	400	32
2012	China	Taixing	1	300	24
2012	Italia	Bozen	1	509	59

2012	China	Cangzhou	2	800	65
2013	Suecia	Brista 2	1	864	80
2013	China	Shijiazhuang	2	1000	81
2013	China	Fengsheng	3	1800	146
2013	Dinamarca	Roskilde KN6	1	720	81
2013	Estonia	Tallinn	1	660	80

La parrilla de combustión se utiliza no sólo en aplicaciones a gran escala, sino también en pequeñas plantas WTE que sirven a comunidades tan pequeñas como de 10.000 habitantes. La

Figura 25 se basa en un análisis con datos recopilados el año 2004 por la Asociación Internacional de Residuos Sólidos (International Solid Wastes Association, ISWA)<sup>30</sup> de 332 instalaciones WTE en Europa. Las capacidades de planta de estas instalaciones se dividieron en segmentos de 0-50.000, 50.000-100.000 toneladas, etc., y los resultados se representan gráficamente en la

Figura 25 en la forma de número de plantas vs rango de capacidad. La

Figura 25 muestra que 85 plantas (26% del total de encuestados) tienen una capacidad anual de menos de 50.000 toneladas (aproximadamente los residuos sólidos urbanos generados por alrededor de 125.000 personas) y un número igual tiene una capacidad anual de entre 50.000 y 100.000 toneladas. La capacidad acumulativa de estas 332 plantas era de unos 50 millones de toneladas de material de alimentación de combustión (línea continua en la

Figura 25).

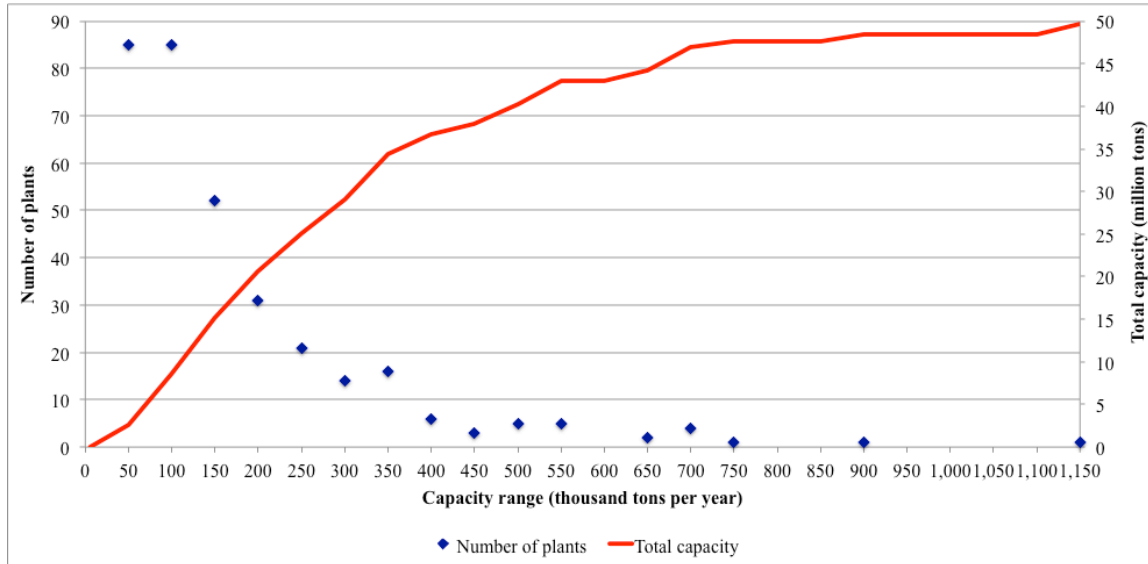


FIGURA 25 NÚMERO DE PLANTAS VS CAPACIDAD DE LA PLANTA EN EUROPA (ISWA, DATOS DE 2004) (EEC)

Es obvio a partir de la discusión anterior y también del Apéndice 3 que la mayoría de las plantas WTE existentes y en construcción han adoptado la tecnología de combustión de parrilla. Las razones para el dominio global de la tecnología de combustión de parrilla son los siguientes:

**Simplicidad de operación:** La combustión de la parrilla es un proceso totalmente automatizado, con la excepción de los dos operadores de grúas que alimentan las tolvas del horno de combustión; incluso esta parte se ha automatizado en algunas plantas WTE muy recientes.

**Alta disponibilidad de la instalación:** La combustión de parrilla se ha desarrollado a lo largo de medio siglo y la experiencia industrial acumulada ha llevado a una mejora continua de los equipos y métodos operativos. Esto, además de su simplicidad de funcionamiento, se ha traducido en un número relativamente bajo de mantenimiento y tiempo de inactividad de las instalaciones de combustión de parrilla. Varios proveedores de hornos de combustión de parrilla garantizan más de 8.000 horas de funcionamiento en un año, es decir, más del 90% de disponibilidad de la planta. Desde el reembolso del costo de capital es el elemento de mayor costo por tonelada de DSM procesado, este es un factor muy importante y que debe ser verificado por los clientes potenciales mediante la examinación de los registros de funcionamiento de las instalaciones existentes de la tecnología propuesta.

**Necesidades de personal y de formación:** Los dos factores anteriores han dado como resultado el hecho de que una instalación de combustión de parrilla que consta de tres hornos paralelos (líneas) y la combustión de 960 toneladas por día cada uno (40 toneladas/hora por línea) requiere un personal a tiempo completo de alrededor de 60 personas. Además, la existencia de operaciones del mismo tipo en otros lugares de otras naciones permite bastante fácilmente la formación de personal en los países que introducen WTE por primera vez.

Los factores anteriores explican la dificultad de introducir nuevas tecnologías WTE, especialmente para las plantas a gran escala, donde la inversión de capital y el riesgo financiero son muy altos. Sin

embargo, la alta disponibilidad de las instalaciones de combustión de parrilla se debe en parte a su muy generoso dimensionamiento y el correspondiente alto coste de capital de las plantas WTE, en comparación con las plantas eléctricas de carbón, por tonelada de material en combustión o por MWh de electricidad generada. Por lo tanto, menor coste de capital por tonelada de RSU procesados es el área en que la gasificación y otras nuevas tecnologías de tratamiento térmico tienen la oportunidad de competir con éxito con la combustión de parrilla, el caballo de batalla de la industria mundial de WTE.

Las nuevas tecnologías de WTE afirman menores emisiones que la combustión de parrilla, pero hay una necesidad de datos reales de funcionamiento de tales plantas para respaldar estas afirmaciones. El Earth Engineering Center ha examinado los datos de funcionamiento de más de doscientas instalaciones de combustión de parrilla y estaban en el orden de 0,02 nanogramos por metro cúbico de EQT estándar, que corresponde a sólo 0,1 gramos de dioxinas equivalentes tóxicos emitidos por cada millón de toneladas de RSU procesados. Plantas de gasificación pueden lograr muy bajas emisiones de óxido de nitrógeno, pero muy bajas emisiones de NOx también pueden ser obtenidos por instalaciones de combustión de parrilla que utilizan la reducción catalítica selectiva (selective catalytic reduction (SCR)) o el proceso de Very Low NOx (VLN) desarrollado por Covanta Energy y Martin GmbH.

Una clara ventaja de los procesos de gasificación es su capacidad para vitrificar la ceniza y esto explica el gran número de tales plantas en Japón (Tabla 3). Sin embargo, incluso en Japón, las plantas de capacidad sobre 500 toneladas/día utilizan hornos de combustión de parrilla respaldados por un segundo horno de vitrificación de cenizas. Además, el proceso de combustión de parrilla Syncom, aplicada en Sendai, Japón, y Arnoldstein, Austria utiliza aire enriquecido con oxígeno para producir una ceniza semi-vitrificada.

Aunque la combustión de parrilla es la tecnología WTE dominante en este momento, nuevos procesos WTE están en constante avance y una alternativa que requiera menos capital que la combustión de parrilla puede emerger. Por lo tanto, se recomienda que las solicitudes municipales de propuestas para el tratamiento térmico de los RSU incluyan las tecnologías más antiguas y nuevas, siempre que cumplan los criterios de rendimiento necesarios descritos más adelante en esta Guía.

## 5. PLANIFICACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLANTA WTE

---

Esta guía fue preparada específicamente para las naciones en desarrollo donde las plantas WTE no se han aplicado ampliamente. Plantas WTE requieren una gran inversión y deben tener un riesgo lo más bajo posible. Por lo tanto, las siguientes secciones de esta guía se basan en la aplicación de una tecnología ampliamente probada: La combustión de RSU-“tal como se reciben” en una parrilla móvil con recuperación de energía.

## 5.1 APLICABILIDAD DE LAS PLANTAS WTE

Teniendo en cuenta que los costes de inversión de la incineración son entre 500-1.000 US\$/tonelada de residuos (o incluso hasta 2.000 US\$/ton, como se indica por el Banco Mundial), y el costo de operación entre 50-200 €/ton y por lo tanto, es evidente que tanto la inversión y los costos operativos son una gran barrera para la implementación.

Es interesante analizar la implementación de plantas WTE teniendo en cuenta el PIB de cada país. Con el fin de evitar fuertes limitaciones de los datos y deficiencias para los países de la muestra, 34 países se tomaron como una muestra más representativa y una gráfica que correlaciona el PIB/cápita del año 2010 y la incineración se construyó y se presenta a continuación (datos del PIB se derivan de Banco Mundial, los datos de incineración de residuos de Eurostat para los países de la UE, la USEPA para EE.UU., y [www.waste-management-world.org](http://www.waste-management-world.org)).

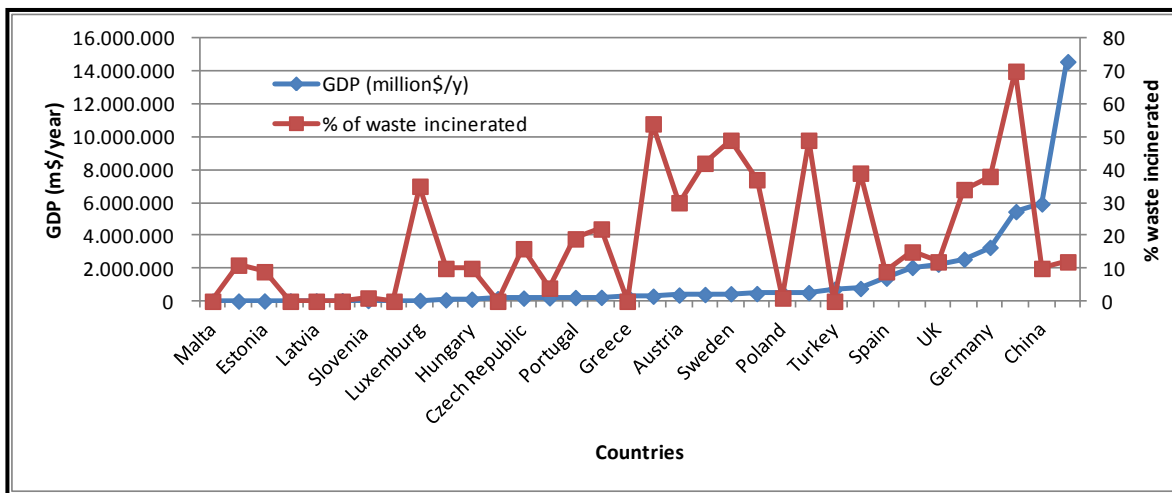


FIGURA 26 CORRELACIÓN ENTRE PIB/AÑO Y LA APLICACIÓN DE LA INCINERACIÓN DE RESIDUOS (EEC)

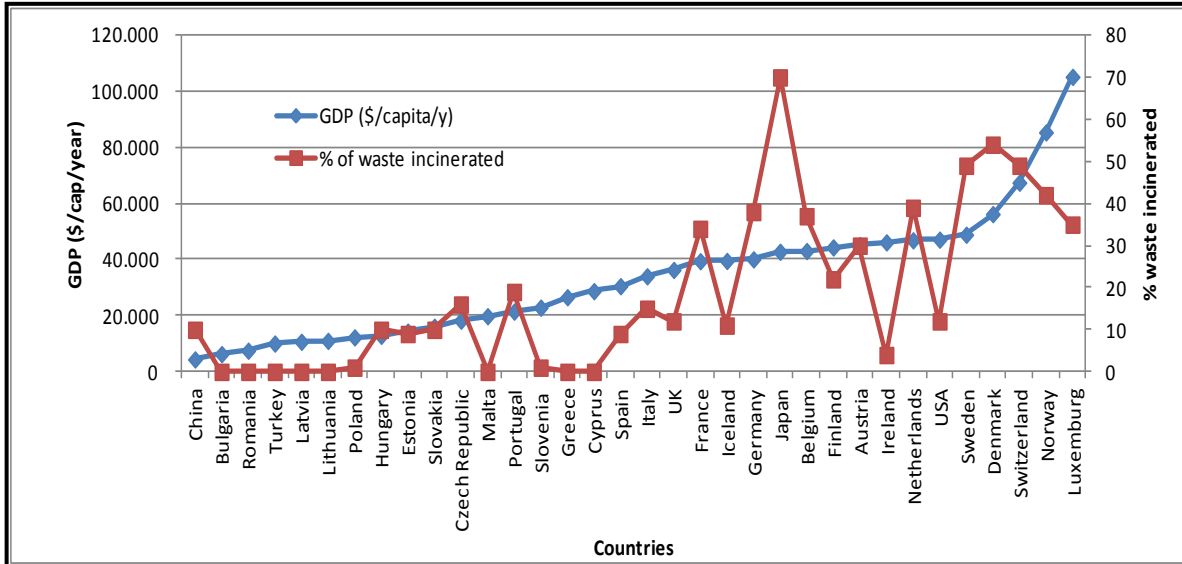


FIGURA 27 CORRELACIÓN ENTRE EL PIB/CÁPITA Y LA APLICACIÓN DE LA INCINERACIÓN DE RESIDUOS (EEC)

Se desprende de la figura anterior, que existe una correlación positiva entre el crecimiento del PIB y la incineración: cuanto más el PIB mayor la incineración. En principio, hay un límite de 100 b\$/año o 15.000US\$/cápita/año del PIB donde la incineración de residuos se ha implementado en un porcentaje superior al 10% de los residuos generados. Esta tasa se incrementa en los países que presentan un mayor PIB (por ejemplo, EE.UU., Alemania, Dinamarca, etc.).

El papel del PIB, como se indica con los gráficos anteriores, es más que crucial para el desarrollo de sistemas WTE. La mayor parte de los problemas actuales de WTE en países de bajos ingresos están directamente relacionados con la falta de recursos sustanciales, tanto para la construcción como para la operación de instalaciones WTE. Un crecimiento sustancial del PIB se traducirá en un contexto social diferente de esos países y por lo tanto un sistema de gestión de residuos diferente.

Habiendo descrito la correlación entre la aplicación de WTE y el PIB tal como aparece en los países donde se han desarrollado instalaciones WTE, condiciones previas de aplicabilidad adicional deben ser consideradas al momento de decidir si una planta WTE es adecuada para una región específica. Estas condiciones previas incluyen:

- **Cantidad de residuos a entrar en la planta WTE:** La experiencia internacional ha demostrado que las economías de escala dictan que para que una planta WTE sea viable su capacidad debe tener una alta capacidad. El siguiente gráfico (DEFRA, 2007) presenta los costos de la planta WTE para varias capacidades en forma de tasas de puerta (las tarifas incluyen tanto la financiación y los costos de operación).

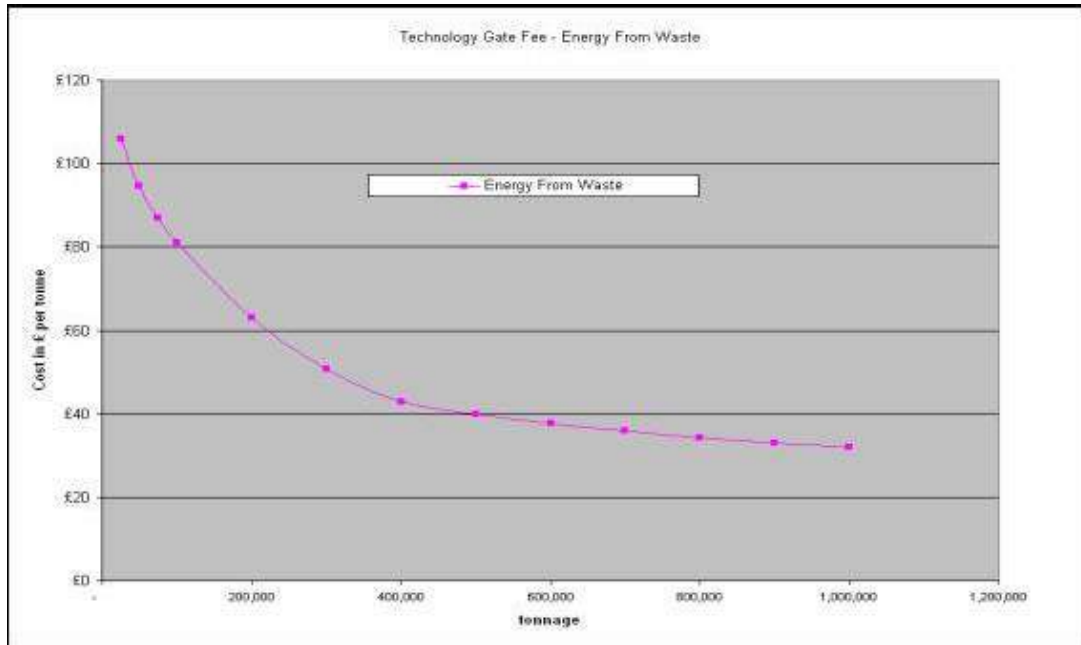


FIGURA 28 LAS ECONOMÍAS DE ESCALA PARA LA INCINERACIÓN DE RESIDUOS (EEC)

Como se desprende de esta cifra el coste de WTE es extremadamente alto para las capacidades inferiores a 300.000 ton/año, mientras que los beneficios de costo de aumentar la escala de las instalaciones comienzan a disminuir por encima de 400.000 ton/año. Con base en lo anterior, se concluye que las capacidades de las plantas WTE no deben estar por debajo de 150.000-200.000 ton/año con el fin de ser económicamente viables.

- **Actividades aguas arriba:** La recolección de residuos debe estar bien organizada y el pretratamiento de residuos aumentaría el valor calorífico de los residuos que va a ingresar en las plantas WTE. De esta manera el rendimiento financiero de la planta WTE puede mejorarse significativamente.
- **Composición de los residuos:** Ciertamente, la producción de energía de una planta WTE depende de la composición y las propiedades de entrada (por ejemplo, humedad) que afecta el poder calorífico de la mezcla final. El alto contenido orgánico que suele aparecer en zonas de ingresos medios y bajos generalmente significa residuos muy densos, alto contenido de humedad y valores de calentamiento reducidos, en comparación con los residuos relativamente ligeros con bajo contenido de materia orgánica que se encuentran en los países de mayores ingresos. Este aspecto también se debe tener en cuenta a la hora de decidir sobre la posibilidad de desarrollar plantas WTE ya que tiene un impacto negativo sobre las economías de planta WTE
- **Absorción de energía:** Una red eléctrica en buen estado capaz de absorber la energía de la planta WTE debe estar en su lugar, de lo contrario la implementación de una planta WTE muy cara no puede justificarse

- La viabilidad de una planta de WTE es muy sensible a los **precios** que podría vender la energía producida, que tienen que ser lo suficientemente altos para que la tasa de entrada para WTE permanezca en niveles comparables con el vertido. Un precio no inferior a 80 US\$/MWh debe estar en su lugar a fin de que los ingresos procedentes de la energía producida en las plantas WTE sean suficientes con el fin de disminuir las respectivas tasas de compuerta. En este sentido, el hecho de que parte de la energía producida en las plantas WTE se derivan de la fracción biodegradable de los residuos, siendo por tanto energía renovable, deben ser considerados en el desarrollo de la política de precios de la energía producida en WTE. La necesidad de producir energía a partir de fuentes renovables ha sido reconocida internacionalmente y motivos (por ejemplo, los subsidios, los certificados verdes) deben ser puestos en marcha con el fin de promover la utilización de fuentes de energía renovables. De acuerdo con la Confederación Europea de las plantas WTE ([www.cewep.eu](http://www.cewep.eu)), en promedio el 50% de la energía producida en las plantas WTE se considera que es renovable, mientras que en algunos países (por ejemplo, en Dinamarca) esta tasa alcanza el 80%.
- **Viabilidad financiera:** la disposición a pagar por lo general se correlaciona con el ingreso promedio de los ciudadanos o al menos con el PIB per cápita. Los umbrales promedio de asequibilidad usados internacionalmente se encuentran entre 0,2 - 0,5% de la media del PIB per cápita. Suponiendo una tasa media de compuerta de la planta WTE de 60-100 US\$/tn, lo que corresponde al 40% del coste de gestión global de residuos (incluyendo la recolección, transporte, reciclado y eliminación), con una generación de residuos por persona de 350 kg/año, las plantas WTE haría ser más asequible en las zonas donde el PIB promedio es de al menos 10.500 US\$/cápita.
- La viabilidad de las plantas WTE es más probable si la utilización de la electricidad se combina con la **utilización de la energía térmica producida**. Teniendo en cuenta el hecho de que las redes de calefacción urbana no son comunes en América Latina y el Caribe, los únicos usuarios finales del calor pueden ser las industrias que consumen calor. Por lo tanto es preferible para las plantas WTE estar cerca de las zonas industriales con el fin de aumentar la posibilidad de absorción del calor producido.
- La viabilidad de un sistema de gestión de residuos que incluye instalaciones WTE está relacionada con el hecho de que las plantas WTE pueden estar situadas muy cerca o incluso dentro de las áreas metropolitanas (existen ejemplos de este tipo a nivel internacional) y por lo tanto se reducen los respectivos costes de recogida y transporte, las cantidades generadas de residuos son altas y el PIB/cápita es siempre superior a la media del país respectivo. En este caso los costes globales del sistema con WTE pueden ser comparable a los sistemas que no incluyen WTE

## 5.2 SELECCIÓN DEL TAMAÑO DEL HORNO Y PLANTA WTE

---

La decisión sobre la capacidad requerida de una planta de WTE es crítica. El municipio debe tener en cuenta la cantidad de residuos que se puede entregar consistentemente a la planta, día a día, durante todo el año, teniendo en consideración:



- Tasa actual de generación de residuos y la tasa prevista para los próximos treinta años; proyecciones deben basarse en el crecimiento de la población con el tiempo y también en un mayor desarrollo económico.
- Tasas actuales y proyectadas de reciclaje y compostaje. La experiencia internacional ha demostrado que los programas de reciclaje y compostaje rigurosos pueden aumentar la suma de las tasas de reciclaje y compostaje hasta un 40% - 60% de los DSM generados en las naciones desarrolladas a través de esfuerzos coordinados a largo plazo, incluyendo regulación, incentivos, y educación pública. La Guía recomienda que los planes para una nueva WTE se acompañen de la planificación para la recolección de una sola corriente de materiales reciclables designados (fibra de papel, metales, y ciertos tipos de plástico y vidrio). Preferiblemente, los materiales reciclables recogidos deben ser llevados a un Centro de Reciclaje de Materiales construida adyacente a la planta WTE donde se clasifican a materiales comercializables y el residuo se quema en la planta WTE. La colección de los materiales reciclables se puede hacer de manera formal, por la comunidad, o informalmente por individuos que siguen las reglas establecidas por la comunidad.

### 5.3 MATERIALES QUE PUEDEN SER PROCESADOS POR LA COMBUSTIÓN DE PARRILLA

El material de alimentación a la WTE puede incluir todos los materiales no radiactivos y no explosivos:

- Los residuos residenciales y comerciales que quedan después de la proyección de reciclaje y compostaje.
- Los residuos industriales combustibles que se disponen actualmente en vertederos regulados o no regulados y se mezclan con los RSU en el búnker de almacenamiento.
- Desechos combustibles de construcción y demolición post-reciclaje
- Torta de lodo generada por la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio.
- Los neumáticos de caucho triturados, colchones y muebles post-reciclaje.
- Desechos hospitalarios que están contenidos en gruesas bolsas de plástico selladas, como se utilizan en los incineradores médicos.

En el caso de los desechos médicos, nuestro análisis de una tabla con todas las plantas europeas WTE por el International Solid Wastes mostró que cuarenta y un plantas informaron de co-combustión de desechos médicos (Tabla 7); en promedio, los desechos médicos co-combustionados por estas plantas ascendió a 1,8% de su materia prima total.

TABLA 7 CO-COMBUSTIÓN DE DESECHOS MÉDICOS EN EUROPA (ISWA, 2004)

<b>País</b>	<b>Nombre/Ubicación de la planta</b>	<b>Total de combustión (toneladas/año).</b>	<b>Desechos médicos (toneladas/año).</b>	<b>Desechos médicos como % del total</b>
<b>Noruega</b>	Lenvik	5.050	120	2,38%
<b>Italia</b>	Rufina/Pontassieve	9.878	31	0,31%
<b>Italia</b>	Ferrara	20.500	613	2,99%

<b>Gran Bretaña</b>	Shetland Islands	21.511	16	0,07%
<b>Italia</b>	Terni	27.000	1.200	4,44%
<b>Noruega</b>	Spjelkavik	34.658	210	0,61%
<b>Francia</b>	Douchy les Mines	39.295	3.530	8,98%
<b>Suecia</b>	Karlskoga	42.600	200	0,47%
<b>Italia</b>	Melfi (PZ)	47.000	2.000	4,26%
<b>Italia</b>	Desio (MI)	49.019	3.152	6,43%
<b>Dinamarca</b>	Svendborg	54.000	400	0,74%
<b>Italia</b>	Schio (VI)	57.470	4.700	8,18%
<b>Italia</b>	Ospedaletto (PI)	57.944	3.525	6,08%
<b>Italia</b>	Vercelli	58.890	2.600	4,42%
<b>Alemania</b>	Neustadt	59.449	668	1,12%
<b>Italia</b>	Padova	60.376	2.992	4,96%
<b>Dinamarca</b>	Hjørring	61.270	479	0,78%
<b>Italia</b>	Valmedrara (LC)	62.300	5.600	8,99%
<b>Italia</b>	Cremona	64.996	529	0,81%
<b>Bélgica</b>	Houthalen	69.195	1.700	2,46%
<b>Alemania</b>	Kempen	76.661	514	0,67%
<b>Francia</b>	Villefranche sur Saône	78.301	287	0,37%
<b>Noruega</b>	Frederikstad	80.381	760	0,95%
<b>Bélgica</b>	Gent	94.383	475	0,5%
<b>Noruega</b>	Bergen	105.000	1.300	1,24%
<b>República Checa</b>	Brno	106.740	254	0,24%
<b>Italia</b>	Piacenza	111.409	750	0,67%
<b>Suiza</b>	Lausanne	120.000	6.000	5%
<b>Italia</b>	Modena	122.042	5.000	4,1%
<b>Noruega</b>	Oslo (Klemetsrud)	148.161	1.677	1,13%
<b>Italia</b>	Ravenna	169.954	9	0,01%
<b>Bélgica</b>	Brugge	174.733	3.523	2,02%
<b>Italia</b>	Granarolo Emilia (BO)	179.676	2.418	1,35%
<b>Dinamarca</b>	Århus	183.047	361	0,20%
<b>Alemania</b>	Völklingen	210.488	2.270	1,08%
<b>Bélgica</b>	Thurmaide	259.614	22.157	8,53%
<b>Austria</b>	Zwentendorf	323.000	800	0,25%
<b>Alemania</b>	Krefeld	346.231	1.263	0,36%
<b>Suecia</b>	Malmö	385.879	1.700	0,44%
<b>Dinamarca</b>	København	401.823	1.942	0,48%
<b>Países Bajos</b>	Amsterdam	877.351	9.733	1,11%
<b>Total de plantas (41 reportadas)</b>		<b>5.457.275</b>	<b>97.458</b>	<b>1,8%</b>

El análisis de los mismos datos, mostró que veintitrés plantas informaron de co-combustión de lodos procedentes de estaciones depuradoras de aguas residuales (Tabla 8). En promedio, el lodo en combustión por estas plantas ascendió a 2% de la carga de alimentación total.

TABLA 8 CO-COMBUSTIÓN DE LODOS DE AGUAS RESIDUALES EN EUROPA (ISWA, 2004)

País	Nombre/Ubicación de la planta	Total (toneladas/año)	Toneladas de lodos de aguas residuales	Lodos como % del total quemado
Francia	Besançon	50.000	6.000	12%
Francia	Arrabloy	53.707	3.091	5,76%
Países Bajos	Roosendaal	55.166	99	0,8%
Dinamarca	Hjørring	61.270	2.735	4,46%
Francia	Villefranche sur Saône	78.301	1.004	1,28%
Italia	Macomer (NU)	79.000	500	0,63%
Francia	Taden	103.200	9.525	9,23%
Dinamarca	Hørsholm	109.493	137	0,13%
Suiza	Lausanne	120.000	6.000	5%
Italia	Verona	131.300	700	0,53%
Francia	Cenon	134.242	11.104	8,27%
Suecia	Halmstad	146.804	1.224	0,83%
Francia	Thiverval-Grignon	191.000	5.600	2,93%
Alemania	Völklingen	210.488	452	0,21%
Italia	Macchiareddu (CA)	212.600	9.000	4,23%
Alemania	Kamp-Lintfort	221.145	4.700	2,13%
Bélgica	Thurmaide	259.614	7.352	2,83%
España	Palma De Mallorca	328.747	2.056	0,63%
Alemania	Krefeld	346.231	16.873	4,87%
Francia	Issy-Les-Moulineaux	537.094	532	0,1%
Francia	Saint Ouen	622.653	463	0,07%
Francia	Paris	690.123	990	0,14%
Países Bajos	Amsterdam	877.351	23.981	2,73%
<b>Total (23 plantas reportadas)</b>		<b>5,619,529</b>	<b>114.118</b>	<b>2.03%</b>

Cabe señalar que sólo algunas plantas WTE informó al ISWA los materiales que eran co-combustionados. Por lo tanto, podría haber otras plantas WTE co-combustionando que no están incluidas en las Tablas 7 y 8.

---

## 5.4 CONFIGURACIÓN DE LA INSTALACIÓN WTE

---

En el caso de las comunidades donde hay gran variación estacional de los RSU debido al turismo, puede ser necesario proporcionar almacenamiento temporal de los RSU durante la temporada turística.

Plantas WTE de combustión de parrilla pueden garantizar una disponibilidad del 90%, es decir, estar en pleno funcionamiento 8.000 horas al año. Una línea WTE consiste en el horno (Figura 31), la caldera y el sistema de control de contaminación atmosférica (Air Pollution Control, APC). Por ejemplo, una línea de 40 ton/hora procesará 40x8000 toneladas al año = 320.000 toneladas de RSU; Sin embargo, parrillas de menor tamaño y mayor capacidad han sido diseñadas y están en funcionamiento.

La Tabla 6 muestra varias plantas de una sola línea que tienen capacidad de sólo 5 toneladas por hora por línea, es decir, la capacidad anual de 40.000 toneladas.

La mayoría de las plantas WTE consisten en una a tres líneas en paralelo. Sin embargo, hay algunas plantas más grandes, tales como TUAS Singapur South con seis líneas de combustión y Singapur Senoko con cinco líneas de combustión. Cada línea está provista de su propio horno, caldera y sistema de APC. Sin embargo, una turbina de vapor común puede utilizar el vapor de agua sobrecalentado generado en dos o más líneas. Además, el gas limpiado de todas las líneas se conduce a una chimenea común.

En épocas anteriores, se prefería dividir la capacidad requerida de la planta en dos o tres líneas. Sin embargo, a medida que la tecnología de combustión de parrilla fue madurando y convirtiéndose totalmente fiables, varias plantas recientes (Apéndice 3) consisten en una sola línea, ya que son menos costosas de construir y operar.

El número de líneas y su capacidad dependerán de los requisitos de cada comunidad. El lector podrá encontrar información adicional en los tres estudios de caso para Argentina, Chile y México que se presentan en la Parte 2 de esta Guía.

Teniendo en cuenta los factores anteriores, una comunidad puede planificar la capacidad de la planta de acuerdo con sus necesidades. Es importante mencionar que si la comunidad no puede permitirse el lujo de construir una planta tan grande como lo desea, siempre puede iniciar mediante la construcción de un menor número de líneas y ampliar la planta más adelante. En tales casos, el edificio que alberga la planta inicial debe estar diseñado de manera que permita la expansión futura a un costo mínimo.

---

## 5.5 SELECCIÓN DEL SITIO PARA LA PLANTA DE WTE

---

La percepción de que las instalaciones de WTE son vecinos indeseables desde el punto de vista estético también ha sido un obstáculo para el desarrollo de WTE. Sin embargo, modernas instalaciones de WTE que operan en los EE.UU., Europa, Japón y otras naciones han sido diseñadas con esta preocupación en mente. Las plantas WTE ubicadas en el centro de ciudades arquitectónicamente sensibles, como Viena, Osaka, y París, han demostrado que los diseños se pueden hacer compatibles con los requisitos estéticos locales. Una de las plantas más recientes es la WTE Isseane en el Sena, a cinco kilómetros de la Torre Eiffel. Una galería de fotos de cientos de instalaciones WTE que muestran sus características de diseño moderno está disponible en la web<sup>31</sup>.

Por regla general, las plantas WTE deberían estar situadas en lugares que serán mejorados estéticamente y funcionalmente por una instalación de este tipo. Esto está en contraste definitivo a los vertederos que se encuentran normalmente en campos verdes lejos de las zonas habitadas. Los ejemplos de lugares que se pueden mejorar mediante la adición de un WTE moderna son vertederos viejos y aún en funcionamiento, sitios mineros abandonados y canteras, y sitios industriales del pasado. Sin embargo, hay que señalar que muchas plantas WTE de todo el mundo se construyen en el medio de sitios residenciales o industriales con el fin de minimizar la distancia de recorrido desde el punto de generación a la WTE; y también para facilitar el uso del subproducto de vapor de baja presión del generador de turbina para calefacción urbana o industrial, o refrigeración. Un ejemplo de esta práctica es Dinamarca, donde una población de 5,5 millones es abastecida por 28 plantas WTE, la mayoría de ellas en zonas urbanas.

En contraste con los vertederos, la arquitectura y el paisajismo de las modernas plantas WTE pueden ser estéticamente agradables y atraer a los visitantes. Algunas ciudades, como Viena, París, Osaka, y Brescia han construido plantas WTE que se han convertido en puntos de referencia y atracciones turísticas. La adición más reciente será el nuevo WTE de Copenhague que se planea que tenga un techo que pueda ser utilizado como una pista de esquí.

Los factores que deben ser considerados para la selección del sitio de la planta WTE son:

- Proximidad al centro de generación de residuos
- Proximidad a líneas de conexión eléctrica
- Proximidad a calefacción urbana o refrigeración
- Proximidad al agua
- Proximidad a los consumidores industriales de vapor
- Proximidad al vertedero (para la eliminación de cenizas)
- Caminos de acceso
- Tráfico
- Utilidades

La Tabla 9 muestra los requerimientos aproximados de tierra de diversas configuraciones de plantas, la Figura 29 muestra las dimensiones de planta para una WTE de dos líneas de 400.000 toneladas de capacidad, y la Figura 30 muestra el plan de sitio para una planta de capacidad de dos líneas de 640.000 toneladas. Cuando hay limitaciones de tierra, el plan de trama de una WTE puede ser considerablemente menor.

TABLA 9 EJEMPLOS DE REQUISITOS DE ÁREA DEL TERRENO

Capacidad (toneladas)	160,000 (1-línea)	336,000 (2-línea)	640,000 (2-línea)	960,000 (3-línea)
Longitud de la planta (m)	150	240	360	360
Anchura de la planta (m)	70	100	130	150
Área total de la planta (m <sup>2</sup> )	10.500	24.000	46.800	54.000
Longitud terreno (m)	250	360	460	460
Anchura terreno (m)	170	230	230	250
Área total del terreno (m <sup>2</sup> )	42.500	82.800	105.800	115.000
Terreno ocupado por la planta	25%	29%	44%	47%

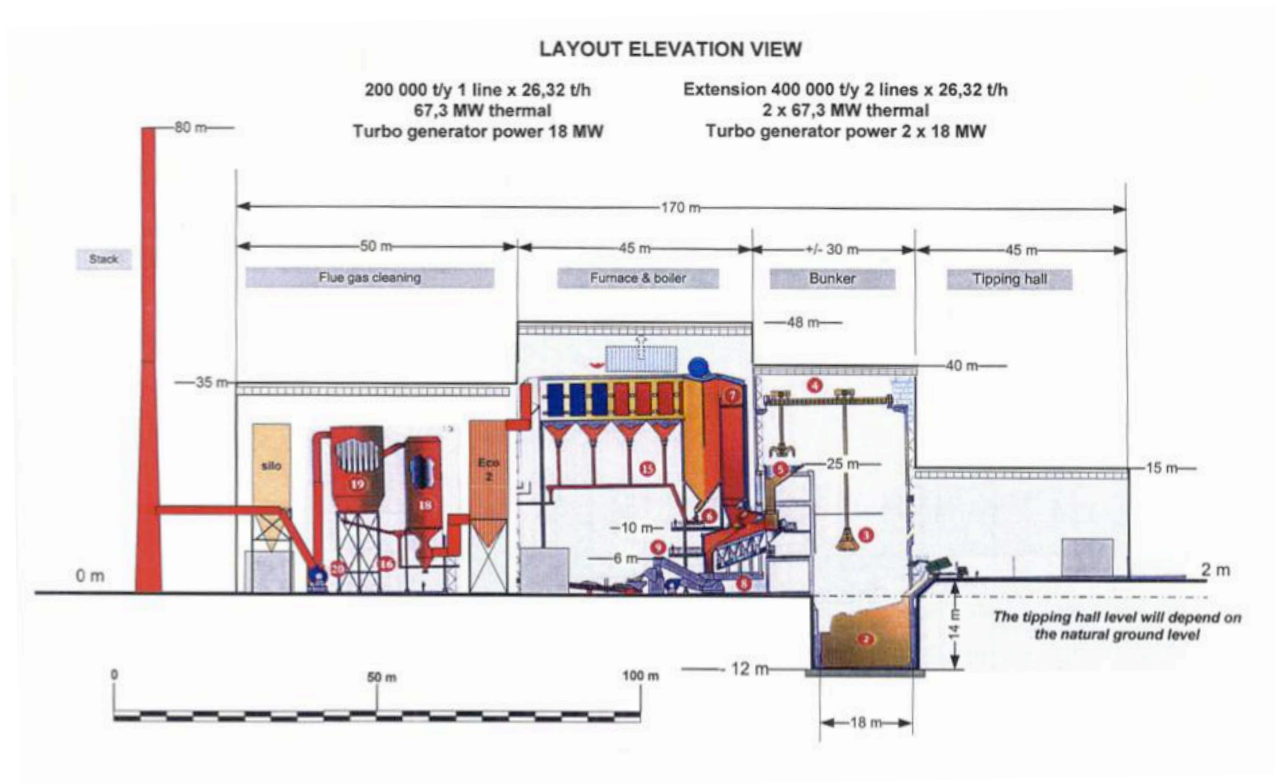


FIGURA 29 VISTA EN ALZADO DE UN DISEÑO PLANTA WTE DE PARRILLA DE COMBUSTIÓN (EEC)







## 5.7 CÁMARA DE COMBUSTIÓN

La cámara de combustión (Figura 31) es el corazón de la planta WTE. La anchura de la parrilla varía de 3-12 metros, dependiendo de la capacidad del horno, y su longitud es de unos 8 metros, proporcionando así un tiempo de residencia de los sólidos en el horno de aproximadamente una hora. La oxidación a alta temperatura en la cámara de combustión reduce objetos tan grandes como una maleta completamente llena a la ceniza que se descarga en el otro extremo de la parrilla.

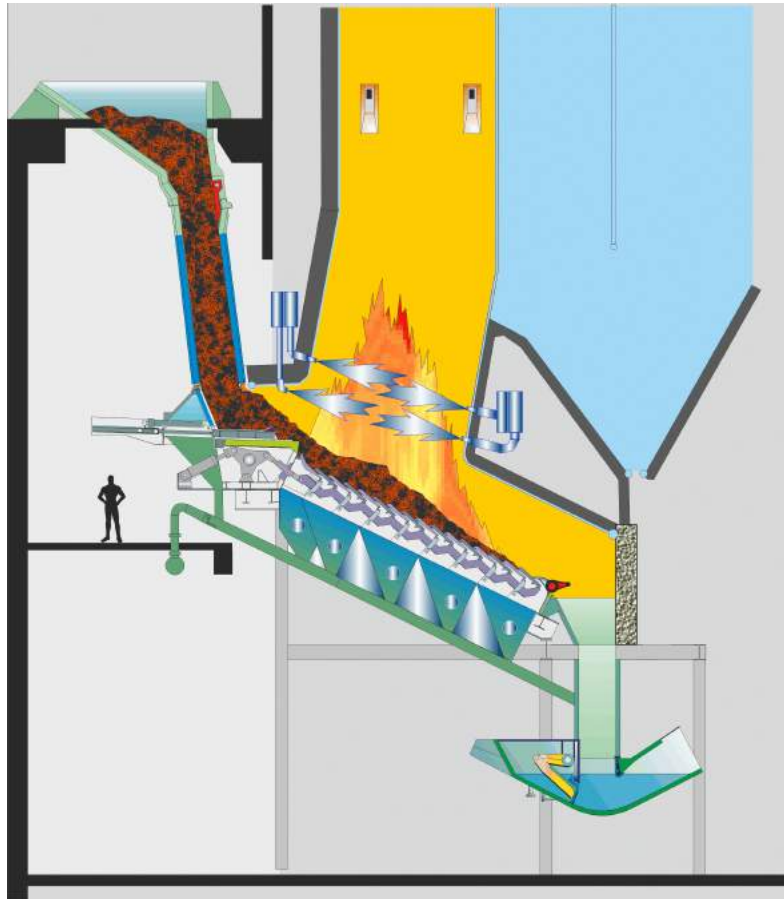


FIGURA 31 CÁMARA DE COMBUSTIÓN WTE CON PARRILLA MÓVIL (KOZLOWSKA, R., MARTIN GMBH, PRESENTACIÓN BI-ANUAL WTERT, OCTUBRE DE 2006)

El promedio de generación de calor sobre toda la superficie de la parrilla se acerca a un megavatio por metro cuadrado y las temperaturas de combustión van desde 950-1100 °C. La altura del horno por encima de la parrilla es de unos 20 metros para que los gases de combustión tengan un tiempo de viaje de más de cuatro segundos dentro de la cámara de combustión ("primer pase"). El enorme tamaño de estos hornos explica su capacidad para quemar RSU de todos los tamaños.

El corazón del horno WTE es la parrilla móvil que transporta los residuos del extremo de alimentación. Grandes tecnologías probadas van desde las parrillas inclinadas, ya sea hacia adelante o de acción inversa a la dirección del flujo de sólidos, a las parrillas de rodillos, parrillas

horizontales; También, las parrillas son o bien refrigeradas por aire, por medio del flujo de aire primario, o refrigerados por el agua que fluye a través de tubos instalados dentro de las barras de parrilla. El EEC ha investigado el flujo de sólidos en diferentes parrillas y también ha hablado de este tema con expertos WTE en diferentes partes del mundo. En este momento, no hay una respuesta clara en cuanto a qué tipo de parrilla móvil es la óptima para usar porque este tema va mucho más allá de los transportes y de los tipos de fenómenos químicos; sino que también implica costos de capital y operación, mantenimiento y disponibilidad de la planta; por ejemplo, uno de los principales proveedores de WTE, Martin GmbH, instala parrillas inclinadas y horizontales, dependiendo de la preferencia del cliente. Por lo tanto, la elección de la tecnología de parrilla se hace sobre la base de un rendimiento probado, disponibilidad de la planta y la propuesta global y garantías presentadas por los distintos proveedores de tecnología de combustión de parrilla. La lista maestra de instalaciones de combustión de parrilla previstas en el Apéndice 3 muestra las parrillas utilizadas en más de 800 plantas WTE de todo el mundo.

Un criterio importante para el rendimiento de la parrilla es la cantidad de carbono que se deja en la ceniza que sale del horno. La concentración deseable es menos de 1% de carbono.

## 5.8 RECUPERACIÓN DE ENERGÍA

---

Como se explicó anteriormente, el contenido de energía de los RSU depende de su composición y contenido de humedad. La recuperación de energía por tonelada dependerá del valor calorífico neto (o el valor calorífico inferior) de los residuos, la eficiencia del horno, y si la energía se utiliza para generar electricidad y/o vapor de agua (para calefacción urbana, plantas industriales en las proximidades de la WTE, necesidad de desalación de agua en islas, etc.).

El poder calorífico de los RSU varía de un país a otro y también entre ciudades de un mismo país. Por lo tanto, la caracterización de la composición de DSM a ser quemados en la planta WTE es la segunda tarea importante, después de determinar la cantidad de residuos sólidos a ser quemados anualmente. Si el contenido de energía de los residuos es de menos de 6 MJ/kg, puede no valer la pena la construcción de una instalación de WTE.

Considerando un DSM típico en la región de ALC de 9 MJ/kg, es decir, 2,5 MWh por tonelada, se puede suponer que las pérdidas de calor del horno, en la ceniza, y el gas de la chimenea de una planta WTE de 200.000 toneladas son 10% de esta cantidad. Por lo tanto, el calor en el vapor de agua sobrecalentado que entra en el generador de turbina será 2,25 MWh por tonelada de DSM en combustión.

Por razones termodinámicas, la eficiencia térmica de la turbina de vapor depende de la presión del vapor de agua sobrecalentado que entra y la presión a la salida de la turbina donde el vapor o bien se condensa por flujo de aire o agua o se utiliza para calefacción urbana u otros fines. Dado que los gases de combustión WTE contienen mucho más cloro que las plantas eléctricas de carbón, la temperatura y presión del vapor sobrecalentado son más bajos, por lo general en el rango de 400-450 °C. Por lo tanto, la eficiencia térmica de la turbina de vapor de la planta WTE es de aproximadamente 28% y la potencia bruta generada por la turbina  $2,25 \times 28\% = 0,6$  MWh de electricidad por tonelada de DSM. Sin embargo, se estima que el 15% de esta energía eléctrica se utilizará dentro de la planta para que la energía entregada a la red de esta planta será de 0,5 MWh por tonelada de RSU en combustión.

Para las plantas de mayor tamaño, la pérdida del horno es menor y la eficiencia térmica de la turbina superior. Por lo tanto, se espera que una planta de 1.000.000 toneladas produzca un total de 0,65 MWh/tonelada de electricidad. La más reciente WTE en Amsterdam ofrece realmente a la red más de 0,7 MWh por tonelada de DSM, además de la exportación de vapor y agua caliente para la calefacción urbana.

## 5.9 FACTOR DE EFICIENCIA TÉRMICA R1 DE LA UNIÓN EUROPEA

---

La cogeneración de electricidad y calor puede resultar en una recuperación mucho mayor de energía. Para animar a las plantas WTE a aspirar a altas eficiencias térmicas, la Unión Europea ha establecido la regla R1. De acuerdo con esta regla, un WTE se considera como una instalación de recuperación cuando el factor de R1, calculado como sigue:

$$R1 = (2,6 \text{ MWh}_{elec} + 1,1 \text{ MWh}_{heat}) / 0,97 \text{ MWh almacenada en los RSU}$$

Donde los elementos 2.6 y 1.1 expresan la energía requerida para producir electricidad y calor, respectivamente, y el factor de 0,97 expresa la pérdida de calor esperada de 3% en la transformación de energía química en térmica es mayor que 0,6 (> 0,65 para las plantas WTE construidas recientemente). Por ejemplo, en el caso de una planta de WTE existente que produce para la red 0.6 MWh de electricidad por tonelada de RSU, el factor de R1 sería:

$$R1 = (2,6 \times 0,6) / (0,97 \times 2,8) = 0,63$$

Obviamente, los ingresos de la planta WTE de recuperación de energía serán mayores en el caso de la cogeneración de electricidad y calor. Hay plantas WTE en Europa que generan tanto como 0,5 MWh de electricidad más 1 MWh de calor. El factor de R1 correspondiente es:

$$R1 = (2,6 \times 0,5 + 1,1 \times 1) / (0,97 \times 2,8) = 0,88$$

En todos los proyectos WTE recientes en Europa, los criterios R1 son obligatorios y deben ser garantizados por las empresas participantes en este tipo de proyectos.

El reto para las ciudades de la región de ALC que quieren construir plantas WTE es encontrar o localizar, las empresas cerca de la WTE que pueden usar el vapor a baja presión, por ejemplo plantas de reciclaje de papel o de procesamiento de alimentos. El problema es que algunos países de la región no cuentan con las leyes y reglamentos necesarios adecuados para la cogeneración y, en algunos casos, se prohíben.

## 5.10 CONTROL DE EMISIONES DE LAS PLANTAS WTE

---

La negativa percepción pública de las plantas WTE se basa en las emisiones de los incineradores que dejaron de operar hace dos décadas. En los EE.UU., las normas MACT (Tecnología de Control Máximo Alcanzable (Maximum Achievable Control Technology)) para grandes incineradores de residuos urbanos (Municipal Waste Combustors (MWC)), emitidas por la EPA<sup>32</sup> de EE.UU. bajo los requisitos de la Ley de Aire Limpio (Clean Air Act), establece limitaciones obligatorias de las emisiones que son protectoras de la salud humana y el medio ambiente. Las 87 instalaciones WTE existentes en EE.UU. que procesan alrededor de 26 millones de toneladas de RSU están en pleno cumplimiento de estos requisitos, más estrictos que para cualquier otra fuente de alta temperatura,

como las centrales eléctricas a carbón, fundiciones de metales y plantas de cemento. Lo mismo es cierto en U.E., Japón y todas las otras naciones desarrolladas que utilizan WTE.

Los oponentes de WTE ven plantas WTE modernas como grandes contaminantes, pero no hay datos creíbles para respaldar estas afirmaciones. Para ilustrar este punto, hay dos maneras de considerar los impactos relativos de las plantas WTE modernas. En primer lugar, la Tabla 10 muestra el impacto de MACT en la industria WTE de EE.UU. mediante la comparación tasas nacionales de emisión pre-MACT a la post-MACT. A excepción de NO<sub>x</sub> que se redujo en un 24%, las emisiones de WTE se redujeron en un 90% y en el caso de las dioxinas y los furanos superaron reducción de 99,9%, comparando con niveles de emisión de 1990. Cabe señalar que desde el año 2005, el promedio de emisiones de dioxinas procedentes de las plantas WTE de EE.UU. se han reducido más de 0.045 nanogramos de EQT, que corresponde a una EQT anual de 6 gramos para toda la industria. En comparación, las dioxinas emitidas por la quema incontrolada de residuos domiciliarios y de jardín/campo ( "quema de barriles en traspatio") se han estimado en más de 500 gramos de EQT al año.

TABLA 10 EFECTO DE LA APLICACIÓN DE MACT POR LA INDUSTRIA DE WTE EN EE.UU.<sup>33</sup>

Contaminante	Emisiones de 1990	Emisiones del 2005	Porcentaje de reducción
Dioxinas y furanos	4.400 g EQT/año	15,0 g EQT/año	99+%
Mercurio	57 toneladas/año	2,3 toneladas/año	96%
Cadmio	9,6 toneladas/año	0,4 toneladas/año	96%
Plomo	170 toneladas/año	5,5 toneladas/año	97%
Material particulado	18.600 toneladas/año	780 toneladas/año	96%
HCl	57.400 toneladas/año	3.200 toneladas/año	94%
SO <sub>2</sub>	38.300 toneladas/año	4.600 toneladas/año	88%
NO <sub>x</sub>	64.900 toneladas/año	49.500 toneladas/año	24%

EL IMPACTO POTENCIAL DE LAS EMISIONES DE WTE POR MWH DE ELECTRICIDAD PRODUCIDA SE PUEDE COMPARAR CON OTRAS FUENTES DE ENERGÍA ELÉCTRICA. LA

FIGURA 32 MUESTRA QUE SÓLO LAS PLANTAS DE ENERGÍA NUCLEAR Y GAS NATURAL TIENEN MENORES EMISIONES DE CARBONO POR MWH. POR OTRA PARTE, CUANDO SE TOMAN EN CUENTA LAS EMISIONES DE METANO DE RELLENOS SANITARIOS EVITADAS, WTE EN REALIDAD SE TRADUCE EN UNA REDUCCIÓN NETA DE LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO POR CADA MWH GENERADO O TONELADA DE PRW PROCESADO. COMO CONSECUENCIA DE ELLO, EL FORO ECONÓMICO MUNDIAL, LA EPA DE EE.UU., LA UNIÓN EUROPEA, Y EL IPCC OBSERVARON WTE COMO UN MECANISMO PARA REDUCIR LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO. LA

GUÍA PARA LA RECUPERACIÓN DE ENERGÍA Y MATERIALES DE RESIDUOS

Figura 33 y la Figura 34 muestran que las emisiones de SOx y NOx por MWh de electricidad generada también son comparativamente bajas.

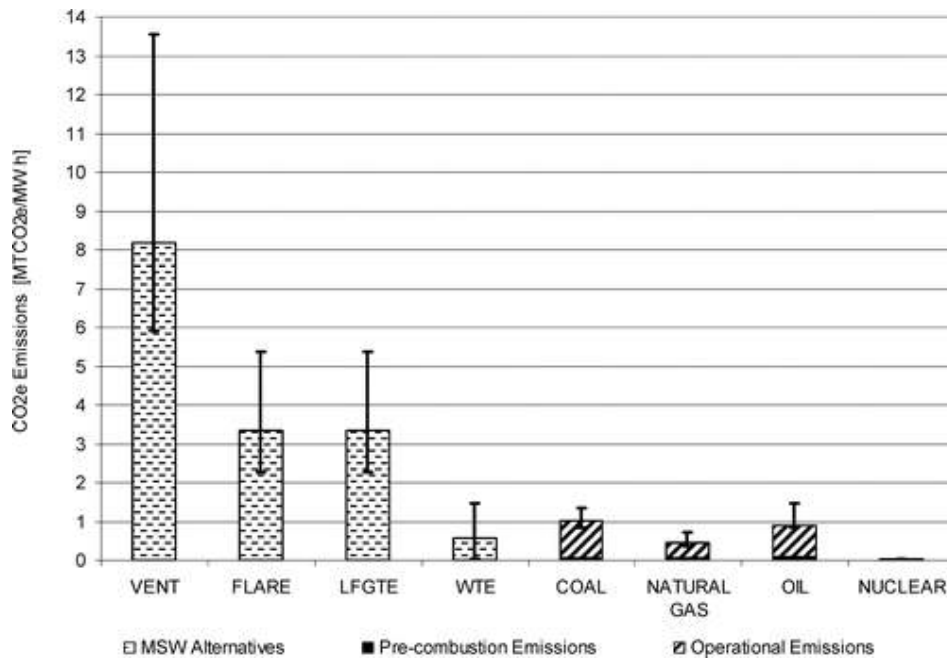


FIGURA 32 EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO (TONELADAS MÉTRICAS DE CO<sub>2</sub>/MWH) DE DIVERSAS FUENTES DE ENERGÍA<sup>34</sup>

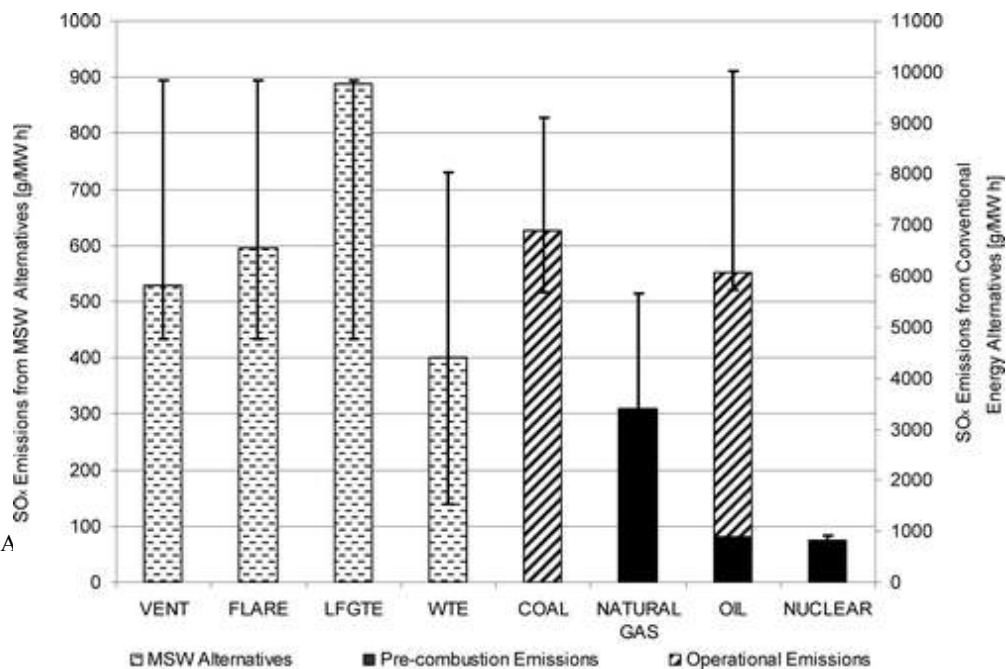


FIGURA 33 EMISIONES DE DIÓXIDO DE AZUFRE (G/KWH) DE DIVERSAS FUENTES DE ENERGÍA<sup>34</sup>

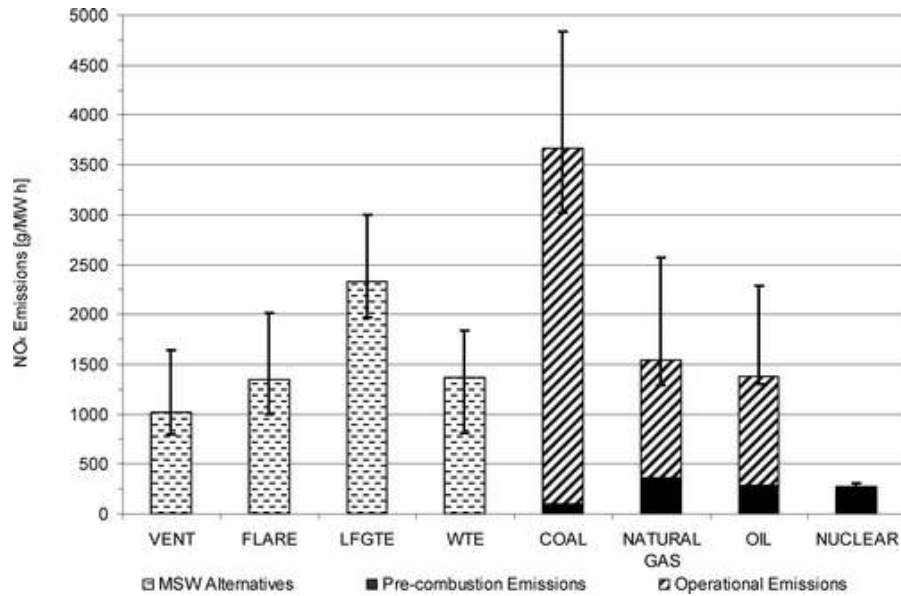


FIGURA 34 EMISIONES DE ÓXIDO DE NITRÓGENO (G/KWH) DE DIVERSAS FUENTES DE ENERGÍA<sup>34</sup>

### 5.10.1 SISTEMAS DE APC (CONTROL DE LA EMISIONES A LA ATMÓSFERA)

En resumen, los sistemas APC de modernas instalaciones WTE se encuentran entre los más avanzados de todos los procesos industriales de alta temperatura, incluyendo las plantas eléctricas de carbón, fundiciones de metales y plantas de cemento.

La siguiente tabla da una indicación de las tecnologías que se utilizan para el tratamiento de los gases de combustión de incineración de residuos.

TABLA 11 SISTEMAS PRINCIPALES DE APC EN PLANTAS WTE

Parámetro	Tecnología de reducción utilizada

<b>Sólidos suspendidos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ciclones</li> <li>• Precipitador electrostático (húmedo - seco)</li> <li>• Filtros de bolsa</li> </ul>
<b>Gases ácidos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sorción seca</li> <li>• Sorción semi seca</li> <li>• Depuradores húmedos</li> </ul>
<b>Oxido de nitrógeno</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducción selectiva no catalítica</li> <li>• Reducción catalítica selectiva</li> </ul>

Un típico sistema de control de emisiones a la atmósfera puede incluir:

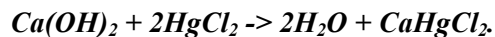
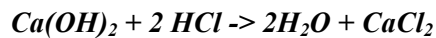
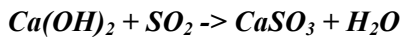
**Depurador semi - seco**

Procesos de lavado seco y semi-secos son simples y por lo tanto asequibles en relación con su inversión y están en uso en muchas plantas en todo el mundo. En la mayoría de los casos el adsorbente se inyecta ya sea directamente en el conducto de gas o en un secador de pulverización aguas abajo de la caldera en forma seca (procedimiento seco) o como lodo (proceso semi-seco). Los productos de lavado son en la mayoría de los casos eliminados del gas de combustión por un filtro de tela.

A medida que los gases de combustión entran en el depurador seco, se pulveriza lechada de cal seca para enfriarlos y que reaccionen con ácidos como HCl y SO<sub>2</sub>, mientras se captura parcialmente mercurio.

Líquidos se evaporan en el lavador vertical y después de la evaporación los productos de la reacción tienen la forma de polvo seco en los gases de combustión. Las partículas más grandes caen en la parte inferior de la torre de lavado y se retiran.

El reactivo utilizado se propone que sea lechada de cal (suspensión de Ca(OH)<sub>2</sub> fino en agua). La reacción real es bastante compleja, pero en una versión simplificada, las principales reacciones químicas son:



Los depuradores semisecos ofrecen varias ventajas, tales como:

- En combinación con otros materiales tales como carbón activado se elimina al menos 50% de mercurio y cadmio

- No se producen aguas residuales

Estas ventajas equilibran la desventaja de tener una cantidad un poco más grande de cenizas volantes.

Dependiendo de la composición y temperatura de los gases de combustión, la solución de lechada de cal se pulveriza en un intervalo de concentración de 3 a 20% w/w. [Por lo general 15% w/w]

La lechada de cal se creará con el uso de CaO (cal viva).

- Reactor de Suspensión arrastrada

El uso de este reactor optimiza la transferencia de masa entre el hidróxido de calcio y los gases de combustión y ofrece altas velocidades de eliminación de los contaminantes en los gases de combustión. Tales reactores son verticales con un suelo en forma de cono. Dependiendo del punto de entrada de los gases de combustión, la pulverización se puede realizar en la dirección del flujo, o "contra" flujo. El sistema de pulverización en sí tiene dos tipos: atomizadores rotativos y boquillas de fluido doble.

Los parámetros de diseño principales son espacio suficiente para asegurar un buen contacto de los gases ácidos con el reactivo. Además, la suspensión de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en agua se debe secar lo suficiente para asegurar que no se producen aguas residuales. Por lo general, se utiliza Computación Dinámica de Flujo para optimizar las operaciones de flujo y transferencia de masa. También, el tiempo de residencia del gas de combustión es bastante importante y debe ser de al menos 15 segundos.

- Recirculación de las cenizas volantes

Una alta proporción de polvo de los filtros de mangas se recircula de nuevo en el reactor de suspensión arrastrada para que el calcio se consuma completamente.

Inicialmente, este polvo se recoge por medio de tornillos alimentadores o transportadores de arrastre. La cantidad de recirculación se controla por un convertidor de frecuencia del tornillo alimentador, mientras que el material no recirculado se mueve a silos de residuos.

La ceniza volante entra en el reactor y se deja llevar por el flujo de los gases y por lo tanto un lecho fluidizado está fluyendo entre el reactor y el filtro de bolsa que termina en el reactor de suspensión arrastrada.

### ***inyección de Carbón activado en polvo (Powered Activated Carbon (PAC))***

El carbón activado en polvo (PAC), se utiliza para eliminar los metales pesados y compuestos orgánicos. El sistema incluye un silo de PAC, un alimentador, un ventilador de inyección y un reactor en tubo con boquilla de inyección y válvula de inyección.

PAC se transfiere neumáticamente desde el silo a la tubería de salida de la torre de lavado y se inyecta en el reactor de arrastre entre la torre de lavado semi-seca y el filtro de bolsa.

- Silo de PAC



El silo se compone de un cilindro y dos embudos de alimentación (en forma de cono) de acero especial. Con el fin de permitir la inspección dos puertas correderas se encuentran en la parte inferior.

- Alimentador PAC

El alimentador debe suministrar continuamente PAC al sistema de inyección. La cantidad de PAC se determina de acuerdo con el flujo de gases de combustión después de los filtros de bolsa (es decir, a través de un tornillo de dosificación)

- Soplador de inyección

Para un buen sistema de operación se instalarán tres sopladores de inyección (uno de repuesto). A la salida de los sopladores debieran instalarse medidores de presión para medir la presión de éstos. Los transmisores de presión deben estar situados en las líneas de inyección principales para el monitoreo de la presión de entrada de aire.

- Eliminación de metales pesados

Mercurio, cadmio, talio y parcialmente arsénico se eliminan por el carbón activado mientras que las moléculas de estos metales se vuelven adyacentes a las pequeñas partículas de polvo capturadas en los filtros de bolsa. Otros metales pesados también se aferran a las partículas de polvo y se retiran.

- La eliminación de los compuestos orgánicos volátiles (Volatile Organic Compound, (VOC)), dioxinas/furanos e hidrocarburos poliaromáticos (PolyAromatic Hydrocarbon, (PAH))

El carbón activado "captura" tales compuestos y luego el polvo PAC se elimina en los filtros de mangas. Los residuos de los filtros de bolsa se almacenan en el silo de cenizas volantes y se transfieren fuera de la planta para una gestión adecuada.

### **Filtros de bolsa**

Los filtros de bolsa garantizan una recolección muy eficiente de polvo, mientras que al mismo tiempo absorben aún más los residuos ácidos. Con el fin de lograr esta mayor absorción, es importante que una capa de polvo se mantenga en la tela. La capa de polvo recogerá de manera eficiente las partículas con diámetro menor que micrones ( $\mu\text{m}$ ). Esto asegura una alta eficiencia de remoción de metales pesados y dioxinas, ya que las partículas más pequeñas son generalmente de éstos.

El sistema automático de control y limpieza de filtros (que es causada - comienza a partir de la detección de diferencia de presión de filtros) asegura que continuamente una capa de polvo permanecerá en las bolsas/filtros. La limpieza de los filtros debe tener lugar cuando éstos están en funcionamiento (no es necesario que se aisle la parte de los filtros bajo limpieza) y no debe influir en el proceso de limpieza.

- Eliminación del polvo/partículas

Gases fluyen a través de filtros de bolsa desde el exterior de la bolsa hacia el interior y el polvo se acumula en el exterior.

Los gases llegan a los filtros de bolsa a través de una tubería y se distribuyen a través de aberturas a diferentes secciones del filtro. Un tubo especial asegura un flujo continuo de los gases y de esta forma la eliminación se optimiza y se extiende la vida útil de los filtros.

Las cenizas volantes se capturan en la capa de polvo que se forma en las bolsas y el propio filtro. Gases limpios fluyen de las aberturas de la parte superior al regulador de salida de compartimiento y vía el tubo de salida a través del ventilador de tiro inducido (Induced Draft, (ID)) llegan a la chimenea y, finalmente, a la atmósfera.

La capa de polvo aumenta la eficiencia del filtro de mangas, mientras que las cantidades restantes de cenizas reaccionan con compuestos ácidos. Las dioxinas y los demás compuestos orgánicos volátiles son absorbidos por el carbón activado y las partículas del PAC son capturadas por la capa de polvo. Cuando la presión del filtro aumenta hasta cierto nivel, esto significa que la capa de polvo se ha vuelto demasiado gruesa y se activa el proceso de limpieza.

- Limpieza del filtro de bolsa

Las cenizas volantes que se quedan en la superficie exterior de las bolsas de filtro se retiran periódicamente por un pulso de aire soplado en la bolsa desde el lado interior. Esta limpieza libera las partículas, que caen en la tolva de descarga.

Debajo de cada estación de filtro se posiciona un tanque de aire equipado con válvulas de paso anular. Se sopla aire comprimido en la parte inferior interna de las bolsas y el pulso es muy corto, no más de 0,1 s. Todo el proceso, el cual se lleva a cabo mientras que la bolsa de filtro está en funcionamiento, debe requerir cantidades mínimas de energía.

La frecuencia de los impulsos puede ser continua o controlada.

- Capa preliminar del filtro de bolsa

Aplicar un revestimiento previo a los filtros se consigue con cenizas apagadas tan pronto como se instalan nuevos filtros de bolsa. Este pre-revestimiento protege el material del filtro de sustancias pegajosas como el alquitrán, pero también ayuda en la creación de la capa de polvo adecuada:

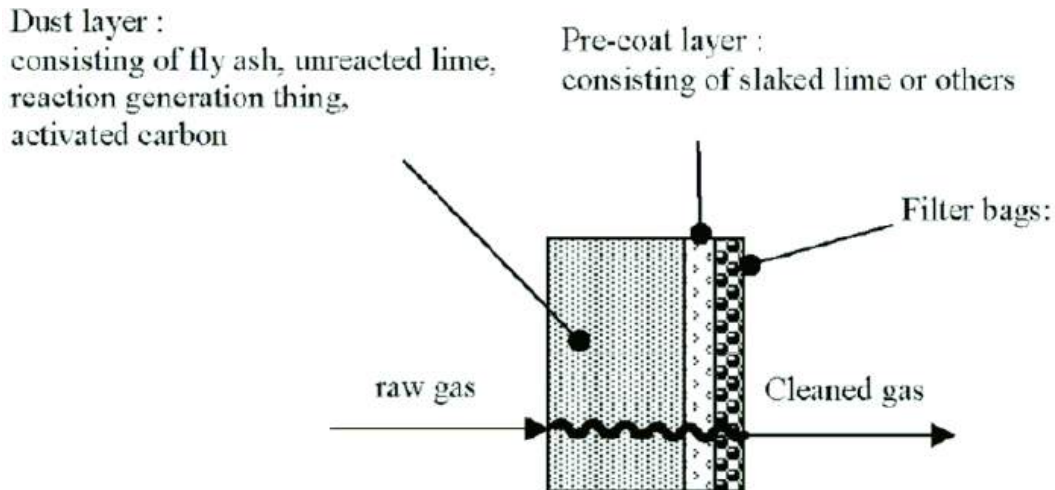


FIGURA 35 SECCIÓN TRANSVERSAL DE UN FILTRO DE MANGAS

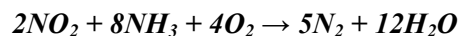
### Eliminación de NOx

La producción de NOx se puede prevenir con las siguientes medidas:

- La mezcla continua de los desechos en el búnker para asegurar una mejor mezcla de combustible.
- Buena mezcla de aire secundario a través de la posición ideal de las toberas de aire secundario, a fin de crear turbulencia en la cámara de combustión que, posteriormente, hace una buena mezcla de gases de combustión y flujo continuo.
- El uso de quemadores de bajo nivel de NOx
- El uso de gas natural

Como medida de etapa final para la eliminación de NOx, se propone la Reacción Selectiva No Catalítica (Selective Non Catalytic Reaction (SNCR)). En SNCR, se inyecta amoníaco (NH<sub>3</sub>) o urea (CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>) en el horno para reducir las emisiones de NOx. El NH<sub>3</sub> reacciona más eficazmente con NOx entre 850 y 950 °C, aunque las temperaturas de hasta 1050 °C son eficaces cuando se utiliza urea. Si la temperatura es demasiado alta, una reacción competitiva de oxidación genera NOx no deseado. Si la temperatura es demasiado baja, o el tiempo de residencia para la reacción entre NH<sub>3</sub> y NOx es insuficiente, la eficiencia de la reducción de NOx disminuye, y la emisión de amoníaco residual puede aumentar. Esto se conoce como escape de NH<sub>3</sub>. Algunos escapes de amoníaco se producirán siempre a causa de la reacción química. Escape adicional de NH<sub>3</sub> puede ser causado por la inyección de reactivo en exceso o mal optimizado.

Las reacciones químicas son:



Se colocan suficientes boquillas con el fin de garantizar pulverización de amoníaco a través de la zona de radiación, asegurando así un buen contacto y menos amoníaco residual. Dinámica de fluidos computacional (Computational Fluid Dynamics, (CFD)) avanzada se debe utilizar para determinar el número exacto y la localización de las boquillas, lo que resulta en eficiencia optimizada y emisiones de amoníaco por debajo de los valores límite.

El número y la posición de las boquillas en operación deben ser controlados en función de la temperatura del horno, que debe ser medida con dispositivos avanzados como pirómetros infrarrojos o sistemas acústicos.

El volumen de solución de amoníaco inyectado se determina por las concentraciones de NOx medido en la chimenea. La solución de amoníaco se diluye con agua procedente de la caldera (purga de agua) antes de que se convierta en gotas de agua con el uso de aire comprimido.

El sistema debe garantizar:

- El almacenamiento seguro de la solución de amoníaco (25% w/w).
- Transferencia de amoníaco.
- Dilución de amoníaco y la inyección a través de aire comprimido en los gases de combustión a través de toberas de inyección.
- Limpieza de las toberas de inyección de restos de amoníaco que quedan cuando la caldera no está en funcionamiento.

### **Ventilador ID y chimenea**

Gas limpio llegará a la atmósfera con el uso de un ventilador de tiro inducido (ID) y una chimenea.

El ventilador será centrífugo con un control de cambio de velocidad. Las alas del ventilador estarán hechas de material resistente a la fricción y el impulsor será colocado entre dos rodamientos lubricados con grasa y embrague directo con diferenciación de velocidad. La parte móvil se coloca en una celda con aislamiento exterior para reducir las pérdidas térmicas y ruido.

El control del ventilador será posible desde la sala de control.

También se construirá una chimenea hecha de una parte exterior de acero y una parte interior de placas de acero resistentes a la corrosión. La parte exterior debiera ser aislada también. También se utilizará una capa de pintura.

La chimenea tendrá:

- Una puerta metálica en la parte inferior
- Pararrayos
- Haz adecuado para aviones e iluminación apropiada para la alerta de la aviación
- Puntos para muestreo manual
- Puntos de conexión para la medición en línea de las emisiones

Debe tener también plataformas de acceso a los puntos de muestreo y una escalera con una plataforma en su parte superior.

Las condiciones locales, tales como los parámetros del viento y el paisaje, así como la cantidad esperada de gases de combustión determinan la altura de la chimenea para una dispersión eficiente. Por lo general, la altura es de no menos de 65 m en zonas planas.

---

### 5.10.2 MONITOREO DE EMISIONES

---

Para el seguimiento de los parámetros de funcionamiento y las emisiones de las plantas WTE hay varios enfoques que se pueden utilizar (en línea con los documentos de referencia de las mejores técnicas disponibles para el seguimiento y la incineración de residuos basados en la Directiva de Control y Prevención de Contaminación Integrada CE):

- Medición directa
- Cálculo de parámetros de sustitución
- Balances de masa
- Cálculos
- Factores de emisión

#### ***Medición directa***

Las mediciones directas se refieren a la determinación cuantitativa directa del parámetro respectivo en la fuente y puede ser continua o discontinua:

- Medición continua:
  - Uso de mediciones in situ o unidad de medida en línea.
  - Uso de la unidad de medición en línea para la toma de muestras y medición continua.
- Medición discontinua:
  - Unidades de medida móviles.
  - Medición de laboratorio de las muestras recogidas in situ o en línea.
  - Medición de laboratorio de muestras puntuales.

#### ***Parámetros de sustitución***

Los parámetros de sustitución son aquellos que cuando se miden pueden correlacionarse con parámetros convencionales, cuando éstos no se pueden medir directamente.

Los parámetros de sustitución se utilizan para el seguimiento cuando:

- Están estrechamente y constantemente conectados a un parámetro directo requerido.
- Son más baratos y fáciles de vigilar que el parámetro directo.
- Permiten más mediciones y de más puntos de origen.

#### ***Categorías de parámetros de sustitución***

Cuantitativa: proporcionar información cuantitativa, tales como:

- 1.1 Evaluación de compuestos volátiles totales en lugar de compuestos individuales, cuando el flujo de gas es estable.
- 2.1 Cálculo de la concentración de gas de desecho a través de la composición del combustible, la materia prima, etc.
- 3.1 Estimación de la demanda química de oxígeno y carbono orgánico total en lugar de compuestos individuales

Cualitativa: proporcionar información cualitativa, tales como:

- La temperatura, tiempo de retención y flujo en la cámara de combustión
- Medición de CO o VOC total de los gases de combustión
- Temperatura de gas de la unidad de refrigeración
- Conductividad en lugar de componentes metálicos
- Turbidez en lugar de sólidos en suspensión

Indicativa: proporcionar información sobre la unidad de operación o proceso y dar una indicación de las emisiones:

- La temperatura del flujo de gas desde el condensador
- La caída de presión, velocidad de flujo y la humedad
- pH

Por ejemplo:

- Hornos: medición de CO<sub>2</sub> (directo)
- Incinerador: temperatura de la cámara de combustión (cualitativa) - tiempo de retención o caudal (indicativo)

### ***Balances de masa***

Los balances de masa se utilizan para la estimación de las emisiones de una determinada unidad o proceso. La ecuación de balance de masa simplificada es la siguiente:

$$\textit{Entradas} = \textit{Productos} + \textit{residuos} + \textit{emisiones}$$

dónde:

Entradas: todos los materiales que ingresan al proceso.

Productos: todos los materiales utilizables que salen del proceso.

Residuos: todos los materiales no utilizables que salen del proceso.

Emisiones: materiales emitidos al aire o agua residual.

### ***Cálculos***

Se basan en ecuaciones teóricas y modelos. Después de que se proporciona una ecuación indicativa para la estimación de materiales específicos emitidos a través del consumo de combustible, por ejemplo, CO<sub>2</sub> o metales:

$$E = Q * C/100 * (MW/EW) * T$$

### ***Factores de emisión***

La ecuación general para el uso de factores de emisión es

***Tasa de emisión (masa/tiempo) = factor de emisión (masa/unidad de rendimiento o masa/producción de energía o masa/consumo de agua) \* Datos de actividad (por ejemplo la energía producida o rendimiento o agua consumida por unidad de tiempo)***

Los factores de emisión se han desarrollado a nivel nacional o internacional (EPA 42, CORINAIR, UNICE, OCDE) y por lo general se expresa como el peso de una sustancia emitida dividida por la unidad de peso o volumen.

### ***Requerimientos de monitoreo de plantas WTE***

A través de los procedimientos de autorización, condiciones estrictas deben ser impuestas para el seguimiento de las emisiones al aire, agua y suelo, tales como:

- Medición continua de las emisiones de NOx, CO, partículas, COT, HCl, HF, hidrocarburos SO<sub>2</sub> a la atmósfera.
- Medición continua de la temperatura en la cámara, la concentración de oxígeno, la presión, así como la temperatura en el gas de combustión.
- Por lo menos 2 mediciones anuales de metales y dioxinas/furanos.

Para aguas residuales la medición regular debe realizarse para los siguientes parámetros

- Flujo
- pH
- Temperatura
- TSS
- Mercurio
- Talio
- Arsénico
- Plom
- Cromo
- Cobre
- Níquel
- Zinc
- Dioxinas/furanos

---

## **5.11 CENIZA DE LA PLANTA WTE**

La combustión de parrilla reduce el volumen de DSM en alrededor de 90%. Los residuos de las instalaciones de conversión de residuos en energía son las cenizas de fondo (20-25% del peso de los RSU) y cenizas "volantes" recolectadas en el sistema APC (2-3% del peso de los RSU). Las cenizas

de fondo contienen partículas de metales ferrosos y no ferrosos que pueden ser recuperadas por medio de separadores magnéticos y corrientes de Foucault, respectivamente.

Las cenizas de fondo de las plantas de combustión de parrilla pueden cumplir diferentes requisitos. En el caso donde se prefieren altas tasas de recuperación de metales a partir de las cenizas de fondo, esto se puede lograr a través de un proceso de combustión estándar sobre la parrilla con descarga de ceniza seca; por ejemplo, la planta KEZO en Hinwil, Suiza y la planta SATOM en Monthey, Francia han demostrado que las plantas de combustión de parrilla equipadas con sistemas de descarga de cenizas secas permiten la recuperación de metales altamente ferrosos y no ferrosos. Cuando es deseable producir una ceniza semi-fundida, enriquecer el aire primario con el oxígeno, como se ha hecho en Arnoldstein, Austria, y Sendai Japón (proceso Martin SYNCOM), la ceniza se sinteriza sobre la parrilla produciendo de este modo un material químicamente inerte similar a cenizas fundidas. Los metales son entonces químicamente/físicamente fijos en la matriz de ceniza.

Como los sistemas de APC de instalaciones WTE han mejorado en gran medida, los metales pesados capturados, dioxinas, y otros contaminantes no deseables son secuestradas en las cenizas volantes. En la actualidad, la mayoría de la plantas WTE en EE.UU. mezclan las cenizas de fondo y volantes para formar una ceniza "combinada" que es químicamente inerte y se utiliza para el mantenimiento de los vertederos y cubierta diaria, en lugar de la cobertura del suelo de 15-cm requerida por USEPA. Dado que los EE.UU. es el usuario de vertederos más grande del mundo, hay una gran necesidad de uso de ceniza WTE en los vertederos. Sin embargo, dado que actualmente no existen alternativas comerciales para usos beneficiosos de las cenizas WTE fuera de los vertederos, las empresas WTE no obtienen mucho beneficio de suministrarla a los vertederos. De hecho, su disposición para el mantenimiento de los vertederos representa un coste operativo sustancial. En las Bermudas, las cenizas WTE combinada se mezcla con cemento para formar un bloque de hormigón de un metro cúbico que se utilizan para la protección de la costa, y la recuperación de tierras.



FIGURA 36 BLOQUES DE HORMIGÓN A BASE DE CENIZAS WTE UTILIZADOS PARA PROTECCIÓN DE LA COSTA Y LA RECUPERACIÓN DE TIERRAS<sup>35</sup>



Las cenizas de fondo no contiene dioxinas y metales volátiles y sus concentraciones de cloro y azufre son muy bajas. Se puede utilizar de forma beneficiosa en la construcción de carreteras, la remediación de minas extintas, entre otros usos, como se hace en varios países. Numerosos programas de demostración, en los EE.UU. y en el extranjero, han demostrado que las cenizas de fondo se pueden procesar para generar un agregado diseñado y ambientalmente adecuado para diversas aplicaciones de construcción. De hecho, la instalación de WTE AEB Amsterdam (1,5 millones de toneladas al año de RSU) procesa sus cenizas en una forma novedosa de modo que sólo el 1% en peso de los residuos sólidos urbanos en combustión tienen que ser depositados en vertederos.

En los EE.UU., un obstáculo percibido en el desarrollo de las cenizas de fondo fuera de los vertederos es que si las cenizas de fondo no se mezclan con cenizas volantes, el último es un residuo peligroso y por lo tanto muy costoso de eliminar. En 2007, el EEC testeó el tratamiento de fosfatado de cenizas volantes (el proceso de Wheelabrator Technologies WES-Phix), mediante el uso del Procedimiento de Lixiviación de Contaminantes Tóxicos USEPA (Toxic Contaminant Leaching Procedure, (TCLP)). Los resultados mostraron que la ceniza volante fue totalmente estabilizada y podría ser eliminada en un relleno sanitario. De hecho, este procedimiento ha sido utilizado con éxito durante años en el Burnaby, British Columbia WTE de Covanta Energy que trata parte de los RSU de Vancouver metropolitano. En un estudio separado, EEC testeó con éxito la eliminación de cloruro del residuo APC por un simple lavado con agua.

El Earth Engineering Center está actualmente examinando el proceso Alkemy que transforma ceniza WTE mezclada (cenizas de fondo, más cenizas volantes) a un total liviano que tiene un precio de US\$ 40-80 por tonelada de agregado. Sin embargo, este proceso requiere el pago de una tasa de entrada de alrededor de US\$ 30/tonelada de ceniza mezclada.

## 5.12 BALANCES DE ENERGÍA Y MASA

El balance de energía, suponiendo un valor calorífico de los residuos de 9 MJ/kg, se presenta en la Tabla 12 a continuación.

TABLA 12 BALANCE DE ENERGÍA

Energía de entrada (MWh/tonelada de residuos)		Energía que se pierde o se consume (MWh/tonelada de residuos)		Energía restante (MWh/tonelada de residuos)	
Energía en los residuos	2,50	Pérdidas de calor en el horno, ceniza y gases de la chimenea	0,25	Energía exportada a la red	0,54
		Pérdidas de turbina	1,62		
		Consumo de la planta	0,09		
Total	2,50	Total	1,96	Total	0,54

El balance de masa se presenta en la Tabla 13

TABLA 13 BALANCE DE MASA

Masa de entrada (toneladas)		Masa consumida durante la combustión (toneladas)		Masa restante (toneladas)	
Residuos	1	Masa consumida durante la combustión (toneladas)	0,75	Cenizas de fondo	0,225
				Cenizas volantes	0,025
Total	1	Total	0,75	Total	0,25

### 5.13 ECONOMÍA DE WTE

Los gastos e ingresos de una planta de conversión de residuos en energía varían de un lugar a otro. Por esta razón, los capítulos 7-9 de esta Guía examinan tres estudios de caso de la hipotética aplicación de la tecnología de WTE en la región de Valparaíso de Chile, el municipio de Toluca de México y Buenos Aires de Argentina. Estos tres casos de estudio involucraron extensas visitas y la interacción del equipo de proyecto con especialistas en estos tres países. Se insta a los lectores de la Guía a examinar estos tres estudios y considerar las similitudes y diferencias, ya que pueden aplicarse a su propia ciudad. En esta sección se explican los componentes de costes e ingresos de una planta de WTE, en general.

**Costo de capital:** Instalaciones WTE modernas están equipadas con sistemas de com

bustión y control de la contaminación del aire muy avanzadas. Asimismo, están obligadas a operar a plena capacidad por más de ocho mil horas por año (<90% de disponibilidad) y deben ser estéticamente agradables en apariencia. Por lo tanto, son más costosas de construir que un relleno sanitario; por ejemplo, una planta de rango medio de 160.000 toneladas de capacidad anual puede costar más de US\$ 80 millones (US\$ 500 por tonelada de capacidad anual). Los costes de inversión en función de la capacidad anual (y diaria) para una típica nueva planta de incineración de residuos se estiman en la siguiente figura (Banco Mundial 2000).

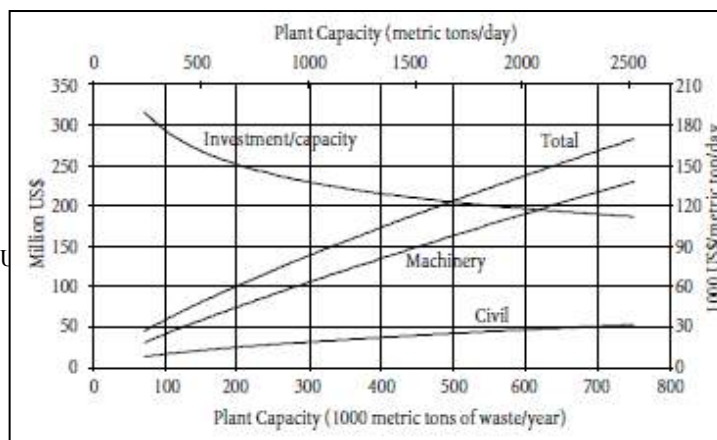


FIGURA 37 COSTOS DE INVERSIÓN DE CAPITAL WTE (EEC)

En el caso de una inversión con financiación privada, la devolución de esta inversión puede implicar una carga de capital de US\$ 60 por tonelada de RSU procesado, durante un período de veinte años.

Sin embargo, la inversión en una planta de WTE proporciona importantes beneficios económicos a la comunidad de acogida, durante la fase de construcción, en funcionamiento, y mucho después de que la inversión inicial ha sido pagada.

**Costos de operación:** Los tres casos de estudio muestran claramente que en una base por tonelada, los costos de operación aumentaron al disminuir el tamaño de la planta WTE: Oscilaron desde US\$ 32/tonelada de RSU para la planta de un millón de toneladas de Buenos Aires a US\$ 47/tonelada para la planta de 160.000 toneladas de Toluca.

Los costos de operación como una función de la capacidad anual (y diaria) para una típica nueva planta de incineración de residuos se estiman en la siguiente figura (Banco Mundial 2000).

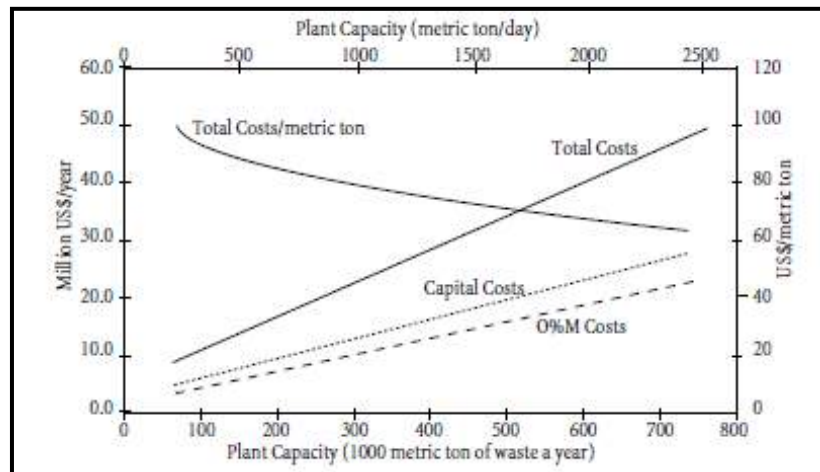


FIGURA 38 COSTOS OPERATIVOS WTE (EEC)

**Co-generación de electricidad y calor:** Una fuente igualmente importante de ingresos para la planta WTE es la venta de electricidad y vapor. En este momento, la mayoría de las instalaciones WTE de EE.UU. sólo venden electricidad, que asciende a alrededor de US\$ 30 por tonelada de RSU a un precio asumido de tan sólo US\$ 0,06 por kWh. Sin embargo, mientras los estados sigan pasando leyes que exijan el uso de energías renovables en la red eléctrica, una fuente de energía renovable será cada vez más valiosa en los años venideros. Una fuente más pequeña de ingresos WTE es la recuperación de metales a partir de cenizas WTE; en este momento casi 0,8 millones de toneladas de metales ferrosos y no ferrosos se recuperan de las plantas WTE de EE.UU..

Los tres estudios de caso (capítulos 7-9) mostraron que un precio razonable para la electricidad WTE puede variar desde US\$ 80-120 por MWh, es decir, desde US\$ 40 a 70 por tonelada de RSU procesado. Pueden existir ingresos adicionales por la venta de vapor de baja presión si los usuarios industriales se pueden ubicar cerca de la instalación WTE. Los ingresos procedentes de las ventas de metal estarían en el orden de unos pocos dólares por tonelada de RSU.

**Tasa de entrada por tonelada de DSM:** Para una planta WTE financiada de forma privada, los costos de capital y de operación por tonelada de RSU, menos los ingresos procedentes de la venta de electricidad y cualquier crédito de carbono como se explicará en el siguiente párrafo, deben ir acompañados de la tarifa de entrada por tonelada de DSM procesado. Debido al alto costo de capital de una WTE, la tarifa de entrada requerida está obligada a ser superior a la del vertido. Sin embargo, los vertederos están situados a cierta distancia de los centros urbanos, y esto requiere la construcción de estaciones de transferencia de residuos, donde la carga de los camiones de recogida se transfiere a los camiones de larga distancia y los costos de transporte desde las estaciones de transferencia a los rellenos sanitarios. Por ejemplo, un estudio del EEC demostró que la implementación de WTE para la ciudad de Nueva York daría como resultado el cierre de más de quince estaciones de transferencia y evitaría el envío anual de cerca de 150.000 camiones diesel a otros estados, a cientos de millas de distancia<sup>36</sup>.

**Créditos de carbono:** El gas de efecto invernadero más importante que contribuye al calentamiento global es el dióxido de carbono. El Protocolo de Kyoto (PK) de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) pidió a los países industrializados (enumerados en el anexo 1 de la CMNUCC) reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero a niveles bajos los del año 1990 en el período de 2008 y 2012. El Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) permite a los países del Anexo I alcanzar sus compromisos de reducción, ayudando a implementar proyectos de reducción de emisiones en países que no están en el Anexo I, es decir, las naciones en desarrollo, como las de la región de ALC.

El mercado de carbono incluye diferentes tipos de créditos de carbono. La forma más común de créditos para proyectos MDL son las Reducciones Certificadas de Emisiones (RCE). Una RCE corresponde a la reducción de la emisión de una tonelada métrica de CO<sub>2</sub> equivalente.

Un ciclo de proyectos MDL requiere el registro y verificación, por medio de un proceso riguroso y público que el proyecto de hecho resultará en una reducción de las emisiones de carbono. Tras la verificación, el proyecto está oficialmente autorizado para generar RCEs. Algunos países, entre ellos los EE.UU., aún no han aceptado al Protocolo de Kyoto y la continuación del mercado de carbono es incierta. Sin embargo, la U.E. ha declarado su compromiso a largo plazo a los sistemas de comercio de emisiones.

Los RSU generalmente contienen aproximadamente 30% de carbono, dos tercios de los cuales son de origen biogénico (papel, madera, residuos de alimentos, etc.); utilizarlo como combustible reduce la cantidad de combustible fósil utilizado (origen antropogénico). Además, el desvío de DSM de los vertederos reduce la cantidad de metano que emiten los vertederos y una molécula de metano emitida a la atmósfera es equivalente a 21 moléculas de dióxido de carbono. Debido a estos dos factores, una tonelada de RSU en combustión en lugar de ser vertidos resulta en la disminución de las emisiones de carbono de 0,5 a 1 tonelada de dióxido de carbono, dependiendo de la eficiencia de la recolección de los gases de vertedero.

plantas WTE en América Latina podrían calificar como proyectos MDL. Por ejemplo, Sumitomo Corporation de Japón invirtió en un proyecto WTE en la ciudad de Huzhou, provincia de Zhejiang en China (Huzhou Nantaihu Green Energy Co., Ltd.). Esta planta está diseñada para tratar 266.000 toneladas de RSU generados en Huzhou y suministra 59.000 MWh a la red. En este caso, la evaluación del proyecto MDL resultó en acreditación de 85.000 RCE, es decir 0,32 toneladas de CO<sub>2</sub> por tonelada de DSM en combustión.

La tabulación de la CMNUCC en la tabla 14 muestra que el número de todas las RCE registrados en América Latina hasta 2012 fue de 378 millones, o el 13,6% de todas las RCE en el mundo en desarrollo.

TABLA 14 PROYECTOS MDL REGISTRADOS Y LAS CORRESPONDIENTES RCE<sup>37</sup>

Región	Población (millones)	Todos los proyectos		Número de RCE proyectadas para el año 2012, en miles		RCE 2012 per cápita
		Número	%	Número	%	
<b>América Latina</b>	449	939	14,6%	378.014	13,8%	0,84
<b>Asia y Pacífico</b>	3.418	5.169	80,6%	2.170.758	79,5%	0,64
<b>Europa y Asia Central</b>	149	69	1,1%	42.261	1,5%	0,28
<b>África</b>	891	168	2,6%	99368	3,6%	0,11
<b>Medio Este</b>	186	71	1,1%	40.469	1,5%	0,22
<b>Todos los países menos desarrollados</b>	<b>5.093</b>	<b>6.416</b>	<b>100%</b>	<b>2.73.870</b>	<b>100%</b>	<b>0,54</b>

**Vida de una planta de WTE:** El elemento de coste más importante en la operación de una planta de WTE es la amortización de la inversión de capital que normalmente se extiende durante un período de 20 años. Sin embargo, el Apéndice 3 muestra varias plantas WTE que han sido operadas más de cuarenta años y todavía se mantienen fuertes. Con el mantenimiento adecuado, una nueva WTE en un municipio puede ser una beneficio para la generación actual y un regalo de patrimonio a las generaciones siguientes.

#### 5.14 COMBINACIÓN DE PLANES PARA UNA NUEVA WTE CON AUMENTO DEL RECICLADO

Como se señaló anteriormente, hay un error conceptual general de que las nuevas plantas WTE disminuirán el reciclaje en una comunidad. Por lo tanto, la planificación de un nuevo WTE en una comunidad, especialmente en América Latina y el Caribe, donde las tasas de reciclaje actuales son relativamente bajas, debe incluir establecer o mejorar el reciclar formal al proporcionar contenedores de recogida de materiales reciclables que se especifican por la comunidad. Por ejemplo, estos pueden incluir todos los tipos de papel y cartón, metales y envases de plástico especificados.

Un día a la semana, los mismos camiones que recogen RSU en los demás días recolectan el flujo único de materiales reciclables y los transportan a un Centro de Recuperación de Materiales (Materials Recovery Facility, (MRF)) que se encuentra junto a la instalación WTE. Los materiales reciclables se ordenan a cabo, ya sea mecánica o manualmente, a materiales que se pueden vender que son embalados y comercializados. El residuo no vendible del MRF se transporta al búnker de la planta WTE. El diagrama de flujo de esta disposición se muestra en la Figura 39. La construcción de un MRF adyacente a la planta WTE también enviará un mensaje claro a la comunidad que WTE y el reciclaje son complementarios. Este MRF incluirá tanto la clasificación mecánica y manual, y preferentemente empleará personas que se dedicaban a reciclaje informal y las dotará de mejores salarios y condiciones de trabajo.

El MRF propuesto tendría las siguientes características de funcionamiento (Anexo 3): reciclables recogidos se inclinan en el piso del MRF y cargados en una cinta transportadora inclinada que los lleva a correas horizontales elevadas que pasan por una serie de clasificadores que recogen elementos particulares (por ejemplo, papel mixto, metales, etc.), y disponen de ellos en los contenedores por debajo de las correas horizontales. Los contenedores se vacían periódicamente en máquinas de prensado.

RRT Engineering, una empresa estadounidense que se especializa en la construcción de plantas MRF, ha proporcionado amablemente al EEC el dibujo del Apéndice 5 que muestra una instalación de capacidad de procesar hasta 80.000 toneladas de materiales reciclables de flujo único y se estima que cuesta alrededor de US\$ 7 millones en construir, incluyendo la preparación del sitio, acceso de camiones, edificación, y equipamiento MRF.

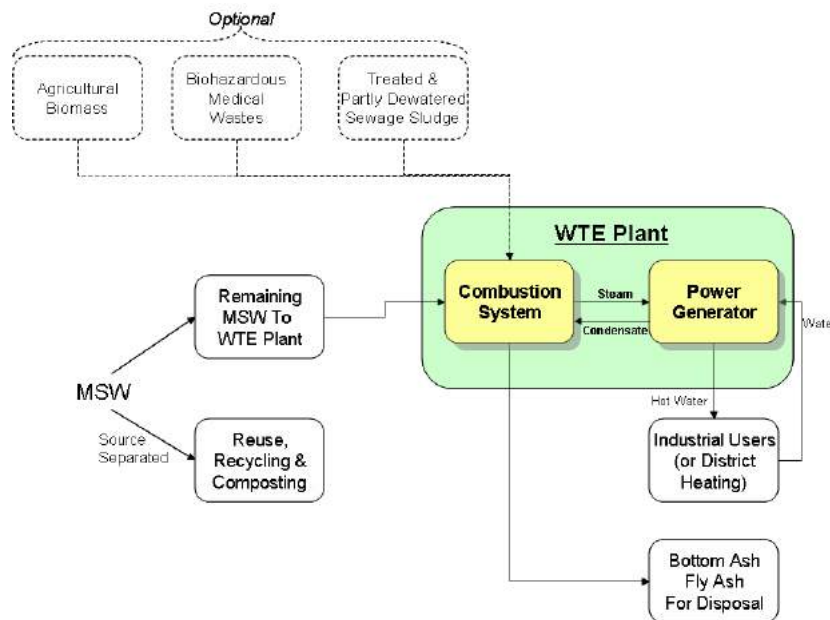


FIGURA 39 FLUJO DE MATERIALES DENTRO Y FUERA DE UNA PLANTA WTE (EEC)

## 5.15 NORMAS DE EMISIÓN

Las plantas WTE modernas están construidas para cumplir con los límites europeos (Tabla 15), que son similares a las normas de la USEPA y son las normas más estrictas aplicadas a las fuentes industriales de alta temperatura, incluyendo las plantas eléctricas de carbón, fábricas de cemento y fundiciones de metales (tabla también incluye límites de países seleccionados de América Latina y el Caribe). Además, como se explica en 5.10, las emisiones de WTE son más bajas que las emisiones de los vertederos y, en general, también son más bajas que las emisiones de las centrales eléctricas de carbón. Se recomienda que las solicitudes de propuestas para una nueva planta WTE estén basadas en equipos de control de contaminación del aire que pueden resultar en emisiones menores que las de estas normas, incluso si algunas de las normas nacionales actuales permiten emisiones mayores que las que se muestran en la Tabla 15.

TABLA 15 NORMAS DE EMISIÓN

Contaminante	Límites U.E.	Límites EE.UU.
	Base seca 11% O <sub>2</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> )	
<b>TOC</b>	10	15
<b>HCL</b>	10	29
<b>HF</b>	1	NA
<b>SO<sub>2</sub></b>	50	61
<b>NOx</b>	200	219
<b>Cd</b>	0,05 Total	0,008
<b>Cd, Ti</b>		NA
<b>Hg</b>	0,05	0,04
<b>Pb</b>		0,11
<b>Pb, As, Sb, Cr, Cu, Mn, Ni, V</b>	0,5 Total	NA
<b>CO</b>	50	89
<b>Dioxinas y furanos</b>	0,1 ng/Nm <sup>3</sup> EQT	9,9 ng de dioxinas total = 0,1 ng EQT

## 5.16 PERSONAL COMPLEMENTARIO PARA PLANTA WTE DE TAMAÑO MEDIO DE TRES LÍNEAS

El personal necesario para el funcionamiento de una instalación de una línea WTE pequeña a mediana (10-20 toneladas por hora o 80.000-160.000 toneladas por año) se compone de:

- 1) Administrador de instalación
- 2) Asistente administrador
- 3) Personal administrativo (6)
- 4) Ingeniero jefe
- 5) Ingeniero asistente

- 6) Laboratorio (2)
- 7) Supervisores de turno (5)
- 8) Operadores de la sala de control (5)
- 9) Operadores de grúas (10)
- 10) Seguridad (2)
- 11) Entrada (2)
- 12) Otros (4)
- 13) Total: 40

El número total de empleados oscila entre alrededor de 40 personas para una planta de una línea hasta 50 personas para una planta de un millón de toneladas que consiste de tres líneas. El administrador potencial debe estar involucrado en el proyecto desde el principio para entender por qué y cómo se tomaron las decisiones. La formación del personal debe ser incluida en el costo de capital, ya que el fabricante debe proporcionarla. El personal debe ser contratados de 6 a 12 meses antes de la puesta en marcha de la planta y deben ser entrenados en instalaciones operativas antes del arranque. Estos servicios son muchas veces incluidos en el contrato del proveedor. Por lo general, se requiere un cierre de una línea de horno una vez al año.

### 5.17 COSTOS DE CAPITAL Y DE OPERACIÓN

---

Los costos de capital y operativos, así como los ingresos, de plantas WTE se ejemplifican en los tres casos de estudio analizados en la segunda parte de esta Guía.

**Costos de capital:** Los costos de capital incluyen la parcela de terreno, construcción de instalaciones, servicios y otras obras de infraestructura (por ejemplo, carreteras). Estos costos varían de acuerdo con el sitio específico, y también, parte del equipo tiene que ser importado. Por lo tanto, los datos locales de mano de obra y materiales deben ser recogidos y los riesgos de cambio tomados en consideración. Como se ha señalado antes, debido a su tamaño, la necesidad de alta disponibilidad de las instalaciones y sistemas de APC altamente avanzados, las plantas WTE son muy costosas de construir. En función de su capacidad y ubicación, una planta WTE puede costar entre US\$ 500 y US\$ 1.000 por tonelada de capacidad de producción anual (o incluso hasta US\$ 2.000/ton, como se indica por el Banco Mundial).

La amortización de la inversión de capital, incluyendo los costos de puesta en marcha, es el elemento de mayor costo de las instalaciones WTE. En algunos países, una parte del costo de capital se proporciona en forma de subvención por el gobierno local, nacional o internacional, o de organismos multilaterales. Los futuros propietarios de la instalación, ya sea privada o una asociación público-privada (Public Private Partnership, (PPP)), proporcionan otra parte, y el resto se obtiene en forma de un préstamo a largo plazo por parte de un banco nacional o internacional. Se puede asumir una vida de proyecto de veinte años, aunque la experiencia internacional ha demostrado que este tipo de plantas son constantemente mantenidas y mejoradas; por lo tanto, similar a los puentes y otras infraestructuras, tienen tiempos de vida muy largo. Un ejemplo en los EE.UU. es la instalación Saugus, MA de Wheelabrator Technologies, que ha completado treinta y cuatro años de servicio y en la actualidad está en mejores condiciones que cuando fue construida.

**Efecto de la disponibilidad de planta sobre requerimientos de capital por tonelada de RSU:** La disponibilidad de la planta es un factor muy importante en la rentabilidad de una planta WTE. Se



calcula dividiendo el número de horas que la planta opera a capacidad de diseño (por ejemplo, 30 toneladas/hora) por el número total de horas en un año. Las horas no operacionales incluyen paradas de mantenimiento (programadas y no programadas), además, interrupciones de corta duración debido a problemas temporales con algún equipo. Es evidente que la disponibilidad de la planta resulta ser, por ejemplo, 60% en lugar del 90% previsto, el requerimiento de capital por tonelada de RSU procesado será 50% más alto.

Los **costos de operación** incluyen:

- Personal
- Productos químicos para el sistema APC: cal, urea, carbón activado, etc.
- Mantenimiento de equipos
- Manipulación y eliminación de cenizas WTE
- Limpieza de gases
- Pruebas ambientales
- Seguros

---

## 5.18 INGRESOS

---

**Tasa de entrada:** La principal fuente de ingresos para una planta de WTE es el pago de una "tasa de entrada" (también llamada "cuota de inflexión"), por tonelada de DSM entregado a la planta de procesamiento. Cabe señalar que también se requiere una tasa de entrada para el depósito en vertederos sanitarios, pero suele ser más baja que la tasa de entrada WTE, a menos que el gobierno nacional imponga un impuesto sobre el depósito en vertederos. En los EE.UU., la tasa de entrada WTE oscila entre US\$ 53/tonelada en Florida a US\$ 85/tonelada en Nueva Jersey. La tasa de entrada depósito en vertederos varía desde US\$ 28/tonelada en Texas a US\$ 96/tonelada en New Hampshire. En los tres estudios de caso de América Latina (segunda parte de la Guía), la tasa de entrada para el relleno sanitario osciló entre US\$ 13-20/tonelada. En Europa, por ejemplo en el Reino Unido (WRAP, 2011), las tarifas de las plantas WTE varían entre US\$ 80-150/ton, en Dinamarca y Alemania (Reporte de países para CEWEP) va entre US\$ 100/ton -150/ton.

En algunos países desarrollados, los ciudadanos pagan por los servicios de gestión de residuos de la misma forma que pagan por otros servicios, como la electricidad y el agua. En otros, el gobierno subsidia la tasa de entrada de diversos impuestos por lo que los ciudadanos no tienen indicación directa del coste de la gestión de sus residuos.

**Electricidad y vapor:** La venta de electricidad y vapor representa la segunda fuente importante de ingresos para una planta de WTE. Su cálculo dependerá de a) producciones comprobadas de una tecnología en particular, b) proyección de la disponibilidad de la planta WTE, y c) acuerdos locales, por ejemplo, con servicios públicos u otras industrias, para la compra a largo plazo de la energía de la instalación.

**Créditos de carbono:** precios de las RCE varían dependiendo de varios factores. En las transacciones de mercado RCE actuales el precio de un RCE está en el rango de US\$ 12-20. Este es un ingreso atractivo que debe ser considerado en el desarrollo de una instalación de WTE en la región.

**Otros ingresos:** Como se dijo anteriormente, los metales ferrosos y no ferrosos se pueden recuperar de las cenizas de fondo de la planta WTE. La porción que podría ser recuperada es aproximadamente 50% ferroso y 8% no ferroso<sup>38</sup>.

---

## 5.19 PARTES PRINCIPALES DE UNA PLANTA WTE

---

La construcción de una planta de WTE usualmente se divide en las siguientes partes principales:

- Obras de ingeniería civil (preparación del sitio, edificación, servicios, áreas verdes)
- Horno y equipo de combustión de parrilla, incluyendo el manejo de cenizas
- Caldera
- Sistema de Control de la Contaminación del Aire
- Turbina de vapor

La propuesta de los contratistas generales que respondieron a la solicitud de propuestas de un municipio especificará el equipo a utilizar y los subcontratistas que proporcionarán los diferentes componentes. Para reducir el costo de capital, la construcción y equipos deben ser proporcionados localmente tanto como sea posible.

---

## 5.20 PROVEEDORES DE INSTALACIONES WTE

---

Como se ha señalado anteriormente, el componente más importante de una planta de WTE es el horno y la parrilla móvil. Hay varios proveedores de Europa, América, y China de tales equipos, incluyendo Martin GmbH, Hitachi Zosen Inova, CNIM, Keppel Seghers, Baumgarten, Fisia Babcock, Babcock & Wilcox, Völund, Covanta Energy, Wheelabrator Technologies, Urbaser, Sanfeng Covanta, y otros. El Apéndice 3 proporciona una lista de proveedores de tecnología y equipos WTE.

Algunas de estas empresas también pueden actuar como contratista general, con subcontratistas que proveen las obras civiles, calderas, turbinas de vapor y el sistema APC. Es muy importante que el contrato con el contratista general incluya la formación y puesta en marcha de los servicios.

Se proporciona una lista de proveedores de WTE en el Apéndice 1. Una tabla de todas las instalaciones de combustión WTE conocidas en el mundo se puede ver en el Apéndice 3.

---

## 5.21 MODELOS DE NEGOCIO UTILIZADOS EN RELACIÓN CON LA PROPIEDAD DE UNA PLANTA DE WTE DURANTE UN PERIODO A PLAZO (NORMALMENTE DE 20 AÑOS)

---

- Propiedad pública: Finanzas, diseño, licitación, construcción y operación.

- Propiedad pública: Finanzas, diseño, licitación y construcción; además de contrato de plazo separado con empresa privada para operar.
- Propiedad pública: Contrato temporal con la empresa privada para diseñar, construir y operar la planta (este es el modelo de negocio seleccionado por el Condado de Durham, Ontario para la construcción de plantas WTE a partir de agosto de 2011).
- Asociación público-privada (PPP): Finanzas, diseñar, construir y operar con propiedad privada transfiriendo al municipio al final del plazo.
- Propiedad privada: Financiación y propiedad privada del 100% de las instalaciones, mediante concesión o contrato de licencia; con la propiedad de revertir al municipio al final del plazo. Esto también se llama un acuerdo BOT (Build-Own-Transfer).
- Propiedad privada: Empresa privada propietaria del 100% de las instalaciones a través de un acuerdo de licencia durante un período a plazo. El municipio puede adquirir la planta al final del plazo a valor de mercado.

## 5.22 CICLO DEL PROYECTO

---

Un ciclo de proyectos WTE consta de varias etapas:

**Estudio de pre-factibilidad** se lleva a cabo utilizando los datos disponibles y proporciona una estimación del orden de magnitud de la producción de RSU y su composición, la capacidad ideal de la planta, características operativas, incluyendo la generación de energía proyectada, los costos de capital y operativos, y los ingresos. Sobre la base del estudio de pre-factibilidad, se toma una decisión sobre si continuar con la siguiente etapa de Factibilidad y Licitación.

**Factibilidad y Licitación:** La viabilidad del proyecto se establece a partir de datos de ingeniería detallados acerca de todos los aspectos del proyecto con el fin de obtener estimaciones fiables y precisas. Durante esta etapa, se establecen las responsabilidades de cada una de las partes interesadas y se hacen acuerdos con respecto al suministro de residuos y ventas de energía. Además, todas las cuestiones financieras se resuelven, es decir, se debe decidir el modelo de financiación del proyecto.

La licitación se divide en dos etapas: a) Presentar una Solicitud de Cualificaciones (Request for Qualifications, (RFQ)) y evaluar las respuestas de la RFQ; y b) la selección de las empresas que serán invitadas a responder a la Solicitud de Propuestas (Request for Proposals, (RFP)), en relación con la negociación de las responsabilidades respectivas, y la selección de la empresa para construir la WTE. Estos aspectos se discuten en adelante en el Proceso de adquisición.

## 5.23 PROCESO DE ADQUISICIÓN

---

**Etapa 1 - Solicitud de Cualificaciones (RFQ)** de los proveedores, algunos de los cuales se invitará a la siguiente etapa de Solicitud de Propuesta (RFP).

- a) **los criterios técnicos**
  - Presentación técnica completa

- Tecnología WTE propuesta
- Equipo central del proyecto propuesto
- Instalación de referencia, donde se está utilizando la tecnología
- Registro de disponibilidad de la planta y generación de energía
- Otros

**b) Criterios Financieros**

- Capacidad para proporcionar adherencia
- Capacidad suficiente para construir
- Otros

**Etapa 2 - Solicitud de Propuesta (RFP):** recepción, revisión y evaluación de las propuestas, la identificación de proveedor preferido y negociación de contrato comercial.

- Identificar una empresa con la que un diseño, construcción, operación, u otro tipo, se ejecutará el contrato por un período de 20 años. También puede haber un acuerdo de "primeras obras" con esta compañía para obtener información de propiedad que pueda ser necesaria para concluir la evaluación ambiental del proyecto.
- Negociación de contratos comerciales a largo plazo de acuerdo con el modelo de negocio elegido.

## 5.24 USO DE CONSULTOR INDEPENDIENTE Y MONITOR DEL PROCESO DE ADQUISICIÓN

---

Sobre la base del estudio de pre-factibilidad de un proyecto WTE, el municipio puede decidir continuar con la ejecución del proyecto y la emisión de la RFQ para el proyecto. Se recomienda que en este momento, la autoridad responsable del proyecto contrata los servicios de una empresa de ingeniería que actuará como consultor del municipio durante la ejecución de este proyecto. Esta firma debe tener un registro de actuar en la misma capacidad en proyectos WTE anteriores. El consultor también servirá como el monitor independiente del proceso de adquisición:

- Revisar la equidad del diseño de los criterios para las solicitudes de RFQ y RFP.
- Revisar un acuerdo de participación que será necesario que todas las empresas que respondieron a la petición de oferta firmen con el fin de obtener acceso al estudio de Pre-Factibilidad y Datos.
- Participar en el desarrollo del procedimiento y los principios para la evaluación de las propuestas RFP.
- Supervisar el desarrollo de las reuniones “comercialmente confidenciales” con cada proponente precalificado.

## 5.25 OBLIGACIONES CONTRACTUALES DEL CONTRATISTA GENERAL Y DEL MUNICIPIO

---

- La propuesta de proyecto incorporará tecnología de punta de control de emisiones que cumpla o exceda las emisiones de la Unión Europea y las normas de vigilancia, así como la Tecnología de Control Máximo Alcanzable (Maximum Achievable Control Technology, (MACT)) de la USEPA.
- Capacidad diaria y anuales previstas de las instalaciones.
- Proporcionar para control de flujo completo de los RSU por los propietarios municipales.
- Garantías contractuales de emisión, lo que implica recursos contractuales significativos, que cumplan con los límites de la UE y de la USEPA.
- Capacidad de planta de proporcionar para el aumento de la tasa de reciclaje en el municipio.
- La apariencia estética de la planta (tratamiento arquitectónico; paisajismo; instalaciones de los visitantes).
- La generación de electricidad, en MW y MWh/año; conexión a la red; precio garantizado para electricidad.
- Disposición para calefacción/refrigeración industrial/comercial .

Obligaciones financieras:

- Sanciones por velocidad de procesamiento real menor que la capacidad de diseño, después de período de puesta en marcha acordado.
- Las sanciones por entrega inferior de RSU por el municipio que la capacidad de diseño de WTE.
- Tasas de entrada acordadas por tonelada de RSU procesados y método para ajuste del costo de vivir con el tiempo.

## 5.26 CRONOGRAMA TÍPICO PARA LA TERMINACIÓN DEL PROYECTO

Estudio de prefactibilidad incluyendo el emplazamiento de la planta WTE: 12 meses

Viabilidad y análisis de costos y beneficios, incluyendo el diseño WTE: 4 meses

Preparación y puesta en marcha de los documentos de licitación: 6 meses

Adjudicación del contrato, 10 meses:

Mes 1: Solicitud de Calificaciones (RFQ)

Mes 3: Presentación de las respuestas a la RFQ

Mes 5: Solicitud de Propuestas (RFP) de empresas calificadas

Mes 8: Presentación de RFP

Mes 10: Selección de empresa para construir la planta;

Permisos ambientales de la instalación: 10 meses

Finalización del diseño de acuerdo a la licencia ambiental: 1 mes

Fase de construcción: 24 meses

Contingencia: 5 meses

Total: 72 meses

---

## 5.27 PROBLEMAS REGULATORIOS, SOCIALES Y OTROS

---

Normas nacionales y locales que afectan a la implementación y operación de las instalaciones WTE varían ampliamente, como lo ilustran los tres casos de estudio presentados en esta Guía.

**Sistema de gestión de residuos:** Un requisito básico para la introducción de WTE es que existe un sistema de gestión de residuos que funcione bien en el país. Sin esto, la cantidad de residuos que se entregue a la planta no puede ser garantizada, y la construcción de la planta puede ser demasiado arriesgada.

**Sinergias con otras entidades y comunidades vecinas:** Las sinergias con las industrias (o parques eco-industriales) interesadas en la compra de calor (vapor), o con las industrias interesadas en la compra de materiales recuperados (por ejemplo, metales), puede ayudar a la planta a asegurar ciertos ingresos. Además, los acuerdos con las comunidades vecinas pueden ayudar a aumentar la rentabilidad de la planta WTE mediante el aumento de su materia prima.

**Información pública:** La aceptación del público es esencial para el éxito de un proyecto WTE. Algunos proyectos WTE alrededor del mundo han fallado o se aplazaron durante varios años debido a la falta de información al público sobre los beneficios ambientales en comparación a los vertederos. Por lo tanto, es importante proporcionar información completa y detallada sobre el proyecto a la comunidad desde el principio. Grupos comunitarios deben ser formados para explicar los impactos de la planta en la comunidad. Es importante escuchar las preocupaciones de la gente, para hacer frente a cualquier malentendido, y para disipar conceptos erróneos, como el que WTE compite con el reciclaje. Inicialmente un plan de conciencia pública y comunicación deben desarrollarse describiendo los principales objetivos de la campaña de sensibilización pública y las principales herramientas para implementarla.

La campaña de información pública debería:

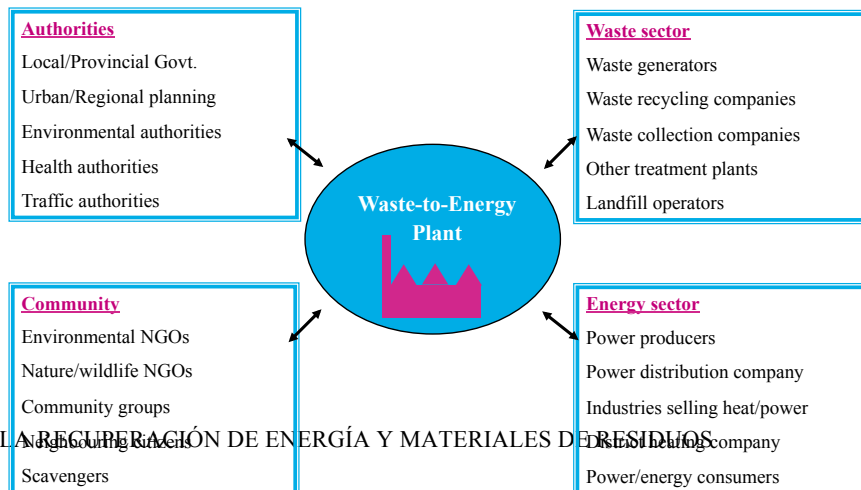
- Subrayar la utilización de la energía a partir de residuos y garantizar la aceptación del público a través de la promoción de los beneficios para la sociedad. Un objetivo básico de la campaña debe ser la comunicación de WTE como una práctica de gestión de residuos fiable que está fuertemente relacionada con la gestión integrada de los desechos y el desarrollo sostenible.
- Atender las oposiciones y desviar la percepción negativa de las plantas WTE (especialmente en relación con los ciudadanos que viven cerca de las instalaciones). La percepción negativa de los ciudadanos para plantas WTE se basa parcialmente en la idea errónea o información falsa de que las plantas WTE darán lugar a la emisión de emisiones atmosféricas peligrosas - principalmente dioxinas.

Tras la finalización del plan de comunicación, las medidas propuestas deben ser implementadas con el fin de que el público tome conciencia de los beneficios del desarrollo de las plantas WTE y de esta manera la oposición pública pueda ser reducida. Estas herramientas incluyen:

- Los medios de comunicación
  - Spots en la televisión nacional y local
  - Spots en la radio local y nacional
  - Anuncios en prensa nacional y local
  - Página web
  - Distribución directa de material a través de correo electrónico, correo, etc.
  - Boletines
- La promoción de medios
  - Distribución de panfletos / folletos
  - Difusión de guías, revistas
  - Desarrollo de carteles y anuncios en puntos centrales
- Medios directos de comunicación
  - Discusiones
  - Cartas a las partes interesadas
  - Participación/organización de seminarios, conferencias
  - Desarrollo de línea telefónica de ayuda

**Partes interesadas:** Varias entidades se verán afectadas de manera diferente por el proyecto WTE:

- Organismos públicos y empresas privadas involucradas en la recolección y disposición de residuos: Todas las entidades del sistema de gestión de residuos tienen que ser parte del proyecto con el fin de garantizar que habrá suficiente residuos entregados en la planta.
- Agencias de energía/electricidad y empresas: Estas entidades tienen que estar involucrados desde el inicio del proyecto para asegurar que la planta está en línea con todas las regulaciones para la venta y distribución de energía, y para asegurar acuerdos de compra a largo plazo.
- Grupos comunitarios: Como se mencionó anteriormente, es importante la participación de la comunidad desde el principio, para evitar la oposición pública.



## 5.28 RIESGOS Y EFECTOS POSITIVOS RELACIONADOS CON LA IMPLEMENTACIÓN DE WTE

---

Los posibles riesgos y problemas que pueden surgir durante el desarrollo y operación de una planta WTE están básicamente relacionados con la necesidad de tener un flujo continuo de residuos de propiedades similares, así como con el hecho de que globalmente las tasas de gestión de residuos aumentarán y los ciudadanos pueden no estar en condiciones de soportar este coste adicional.

En cuanto al flujo de residuos, un gran riesgo está asociado con el hecho de que no es posible tener una proyección de flujo de residuos segura para los próximos 20 o 30 años (tanto en términos de cantidad y composición de los residuos), y cambios significativos afectarán la operación y economía de la instalación. Las instalaciones WTE son costosas y por lo tanto los recolectores de residuos pueden seleccionar continuar con la práctica actual más barata de eliminación controlada o no controlada en vez de llevar los residuos a la planta de WTE. La posible incapacidad de los ciudadanos para pagar las tasas adicionales también pueden contribuir a este resultado.

Por otra parte, en caso de que las cantidades de residuos que terminan en la planta WTE sean significativamente menores que las cantidades estimadas inicialmente, la planta puede no ser capaz de producir suficiente energía para que la inversión sea viable. Además, el aumento potencial del reciclaje afectará el valor calorífico de los residuos de entrada (ya que grandes partes de papel y plásticos serán desviados de la planta WTE) resulta en una reducción en la producción de energía y por lo tanto una reducción en los ingresos. Esto tendrá un impacto negativo en los costos de operación y tasa de entrada ya que puede ser necesario el uso de fuentes de energía convencionales (por ejemplo, gas natural) para mantener el calor térmico en la cámara de incineración.

Para hacer frente a estos motivos de riesgo en contra o incluso la prohibición de vertido de residuos o subsidios y políticas que promueven plantas WTE deben estar en su lugar con el fin de desviar las prácticas de gestión de residuos a soluciones más modernas. En este sentido, se deben desarrollar políticas específicas que promoverán el desarrollo y el funcionamiento de las plantas WTE, incluyendo

- Las políticas financieras
  - i. Ayuda económica para la construcción de la planta de WTE
  - ii. Préstamos con buenas condiciones para la construcción de la planta WTE
  - iii. Exenciones fiscales para operadores WTE
  - iv. Imposición de impuesto sobre el vertido
  - v. Subvenciones de precios de electricidad
  - vi. Subvención de las tasas de compuerta WTE
- políticas legales
  - vii. Restricción de la eliminación de residuos
  - viii. Simplificación de los procedimientos de autorización para las plantas WTE
- Otras políticas



- ix. Promoción de asociaciones público-privadas para el desarrollo de WTE
- x. Certificación "verde" de la energía de WTE

Por otra parte hay que tener en cuenta que también hay riesgos no técnicos relacionados con el desarrollo de las plantas WTE que derivan de las prácticas seguidas por los vendedores WTE con el fin de promover su producto. Más específicamente, en muchos casos se promueve WTE como la "solución mágica", ignorando las características financieras, sociales e institucionales específicas de la zona bajo examinación, así como el estado actual de la gestión de residuos (por ejemplo, incluso en las zonas muy pobres sin sistema organizado de manejo de residuos y sin regulaciones). En tales casos, el desarrollo de las plantas WTE está destinado al fracaso y este hecho genera un error general en el desarrollo de WTE (es decir, incluso propuestas justificadas y bien desarrolladas para plantas WTE no pasan a aplicarse debido a tales conceptos erróneos). En cualquier caso, las plantas WTE pueden desarrollarse bajo condiciones muy específicas y todas las características específicas de la zona necesitan tenerse en cuenta con el fin de asegurarse de que el proyecto se convertirá en un éxito.

Los sistemas de WTE también tienen efectos positivos para las zonas en las que se implementan, incluyendo la minimización de los residuos que terminan en los vertederos, así como la generación de energía a partir de combustibles no fósiles. Los efectos positivos de un total de los sistemas de WTE incluyen:

- Crecimiento:
  - Nuevas oportunidades de empleo y la creación de capacidades en el sector de los residuos y energía
  - Entrega de conocimientos y desarrollo de la infraestructura industrial adicional
- Dependencia energética:
  - Reducción de la dependencia de los combustibles fósiles
  - La reducción de precio de la electricidad para la comunidad de acogida
  - Aumento de la producción de energía a partir de recursos renovables
- Condiciones ambientales:
  - Preservación de espacio en los vertederos a través de la reducción de residuos con destino al vertedero
  - Aumento de la producción de energía a partir de recursos renovables y la preservación de los recursos naturales, a saber, los combustibles fósiles
  - Reducción de las emisiones a la atmósfera (principalmente CO<sub>2</sub>) a partir del consumo de combustibles fósiles

## 5.29 PROYECTOS WTE EN LA REGIÓN DE AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE

---

La aplicación de tecnología WTE requiere planificación cautelosa y comprensión de las condiciones locales. El objetivo de esta sección es describir las características especiales de la región de América Latina y el Caribe (ALC) con el fin de examinar si los proyectos WTE son viables en la región. Por esta razón, las características especiales de la región se presentan en primer lugar, mientras que una tabla al final ofrece comentarios útiles sobre WTE y estas características.

Para empezar, ALC es el continente con la segunda mayor proporción de población urbana después de América del Norte. Según los últimos datos, el 79 por ciento de la población de ALC vive en ciudades, y uno de cada cinco habitantes de las ciudades vive en las grandes aglomeraciones urbanas. Además, ALC ahora tiene 51 ciudades con más de un millón de habitantes - 14 de las cuales están en Brasil - incluyendo las cuatro grandes ciudades (Ciudad de México, Sao Paulo, Río de Janeiro, Buenos Aires) y Lima, que está cerca del límite de población de diez millones.

La urbanización conlleva un alto crecimiento de la población y de los ingresos, así como el crecimiento espacial imprevisto de las ciudades. Más específicamente, de 2002 a 2010, la población urbana en ALC aumentó en casi 63 millones, mientras que el producto interno bruto per cápita aumentó en un 23%. Las áreas urbanas de ALC se están convirtiendo en una simbiosis de la extrema riqueza y la extrema pobreza, al mismo tiempo que permite el surgimiento de una nueva clase media. Es característico que el 40 por ciento de la población de la Ciudad de México y un tercio de la población de Sao Pablo se encuentra en o por debajo de la línea de pobreza. Como muestran las tendencias, la población urbana seguirá aumentando con tasas altas haciendo todo el uso potencial de la tierra aún más valioso. Las estimaciones para 2050 hablan de una población cuarenta por ciento más urbana que la actual, superior a 650 millones.

Una significativa, y en muchos casos, dominante, característica del sector de gestión de residuos sólidos en el ALC es el grande y potente sector informal. Los catadores en Brasil, los pepenadores en México y los cartoneros en Argentina son ejemplos típicos del sector informal de residuos, contribuyendo al máximo al reciclaje y la reutilización, y por lo tanto a la minimización de los residuos que se lleva para su eliminación. El BID estima que el sector informal de residuos en ALC varía de 500.000 a 3,8 millones de personas. Sin embargo, aparte de su gran número, otra característica importante del sector informal es su actitud hostil contra cualquier cambio potencial en las prácticas actuales de gestión de residuos, por temor de que pueden perder sus puestos de trabajo.

A pesar del hecho de que el funcionamiento de vertederos incontrolados y al aire libre es la causa de problemas ambientales y de salud significativos, y casi el 50% de los residuos generados en la región no se desecha adecuadamente, con la falta de voluntad política y legal que ha sido identificado como las principales razones de esta situación.

La prosperidad económica está directamente conectada a la generación de residuos sólidos. La evidencia empírica para la generación de residuos ha demostrado que un aumento del 1% en el producto interno bruto per cápita genera un aumento de 0,69% en la cantidad de residuos sólidos urbanos. A pesar del hecho de que el crecimiento económico en ALC ha ido comprensiblemente desacelerando desde el 6% en 2010 al 4,5% en 2011 y al 4% en el año 2012, las tasas de desarrollo siguen siendo bastante altas, con las proyecciones para ser optimistas en cuanto a la continuación del desarrollo. Se espera que esta prosperidad económica dará lugar a un aumento de la generación de residuos sólidos. Un ejemplo típico es el de Brasil, que en 2010 examinó un aumento del 6 por ciento en su producción de residuos sólidos urbanos, la que frena sin embargo hasta el 1,8% en 2011. De este modo, la búsqueda de una solución fiable y sostenible para el tratamiento de los residuos es más que necesaria. Sin embargo, se debe mencionar que el aumento en el producto interno bruto per cápita puede hacer viables y asequibles las tecnologías de tratamiento más caras, si no en toda ALC, al menos en los países o ciudades específicas.

Una cuestión adicional a los anteriormente citados, los de urbanización y del desarrollo económico, es cubrir la creciente demanda de energía. Para el año 2030, con una modesta tasa de crecimiento económico, la demanda de ALC para la electricidad llegaría a cerca de 2.500 teravatios-hora (TWh), frente a los de alrededor de 1.150 TWh en 2008. Bajo este objetivo, el tratamiento de residuos sólidos puede ser utilizado como una fuente alternativa de energía, promoviendo en estos casos las tecnologías que incluyen la producción de energía. Sin embargo, un factor que afecta en gran cantidad el éxito de este tipo de tecnologías es el precio de la energía que las autoridades públicas están dispuestas a pagar. A medida que la inversión en nueva capacidad de generación se estima en alrededor de \$ 430 millones de dólares entre 2008 y 2030, una pequeña parte de ella podría ser invertida en proyectos WTE, generando no sólo la electricidad sino también entregando una solución adecuada a los residuos generados en las áreas urbanas y metropolitanas.

La siguiente tabla resume las principales características de ALC y ofrece útiles comentarios respecto a cada característica.

TABLA 16 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE ALC

<b>Característica</b>	<b>Información</b>	<b>Comentario</b>
<b>Urbanización</b>	79 por ciento de la población de ALC vive en ciudades, y uno de cada cinco habitantes de las ciudades vive en las grandes aglomeraciones urbanas	El uso del espacio es valioso para las autoridades públicas. Tecnologías WTE no sólo minimizan el volumen de residuos que deben ser eliminados, si no que también requieren un área mucho menor en comparación con los vertederos
	De 2002 a 2010, la población urbana en ALC aumentó en casi 63 millones	Características de los residuos de las zonas urbanas son similares a las que se requieren para el funcionamiento adecuado y sostenible de la planta de WTE
	Las estimaciones para 2050 hablan de una población cuarenta por ciento más urbana que la actual, superior a 650 millones	Áreas metropolitanas y urbanas pueden proporcionar un flujo regular de residuos
<b>Sector informal</b>	El sector informal de residuos en ALC se estima entre 500.000 y 3.8 millones de personas	La aplicación de cualquier tecnología WTE en ALC debe tomar seriamente en consideración el sector informal de residuos
	Sector informal de desechos se opone fuertemente a cualquier cambio potencial en las prácticas actuales de gestión de residuos, por temor a perder su empleo	En primer lugar los planificadores deben evaluar si pueden integrar al sector informal en el nuevo sistema, proporcionando puestos de trabajo, ya que la recogida de residuos o de barrido es en la mayoría de los casos lo único que saben hacer. De lo contrario, los planificadores deben evaluar si pueden coexistir ambos lados y para mutuo beneficio

<b>tratamiento de residuos ineficiente</b>	Casi el 50% de los residuos generados en el ALC no se desecha adecuadamente	Tecnologías WTE modernas garantizan el tratamiento adecuado de los residuos sólidos urbanos, requiriendo sin embargo un fondo institucional para evitar fenómenos de funcionamiento inadecuado
	La falta de política y jurídica se han identificado como las principales razones de esta situación	
<b>Prosperidad económica y generación de residuos</b>	1% de aumento en el producto interno bruto per cápita genera un aumento de 0,69% en la cantidad de residuos sólidos urbanos	El desarrollo económico puede conducir tecnologías WTE a ser viables y asequibles, si no en todo ALC, al menos en los países o ciudades específicas
	El crecimiento económico de ALC está comprensiblemente desacelerando desde el 6% en 2010 al 4,5% en 2011 y al 4% en 2012, con las tasas sin embargo manteniéndose altas	Utilizando economías de escala, las autoridades pueden beneficiarse del aumento de la generación de residuos y lograr mejores condiciones financieras para la construcción y la operación de una planta de WTE
	Se espera que la prosperidad económica a conducir a un aumento de la generación de residuos sólidos, lo que hace imprescindible la búsqueda de una solución fiable y sostenible	
<b>Demanda de energía</b>	En el año 2030, con una modesta tasa de crecimiento económico, la demanda de LAC para la electricidad llegaría a cerca de 2.500 teravatios-hora (TWh), frente a las de alrededor de 1.150 TWh en 2008.	WTE puede ser una fuente alternativa de energía, siendo al mismo tiempo un ahorro neto de CO <sub>2</sub> En las zonas que la demanda de energía es mayor, se puede conseguir un mejor precio por la energía generada por las unidades WTE
	Es el precio de la energía generada en el que determina en gran medida el éxito y la viabilidad de un proyecto	A partir de los US\$ 430 mil millones estimados a ser invertidos entre 2008 y 2030 para la generación de energía, una pequeña parte de podría ser invertida en proyectos WTE, no sólo para la generación de electricidad, sino también para proporcionar una solución adecuada a los residuos generados en la región

Otro elemento en ALC, lo que puede afectar el desarrollo de las plantas WTE, es la diferencia significativa en el precio de la energía de un país a otro. Esta desviación tiene un impacto directo en la sostenibilidad real de las plantas WTE ya que tiene un efecto sobre los ingresos reales de la planta.

Además, ha de tenerse en cuenta que las prácticas de gestión de residuos que hoy se desarrollan en ALC son en la mayoría de los casos obsoletas y hay una falta de capacidad tecnológica y know-how y este hecho es una barrera importante en el desarrollo de plantas WTE en la zona, ya que las plantas WTE requieren personal especializado para supervisar su construcción y operación, así como para supervisar los elementos contractuales del desarrollo WTE. También vale la pena señalar que en muchos países no existe un marco legislativo que riga el desarrollo de instalaciones de gestión de residuos y especialmente las plantas WTE y debido a esta diferencia el rendimiento técnico y ambiental de estas instalaciones son difíciles de ser regulados y supervisados.



## 6. USO DE PAPEL Y PLÁSTICOS DE RSU EN LA PRODUCCIÓN DE CEMENTO

---

*Este capítulo es una adición a la versión en inglés del Guidebook (2013) y está basado en estudios realizados por el Earth Engineering Center a partir del año 2013.*

La industria del cemento es una de las más grandes del mundo con un estimado de 3.3 miles de millones de toneladas de cemento producidos en el mundo. La producción de cemento requiere típicamente 3.500 MJ de energía térmica para secar, descomponer, y sinterizar los minerales de carbonato y producir una tonelada métrica de "clinker" que luego se muele hasta polvo de cemento; por lo tanto, se requieren 140 kilogramos de un carbón de alta calidad (25 MJ/kg) para producir una tonelada métrica de clinker. La búsqueda de una mayor eficiencia energética ha llevado a la industria global del cemento a probar y utilizar materiales de desecho "como" combustibles alternativos (Alternative Fuels, (AF)).

Uno de estos usos es ejemplificado por el "combustible desarrollado" (Engineered Fuel, (EF)) que se utiliza en la planta de cemento de CEMEX Balcones (capacidad de 2,2 millones de toneladas, San Antonio, Texas). Consiste de plástico no negociable y residuos de papel de un centro de recuperación de materiales (MRF) que ordena el flujo de reciclables separados en el origen de San Antonio a productos comercializables. Otro ejemplo es el "combustible derivado de residuos" (RDF) que se utiliza en la planta de CEMEX Tepeaca (3,1 millones de toneladas/año, Puebla, México). Se produce en una MRF "sucia" donde basura mixta se separa a materiales reciclables comercializables (metales y algunos tipos de plásticos), a RDF, y residuos que se depositan en vertederos.

Ambos de los usos mencionados anteriormente fueron estudiados por el EEC de Columbia University y el City College de Nueva York y se incluye una Tesis de Master of Science (J. Zhang, 2013). Los resultados de este estudio se resumen como sigue:

### 6.1 EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CEMENTO

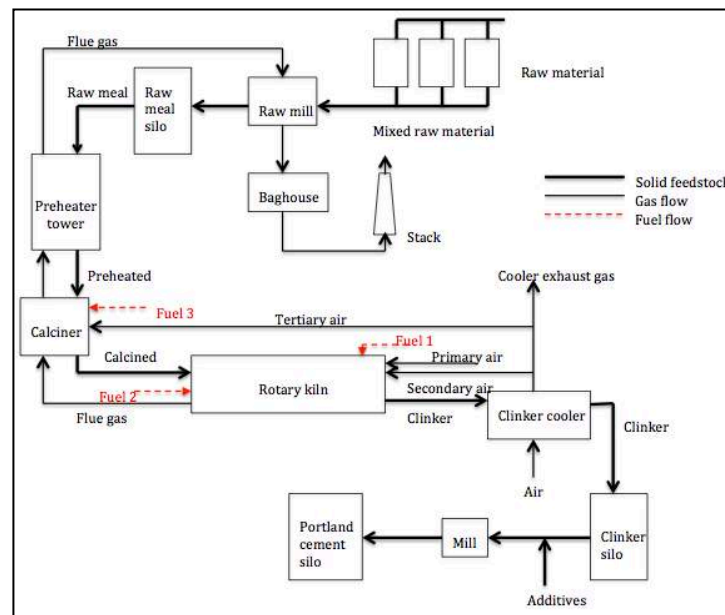
---

El cemento se produce principalmente a partir de una mezcla de piedra caliza y materiales a base de arcilla. La piedra caliza se produce de forma natural en la corteza terrestre y es generalmente una forma de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ). La arcilla se encuentra en el suelo y se compone de minerales, como el cuarzo y la calcita, y óxidos metálicos. El cemento se produce en un proceso de tres etapas. En la primera etapa, las materias primas extraídas, tales como piedra caliza, pizarra, y arcilla se trituran y mezclan en proporciones establecidas para conseguir la composición deseada del producto de cemento final. Esta mezcla se muele a un polvo fino que se llama "harina sin refinar" y es la materia prima para la segunda etapa de la producción de cemento, donde la harina sin refinar fluye por gravedad a través de un precalentador, calcinador y horno rotatorio (Figura 41). En un principio, todo el proceso de secado, calcinación y de sinterización se lleva a cabo en el horno, que podría ser de hasta 230 metros de longitud; plantas modernas están equipadas con precalentadores y precalcinadores y los hornos son de hasta 65 metros de largo y 6 metros de diámetro, dependiendo de la capacidad de la planta.

Los hornos de cemento están montados con una ligera inclinación para que el material que entra en el extremo de alimentación se transporte lentamente a través del horno hasta el extremo de descarga

inferior. Se introduce combustible al extremo de descarga, por lo que hay un flujo a contracorriente de sólidos y gas de combustión; sin embargo, algo de combustible, por ejemplo, neumáticos usados, puede introducirse en el extremo de alimentación. El combustible se inyecta a través de puertos especialmente diseñados para asegurar una buena mezcla con el aire y una combustión estable. La principal reacción química es la descomposición a aproximadamente 900 °C de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) en óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) y gas de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ); esto es seguido por la etapa de clinkerización (sinterización) en la que el óxido de calcio reacciona a una temperatura alta (normalmente 1400-1500 °C) con sílice, alúmina y óxido de hierro para formar silicatos de calcio, aluminatos, y ferritas. El clinker caliente descargado desde el horno de cemento se transfiere después a un refrigerador donde se enfría con aire. En la tercera y última etapa, el clinker se mezcla con yeso y otros materiales, tales como escoria de alto horno o cenizas volantes de carbón, y la mezcla se muele a un polvo homogéneo fino que se almacena en silos.

Aproximadamente el 40% de las emisiones totales de  $\text{CO}_2$  procedentes de la producción de cemento se deben a la combustión de combustibles. Otro 50% se asocia con los procesos químicos de la fabricación de cemento y 10% con el uso de electricidad y transporte<sup>40 41</sup>. El enfoque de I+D en la industria del cemento es aumentar la productividad, reducir el consumo de energía y minimizar las emisiones a la atmósfera. En la década de 1970, se introdujeron precalentadores y calcinadores por delante del horno de cemento para aumentar la eficiencia de energía y la producción de clinker para un tamaño de horno dado (Figura 41). Ahora los calcinadores se utilizan comúnmente en la mayoría de las fábricas de cemento. Harina sin refinar entra en la parte superior del precalentador donde se calienta por el flujo ascendente de gas. A continuación los sólidos precalentados fluyen hacia el calcinador, en el fondo del cual existen quemadores que aumentan la temperatura del flujo ascendente de gas del horno. El calor en el flujo de gas descompone la mayor parte del carbonato de calcio en los sólidos descendientes de modo que en el momento en que entren en el horno rotatorio, la pérdida de ignición (Loss Of Ignition, (LOI)) está en el rango del 30-35%. Se ha estimado que hasta el 60% del combustible total utilizado en el proceso de producción de cemento se quema en el calcinador. La calcinación restante tiene lugar en el horno giratorio, junto con la sinterización y producción de clinker. La Figura 41 muestra el flujo de sólidos y gases a través de todo el proceso de producción de cemento.



## 6.2 COMBUSTIBLES UTILIZADOS EN LA PRODUCCIÓN DE CEMENTO

La industria del cemento es una de las más grandes del mundo con un estimado de 3.3 miles de millones de toneladas de cemento producidos en el mundo. La producción de cemento requiere típicamente 3.500 MJ de energía térmica para secar, descomponer, y sinterizar los minerales de carbonato y producir una tonelada métrica de "clinker" que luego se muele hasta polvo de cemento; por lo tanto, se requieren 140 kilogramos de un carbón de alta calidad (25 MJ/kg) para producir una tonelada métrica de clinker. La búsqueda de una mayor eficiencia energética ha llevado a la industria global del cemento a probar y utilizar materiales de desecho "como" combustibles alternativos (Alternative Fuels, (AF)). En los EE.UU., el uso de AF (neumáticos, RDF, madera, residuos líquidos, etc.) en la industria del cemento incrementó de 28 mil millones de MJ en 1993 a 58 MJ billón en 2011. A una media estimada de 3.200 MJ de energía térmica consumida por tonelada corta de clinker, el número del 2011 corresponde a 18 millones de toneladas cortas de clinker, es decir, alrededor del 27% de la producción de cemento de Estados Unidos. De acuerdo con el Anuario Mineral USGS, los residuos sólidos utilizados en la industria del cemento (es decir, RDF, EF, madera, y otros sólidos desviados de los vertederos en Estados Unidos) en 2011 fueron 699.000 toneladas métricas, las cuales con un poder calorífico superior supuesto de 17,5 MJ/kg representó alrededor del 20% de la energía de AF utilizada en la producción de cemento. En Europa (UE-27), la utilización media de AF es aproximadamente el 30% de la energía térmica total, con los más altos niveles de 62% en Alemania, 63% en Austria, y el 83% en los Países Bajos.

### 6.2.1 COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS DERIVADOS DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES

El uso de materiales de desecho en las fábricas de cemento ha sido ampliamente expandido en los últimos años. En 2012, había aproximadamente 270 plantas de cemento en la Unión Europea y más de dos tercios de ellas utilizaban materiales de desecho como combustibles alternativos (Rootzen, 2012). La Tabla 17 muestra las tasas de sustitución de combustibles fósiles por combustibles alternativos en 2010 y 2011 para varios países europeos.

TABLA 17 RATIOS DE SUSTITUCIÓN DE COMBUSTIBLES FÓSILES POR COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS (AF) EN LOS PAÍSES EUROPEOS (ARANDA ET AL., 2013)

País	Tasa de reemplazo (%)	País	Tasa de reemplazo (%)
Italia	8.6	Austria	63.1
España	22.4	Suiza	49
Dinamarca	25	Bélgica	47.3



Francia	29.4	Alemania	62
Suecia	29	Países Bajos	83
Noruega	60	Reino Unido	39.5
Promedio EU-27	30.5		

Una variedad de combustibles derivados de residuos, tales como residuos de la trituración de automóviles (Automobile Shredder Residue, (ASR)), residuos de alfombras, textiles, residuos de cera, gases de vertedero, y combustibles derivados del flujo de residuos sólidos urbanos (RSU) se utilizan como combustibles alternativos (AF) en la producción de cemento. En este estudio, el uso de dos combustibles, ambos derivados de RSU, fue examinado para dos plantas de la empresa CEMEX: El "combustible desarrollado" (Engineered Fuel, (EF)) que se utiliza en la planta de cemento de CEMEX Balcones (capacidad de 2,2 millones de toneladas), cerca de San Antonio, Texas, Consiste de los plástico no negociables y residuos de papel de una Centro de Recuperación de Materiales (MRF) que ordena el flujo de reciclables separados en el origen de San Antonio a productos comercializables.. El "combustible derivado de residuos" (RDF) utilizado en la planta de CEMEX Tepeaca (capacidad: 3,1 millones de toneladas/año), cerca de la ciudad de Puebla en el sureste de México, se produce en una instalación donde la basura mezclada se separa entre materiales reciclables negociables (metales y algunos tipos de plásticos), RDF, y residuos que se depositan en vertederos. En ambos casos, el producto de "residuos en combustible" puede ser utilizado en forma de "fluff" triturado o peletizado para transporte eficiente a la planta de cemento.

### 6.3 PODER CALORÍFICO SUPERIOR (HHV) Y EL CARBONO BIOGÉNICO DE BALCONES EF

La Figura 42 muestra muestras "al azar" de "fluff" y pellets recogidos por el EEC durante la visita a Balcones. Pruebas de calorimetría y carbono biogénico se llevaron a cabo en estas muestras por el EEC del City College de Nueva York.



FIGURA 42 FOTOGRAFÍA DE MUESTRAS DE PELLET Y “FLUFF” DE BALCONES

Las pruebas de valor de calentamiento se llevaron a cabo en un calorímetro de bomba de oxígeno Parr 1341 para determinar el valor de calentamiento de muestras de EF utilizados por CEMEX. Un tamaño de muestra de aproximadamente un gramo se colocó en el recipiente, cargado con oxígeno a 3.000 kPa, y se enciende. El recipiente se sumergió en un baño de agua contenido dentro de una cámara aislada. El oxígeno de alta presión asegura que la muestra de ensayo (CEMEX EF) se quemó por completo. El calor de combustión se transfiere al baño de agua que es monitoreado y se registra el aumento de temperatura. El cambio de temperatura observada del baño de agua permite realizar cálculos precisos según el método ASTM D2015-96 para determinar el poder calorífico superior (HHV) de la muestra de ensayo. Se observó una mayor variabilidad en el valor calorífico medido para las muestras “fluff” de EF que las muestras de pellets de EF. Esto se atribuye al hecho de que para el “fluff”, la escala de 1-gramo es más heterogénea que cuando el EF se densifica por extrusión a pellets.

Los gases de combustión generados durante las pruebas de calorimetría se recogieron y se analizaron por medio del análisis ASTM C-14 para la distribución de carbono biogénico y de origen fósil en las muestras de EF de Balcones. Los resultados variaron de 60% a 81% de contenido biogénico. El contenido biogénico de combustible indica el grado de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que se generará cuando se quema el combustible. EF tiene un alto contenido biogénico, según lo confirmado por las pruebas de caracterización de EF llevadas a cabo por el EEC a partir de plantas de CEMEX, y por lo tanto va a producir menos emisiones de gases de efecto invernadero, como el CO<sub>2</sub>, cuando se utiliza como combustible en los hornos de cemento en comparación con el carbón y el coque de petróleo. El contenido biogénico de 60% del pellet está muy cerca de un típico flujo de RSU en combustión en las instalaciones de WTE. El hecho de que el valor de calentamiento de las muestras “al azar” recogidas por el EEC en Balcones es mucho menor que el HHV informado por Balcones indica que la proporción medida de carbono biogénico/fósil también fue baja y no se debe utilizar para determinar el efecto de gases de efecto invernadero de la utilización de EF en lugar de combustibles fósiles. Por lo tanto, una ruta alternativa fue seguida que se basa en el HHV de la muestra. La Tabla 18 muestra la concentración de hidrógeno-oxígeno-carbono y HHV de la madera de álamo, RDF, y neumáticos usados utilizados en plantas de cemento, en comparación con la celulosa, el principal constituyente de las fibras de papel.

TABLA 18 CONCENTRACIÓN DE C, H Y O Y HHV MEDIDO EN CUATRO MATERIALES SECOS

Composición	Madera de Álamo	RDF	Neumáticos	Celulosa
%C	47.50%	48.8	85.20%	44.40%
%H	6.10%	7.8	7.30%	6.20%
%O	44.50%	29.2	0.50%	49.40%
Estructura química calculada	C <sub>6</sub> H <sub>9,2</sub> O <sub>4,2</sub>	C <sub>6</sub> H <sub>11,7</sub> O <sub>2,7</sub>	C <sub>6</sub> H <sub>6,2</sub> O <sub>0,03</sub>	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub>

La estructura química correspondiente de los primeros tres materiales se calculó utilizando el método Themelis et. Alabama. en la literatura. Se puede observar que el material más biogénico, madera de álamo, contiene 4,2 átomos de oxígeno por cada 6 átomos de carbono; mientras que el material basada en combustibles fósiles más alto, neumáticos, contiene muy poco oxígeno. El EF Balcones, según lo informado por Balcones, tiene un HHV de aproximadamente 17,5 MJ/kg, lo que sugiere que su distribución de carbono es 80% biogénico, 20% de origen fósil y que los compuestos a base de carbono se diluyen con 20% de humedad, más materiales no combustibles. Esta es la composición de EF que se supone en la estimación de los efectos de gases de efecto invernadero de la utilización de EF en lugar de los combustibles fósiles.

#### 6.4 ESTUDIO DE LAS EMISIONES DE DIOXINAS CUANDO HAY CO-COMBUSTIÓN DE EF/RDF

Un argumento que se utiliza a veces en contra del uso de combustibles derivados de residuos en la producción de cemento es la emisión de dioxinas. Este problema fue examinado con gran detalle en la tesis Zhang (véase el Apéndice 1). Este estudio mostró que la concentración de dioxinas en los gases de chimenea del horno de cemento es de un orden de magnitud por debajo de los estándares de EE.UU. y U.E. (0,1 ng EQT/Nm<sup>3</sup> de gas de chimenea). En un estudio separado durante el 2014 por el EEC (18), se creó un inventario de todas las fuentes de dioxinas controladas (es decir, industrial) y no controladas (es decir, los incendios de vertederos, quema doméstica, etc.) en los EE.UU. Los resultados mostraron que las emisiones anuales de dioxinas procedentes de la industria del cemento de Estados Unidos ascendieron a 18 gramos de EQT, correspondiente al 0,5% de todas las fuentes de dioxinas tóxicas de los Estados Unidos (**Error! Reference source not found.**).

TABLA 19 INVENTARIO DE LAS FUENTES DE DIOXINAS DE 2012 DE ESTADOS UNIDOS, EN GRAMOS DE EQT

Emisiones de Dioxinas de la industria del cemento usando AF	18
Total fuentes controladas	511
Emisiones de la industria del cemento como % del total de fuentes controladas	3.50%
Total fuentes controladas y no controladas	3808
Emisiones de la industria del cemento como % del total de todas las fuentes	0.50%

#### 6.5 EFECTO DEL USO DE EF/RDF EN LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO PROCEDENTES DE LA PRODUCCIÓN DE CEMENTO

El estudio de Columbia-CCNY incluyó una evaluación del ciclo de vida (ACV) del efecto de la utilización de EF en las emisiones de gases de efecto invernadero por kilogramo de clínker

producido, cuando se incluye la evitación de las emisiones de los vertederos. Aproximadamente, el uso de una tonelada de EF resultada en la reducción de las emisiones de GEI por tres toneladas de CO<sub>2</sub> (Figura 43).

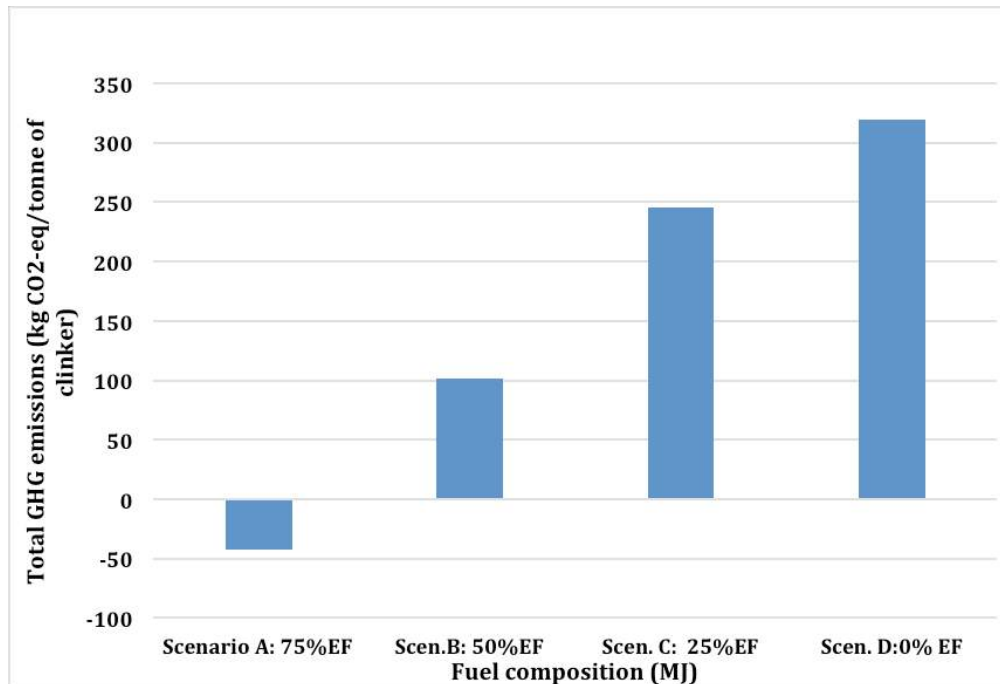


FIGURA 43 EFECTO ESTIMADO DE REEMPLAZAR CARBÓN POR EF EN LA PRODUCCIÓN DE UNA TONELADA MÉTRICA DE CLINKER

La Figura 44 muestra el efecto beneficioso de la utilización de EF en lugar de carbón, cuando las emisiones evitadas de los vertederos no están incluidas en la comparación de las emisiones de gases de efecto invernadero. Bajo este supuesto, el uso de una tonelada de EF resultados en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en cerca de dos toneladas de CO<sub>2</sub>.

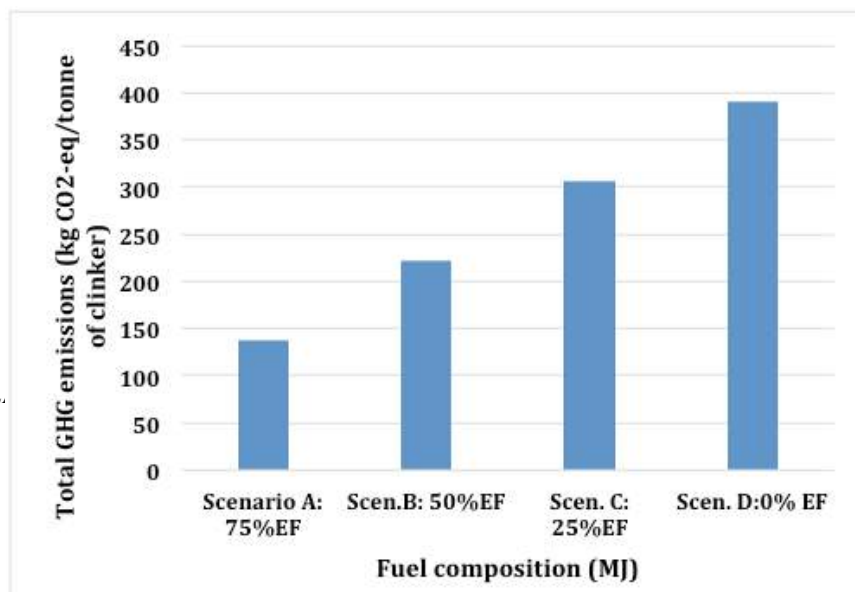


FIGURA 44 EFECTO ESTIMADO DE REEMPLAZAR CARBÓN POR EF EN LA PRODUCCIÓN DE UNA TONELADA MÉTRICA DE CLINKER, EXCLUYENDO LA EMISIONES EVITADAS DE GEI DE VERTIDO DE EF

## 6.6 CONCLUSIONES DE USO DE AF Y EF EN LA PRODUCCIÓN DE CEMENTO

---

1. El uso de AF (neumáticos, RDF, madera, residuos líquidos, etc.) a combustibles fósiles en la industria del cemento de Estados Unidos aumentó de 28 mil millones de MJ en 1993 a 58 mil millones de MJ en 2011. A una media estimada en 3.200 MJ de energía térmica consumida por tonelada corta de clinker, los 58 mil millones de MJ corresponden a 18 millones de toneladas cortas de clinker, es decir, alrededor del 27% de la producción de cemento de Estados Unidos. De acuerdo con el Anuario Mineral USGS, los residuos sólidos utilizados en la industria del cemento (es decir, RDF, EF, madera, y otros sólidos desviados de los vertederos en Estados Unidos) en 2011 fueron 699.000 toneladas métricas, lo que en un HHV supuesto de 17,5 MJ/kg representó alrededor 20% de la energía de AF y el 5,4% de la energía total utilizada en hornos de cemento en Estados Unidos. En este sentido, la planta de Balcones de CEMEX (San Antonio, TX) está por delante de la industria del cemento de EE.UU.: A principios de 2013, Balcones alcanzó un máximo de 40% de AF y el uso promedio durante ese año fue de 33,4%. En comparación, el promedio de la industria en EE.UU. fue del 20,9% de AF. niveles mucho más altos se han alcanzado en Alemania (62%) y los Países Bajos (83%).

2. El uso en 2011 de "RDF" en la industria del cemento incrementó de manera efectiva la capacidad total de residuos a energía (WTE) de los EE.UU. de 26,6 millones a 27,3 millones de toneladas métricas, es decir, un 2,6%. Dado que el costo de capital actual de las centrales WTE es de aproximadamente USD \$700/tonelada métrica, el uso en 2011 de "RDF" en la industria del cemento de EE.UU. evitó la inversión de USD\$ 490 millones en nueva capacidad WTE. Aunque la producción de "RDF" requiere una cierta inversión en el procesamiento mecánico, MRF y sistemas de alimentación en las plantas de cemento, es evidente que el aumento del uso de combustibles derivados de residuos en la producción de cemento es económicamente más atractivo que la adición de capacidad en WTE.

3. Este estudio mostró que los valores caloríficos más altos (HHV) del EF de Balcones y el RDF de Tepeaca estaban muy cerca de la media de EE.UU. "RDF", en torno a 17,5 MJ/kg. De acuerdo con

este valor, una tonelada de "RDF" es equivalente a aproximadamente 0,7 toneladas de carbón de alta calidad.

4. Un argumento que se utiliza a veces en contra del uso de combustibles derivados de residuos en la producción de cemento es la emisión de dioxinas. Las emisiones de dioxinas examinadas en este estudio son de un orden de magnitud menor que los estándares de EE.UU. y la U.E. (0,1 ng EQT/Nm<sup>3</sup> de gas de la chimenea). En un estudio del EEC separado (H. Dwyer y NJ Themelis, 2014), se creó un inventario de todas las fuentes de dioxinas controladas (es decir, industrial) y no controladas (es decir, los incendios de vertederos, quema doméstica, etc.) en los EE.UU. Los resultados mostraron que las emisiones anuales de dioxinas procedentes de la industria del cemento de Estados Unidos ascendieron a 18 gramos de EQT, correspondiente al 0,5% de todas las fuentes de dioxinas tóxicas de los Estados Unidos.

5. Sobre la base de los valores de calentamiento de EF reportados por Balcones y RDF informado por Tepeaca, se estimó que la distribución de carbono en estos dos combustibles alternativos es 80% biogénico (fibra de papel, madera) y 20% antropogénica (plásticos). Pruebas de combustión llevadas a cabo en muestras aleatorias de EF, recogidos en la planta Balcones por el EEC y analizados por medio de la norma ASTM C-14, mostraron 60-81% de contenido biogénico.

6. Las emisiones de gases de efecto invernadero de cuatro escenarios de combustible se calcularon usando la metodología estándar de LCA; éstos oscilaron entre el 100% de carbón de alta calidad a 25% de carbón-75% de EF. Los resultados mostraron que el mayor impacto de GEI fue el CO<sub>2</sub> generado durante la combustión del combustible. El beneficio de GEI de la utilización de EF fue de 3 toneladas de CO<sub>2</sub> por tonelada de EF utilizado en lugar de carbón, cuando se incluyó la evitación de emisiones de gases de vertedero. La emisión de gases de efecto invernadero se reduce de 390 kg de CO<sub>2</sub> por tonelada de clinker para el 100% de carbón a 102 kg para un 50% de EF y 50% de carbón.

7. La conclusión general de este estudio fue que el uso de combustibles derivados de RSU en la producción de cemento no tiene ningún impacto adverso en el proceso de producción de cemento o la calidad del producto, mientras que reduce la emisión de gases de efecto invernadero en hasta 3 toneladas de CO<sub>2</sub> por tonelada de EF utilizado en lugar de un carbón de alta calidad.



## 7. CONCLUSIONES DE LA GUÍA

---

Durante las dos últimas décadas, la industria de conversión de residuos en energía en Europa, Norteamérica y Asia ha desarrollado tecnologías WTE que por ahora son una de las formas posibles de generación de energía termoeléctrica. Por el momento, la tecnología WTE dominante, practicada en más de 600 plantas en más de cuarenta países, es la combustión de parrilla de los residuos sólidos municipales tal como se reciben con producción de electricidad y calor. Esta tecnología, que ofrecen varios proveedores en Europa, los EE.UU. y Asia, es la recomendada para las primeras plantas WTE de las naciones de América Latina y del Caribe. Sin embargo, procesos alternativos están en constante desarrollo, y es posible que uno o más de ellos pueda resultar en menores costos de capital, para una determinada capacidad, que la combustión de parrilla.

Teniendo en cuenta las tasas actuales de compuerta de vertido de América Latina, WTE no es económicamente viable sin algún apoyo del gobierno. Sin embargo, la diferencia entre las tasas actuales de entrada en sitios de disposición final en América Latina y la tasa de entrada requerida para sostener una WTE, en precios actuales de energía, se estima (bajo ciertos supuestos específicos que aparecen en los capítulos 7 a 10) en US\$ 20-30 por tonelada de DSM.

Actualmente los municipios de ALC por lo general no reciben ningún ingreso de la gestión de residuos sólidos, y tienen que cubrir este costo desde otras fuentes de ingresos; por lo tanto, no pueden permitirse una tasa de entrada más alta. Sólo una parte de la población corre con los costes de gestión de residuos a través del pago de impuestos a la propiedad y, también, este impuesto no depende de la cantidad de residuos generados.

En todos los casos estudiados, los municipios de la región destinan una fracción significativa de su presupuesto a la gestión de los residuos sólidos pero el 70-80% va a la recogida y transporte de RSU y sólo el 20-30% se utiliza para la disposición adecuada del RSU. También hay una gran variación de los costes de recogida entre los municipios de una misma región. El plan para una WTE en la región de ALC debe considerar un medio más eficiente y menos costoso de recogida y transporte de RSU a la WTE.

Como se ha observado en los últimos veinte años, los ingresos WTE de electricidad incrementarán con el tiempo, mientras que el costo de transformar terrenos rurales a rellenos sanitarios también aumentará. Por otra parte, los aspectos económicos desarrollados en este informe se basan en una vida de 20 años de la planta WTE propuesta, mientras que algunas instalaciones WTE modernas ya han alcanzado su cuadragésimo año y continuarán operando en el futuro previsible.

Esta Guía recomienda que los gobiernos nacionales sitúen la gestión sostenible de los residuos en lo alto de su lista de proyectos de infraestructura esenciales, de manera similar a lo que han hecho en el pasado con respecto a la prestación de agua potable, electricidad y tratamiento de aguas residuales. Lo que puede no ser económico desde el punto de vista de corto plazo de inversores privados, puede ser una bonanza económica desde la perspectiva a largo plazo de una nación que incluye la creación de puestos de trabajo en la construcción de la WTE, la adición de una fuente autóctona de energía renovable, la cantidad de tierra conservada, y algunas ventajas ambientales y de gases de efecto invernadero de WTE por sobre el vertido. Puede ser por lo tanto prudente que el gobierno nacional o regional considere su participación en una asociación público-privada que permitirá a la nación avanzar hacia una gestión de residuos más sostenible.



## APÉNDICES DE LA PARTE 1

### APÉNDICE 1: LISTA DE PROVEEDORES DE WTE

TABLA 20 LISTA DE PROVEEDORES DE WTE

<b>Empresa</b>	<b>Página Web</b>	<b>País</b>
Alstom Corporation	<a href="http://www.alstom.com">www.alstom.com</a>	Francia
Babcock Noell	<a href="http://www.babcocknoell.de">www.babcocknoell.de</a>	Alemania
Babcock & Wilcox Völund	<a href="http://www.volund.dk">www.volund.dk</a>	Dinamarca
CNIM (Martin GmbH posee un 10,25% de CNIM)	<a href="http://www.cnim.com">www.cnim.com</a>	Francia
Covanta Energy	<a href="http://www.covantaenergy.com">www.covantaenergy.com</a>	Estados Unidos
Fisia Babcock Environment GmbH	<a href="http://www.fisia-babcock.com">www.fisia-babcock.com</a>	Alemania
Groupe TIRU	<a href="http://www.groupe-tiru.com">www.groupe-tiru.com</a>	Francia
Hangzhou New Century Energy and Environmental	<a href="http://www.chinaboilers.com/en/filiale_detail.asp?id=62">www.chinaboilers.com/en/filiale_detail.asp?id=62</a>	China
Hitachi Zosen Inova AG (anteriormente Von Roll Inova)	<a href="http://www.hz-inova.com">www.hz-inova.com</a>	Suiza
Inova	<a href="http://www.inova-groupe.com">www.inova-groupe.com</a>	Francia
JFE Steel Corporation	<a href="http://www.jfe-steel.co.jp/en/">www.jfe-steel.co.jp/en/</a>	Japón
Jiangsu Kelin Environmental and Equipment	<a href="http://www.kelin-china.com/en/gy01.htm">www.kelin-china.com/en/gy01.htm</a>	China
Kawasaki Heavy Industries Ltd.	<a href="http://www.khi.co.jp">www.khi.co.jp</a>	Japón
Keppel Seghers	<a href="http://www.keppelseghers.com">www.keppelseghers.com</a>	Multinacional
Martin GmbH	<a href="http://www.martingmbh.de">www.martingmbh.de</a>	Alemania
Mitsubishi Heavy Industries	<a href="http://www.mhi.co.jp/en/">www.mhi.co.jp/en/</a>	Japón
Standardkessel Baumgarten Holding GmbH	<a href="http://www.standardkessel-baumgarte.com">www.standardkessel-baumgarte.com</a>	Alemania
Sanfeng Covanta	<a href="http://www.covantaenergy.com/facilities/asia-pacific.aspx">www.covantaenergy.com/facilities/asia-pacific.aspx</a>	China
Sinosteel Tiancheng Environmental Protection Science and Technology	<a href="http://en.sinosteel.com/qqzg/kjqy/2007-09-13/1743.shtml">http://en.sinosteel.com/qqzg/kjqy/2007-09-13/1743.shtml</a>	China

Takuma Co., LTD	<a href="http://www.takuma.co.jp/english/index.html">www.takuma.co.jp/english/index.html</a>	Japón
Urbaser S.A.	<a href="http://www.urbaser.es">www.urbaser.es</a>	España
Weiming Group	<a href="http://www.wmgroun.cn/en">http://www.wmgroun.cn/en</a>	China
Wheelabrator Technologies Inc.	<a href="http://www.wheelabratortechnologies.com">www.wheelabratortechnologies.com</a>	Estados Unidos
Wuxi Huaguang Boiler	<a href="http://www.wxboiler.cn/en/about.asp">www.wxboiler.cn/en/about.asp</a>	China
Wuxi Xuelang Environmental Science and Technology		China
Zhejiang Feida Environmental Science & Technology	<a href="http://www.feidagroup.cn">www.feidagroup.cn</a>	China
Zhejiang University	<a href="http://www.zju.edu.cn/english/">www.zju.edu.cn/english/</a>	China

## APÉNDICE 2: COSTOS DE CAPITAL REPORTADOS DE ALGUNAS PLANTAS WTE

TABLA 21 COSTOS DE CAPITAL REPORTADOS DE ALGUNAS PLANTAS WTE

Ubicación	Año de inicio	Capacidad (toneladas/año).	Costo de capital (2011 millones de dólares \$)	Costo de capital (US\$/ton)
Ranheim, Noruega	1997	10.000	18	1.781
Averoy, Noruega	2000	30.000	39	1.285
Isla de Wight, Reino Unido	2009	30.000	13	444
Sault Ste. Marie, ON, Canadá	Esperado 2011	35.000	31	874
Hurum, Noruega	2001	39.000	31	800
Minden, Alemania	2001	39.000	32	819
Forus, Noruega	2002	39.000	38	987
Santa Lucia	Esperado 2011	45.000	50	1.111
Ramboll 1	No divulgado	48.000	30	625
Ramboll 2	No divulgado	64.000	66	1.031
Islas Bermudas	1994	68.000	98	1.441
Ramboll 3	No divulgado	72.000	60	833
Sarpsborg, Noruega	2002	78.000	49	628
Ramboll 4	No divulgado	80.000	73	913
Martinica	2002	112.000	87	780
Ramboll 5	No divulgado	120.000	91	758
Zhejiang, China	2003	128.000	17	129
Guangdong, China	2003	150.000	42	282
Zhejiang, China	2004	150.000	39	258
Ramboll 6	No divulgado	160.000	112	700
Ramboll 7	No divulgado	160.000	139	869
Ramboll 8	No divulgado	192.000	147	766
Ramboll 9	No divulgado	200.000	138	690
Ramboll 10	No divulgado	200.000	185	925
Ramboll 11	No divulgado	208.000	184	885
Ramboll 13	Planificado	220.000	200	909
Guangdong, China	2005	225.000	51	224
Zhejiang, China	2003	225.000	33	145
Spokane, WA, EE.UU.	1991	248.200	253	1.018

Guangdong, China	2005	267.000	76	286
Guangdong, China	2005	267.000	62	232
Ramboll 12	No divulgado	280.000	176	629
Mauricio	N/A	300.000	200	667
Guangdong, China	2005	300.000	111	371
Zhejiang, China	2005	300.000	39	131
Fujian, China	2005	333.000	39	117
Jiangsu, China	2005	333.000	88	265
Jiangsu, China	2005	333.000	53	159
Zhejiang, China	2001	350.000	76	218
Moscú, Rusia	2007	360.000	288	800
Shanghai, China	2002	365.000	118	323
Chongqing, China	2005	400.000	56	139
Guangdong, China	2005	400.000	111	277
Tianjin, China	2005	400.000	95	238
Shanghai, China	2003	500.000	165	331
Palm Beach, FL, EE.UU.	Planificado	1.000.000	668	668

### APÉNDICE 3: PLANTAS WTE QUE OPERAN EN EL MUNDO

*Esta hoja de cálculo de Excel fue construida por el Earth Engineering Center Columbia (EEC) relativa a la base de datos de 2011 obtenida de proveedores de hornos WTE de todo el mundo. Permite la búsqueda por país, tamaño, producción de energía, proveedor, etc., y está disponible en la web WTERT, [www.wtert.org](http://www.wtert.org), la base de datos SOFOS " WTE plants 2011".*

## BIBLIOGRAFÍA DE LA PARTE 1

---

T. Rand, J. Haukohl, U. Marxen. "Municipal Solid Waste Incineration, A Decision Maker's Guide". World Bank, June 2000. Available from, [http://www-wds.worldbank.org/external/default/WDSContentServer/WDSP/IB/2000/08/14/000094946\\_00072505420045/Rendered/PDF/multi\\_page.pdf](http://www-wds.worldbank.org/external/default/WDSContentServer/WDSP/IB/2000/08/14/000094946_00072505420045/Rendered/PDF/multi_page.pdf)

Encyclopedia of the Science and Technology of Sustainability, R.A. Meyers, Editor; "Waste-to-Energy Volume", N. J. Themelis, editor, Springer Publishing (in press). <http://www.springer.com/physics/book/978-0-387-89469-0>

Waste-to-Energy in Austria, 2nd Edition, Ministry of Environment of Austria English Translation, by Franz Neubacher. May 2010 <http://www.lebensministerium.at/suchergebnisse.html?queryString=Franz+Neubacher>

Themelis, N.J., "Global Growth of Traditional and Novel Thermal Treatment Technologies", Waste Management World, Review Issue 2007-2008, p. 37-47, July-August 2007

EPA Report, GHG emissions of solid wastes. Available from, [http://www.epa.gov/climatechange/emissions/downloads/08\\_Waste.pdf](http://www.epa.gov/climatechange/emissions/downloads/08_Waste.pdf)

USEPA, "Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2006", Waste.

USEPA-LMOP, "Energy Projects and Candidate Landfills". Available from, [www.epa.gov/lmop/proj/index.htm](http://www.epa.gov/lmop/proj/index.htm)

HSC Chemistry, Chemical Reaction and Equilibrium Software, Outotec, Finland. Available from, <http://www.hsc-chemistry.net/>

USEPA: <http://www.epa.gov>

EUROSTAT: <http://ec.europa.eu/eurostat>

WORLD BANK: <http://www.worldbank.org/>

WASTE MANAGEMENT WORLD: <http://www.waste-management-world.com>

WRAP. "Comparing the costs of alternative waste treatment options" 2011, source: <http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/Gate%20Fees%20Report%202011.pdf>

European Commission. "Reference Document on the Best Available Technique for Waste Incineration", EU IPPC Bureau, August 2006

European Commission. "Reference Document on the Best Available Technique on General Principles of Monitoring", EU IPPC Bureau, July 2003

WORLD BANK, "Decision Makers' Guide to Incineration of Municipal Solid Waste", 2000

Confederation of European Waste –to-Energy plants: <http://www.cewep.eu>

Christensen, T., H. (2011), "Solid Waste Technology & Management", Vol. 1-2, Blackwell Publishing Ltd, ISBN: 978-1-405-17517-3

UNEP (2009), 'Integrated Solid Waste Management-Training Manual', Vol. 1: Waste Characterization and Quantification with Projections for Future, available at: [http://www.unep.or.jp/ietc/publications/spc/iswmplan\\_vol1.pdf](http://www.unep.or.jp/ietc/publications/spc/iswmplan_vol1.pdf), accessed 13th June 2012.

Klundert, Ar., Anschutz, J. (1999), "Integrated Sustainable Waste Management: the selection of appropriate technologies and the design of sustainable systems is not (only) a technical issue", available at: [http://www.worldbank.org/urban/solid\\_wm/erm/Annexes/US%20Sizes/Annex%204B.3.pdf](http://www.worldbank.org/urban/solid_wm/erm/Annexes/US%20Sizes/Annex%204B.3.pdf), accessed 13th June 2012.

UN-HABITAT (2010), "Solid Waste Management in the World's Cities/Water & Sanitation in the World's Cities 2010", Malta, available at: <http://www.unhabitat.org/pmss/getElectronicVersion.aspx?nr=2918&alt=1>, accessed 13th June 2012

Klundert, Ar., Anschutz, J. (2001), 'Integrated Sustainable Waste Management - the Concept - Tools for Decision-makers - Experiences from the Urban Waste Expertise Programme (1995-2001)', available at: [http://www.waste.nl/sites/default/files/product/files/tools\\_iswm\\_concept\\_eng1.pdf](http://www.waste.nl/sites/default/files/product/files/tools_iswm_concept_eng1.pdf), accessed 13th June 2012.

Mavropoulos, A. (2011), "Globalization, Megacities and Waste Management", ISWA's knowledge base, available at: [http://www.iswa.org/index.php?eID=tx\\_iswaknowledgebase\\_download&documentUId=2306](http://www.iswa.org/index.php?eID=tx_iswaknowledgebase_download&documentUId=2306), accessed 13th June 2012.

Harrison, K., W., Dumas, R., D., Solano, E., Barlaz, M., A., Brill, D., E., Jr., & Ranjithan, R., S. (2001), 'Decision Support Tool for Life-Cycle Based Solid Waste Management', Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 15, No. 1, January 2001, available at: [http://ericisolano.uvitacr.com/maincontent/publications/JCE\\_DST\\_Life-Cycle-Based%20SWM.pdf](http://ericisolano.uvitacr.com/maincontent/publications/JCE_DST_Life-Cycle-Based%20SWM.pdf), accessed 13th June 2012.

ABRELPE & ISWA (2012), "Solid Waste: Guidelines for successful planning"

D-Waste (2012), "The planning challenge: A road map for waste management planners", available at: [http://www.d-waste.com/index.php/products/view\\_product\\_full/39#](http://www.d-waste.com/index.php/products/view_product_full/39#), accessed 13th June 2012.

Mazzanti, M., Zoboli, R. (2009), "Municipal Waste Kuznets curves: evidence on socio-economic drivers and policy effectiveness from the EU", Environmental and Resource Economics, Volume 44, Number 2, p. 203-230

World Bank (2011), "LAC's Long-Term Growth: Made in China?", 2011 Annual Meetings, IMF-World Bank, Washington, DC, 20 September 2011, available at:

[http://siteresources.worldbank.org/EXTLACOFFICEOFCE/Resources/870892-1197314973189/LAC\\_Growth\\_Made\\_in\\_China20Sep11.pdf](http://siteresources.worldbank.org/EXTLACOFFICEOFCE/Resources/870892-1197314973189/LAC_Growth_Made_in_China20Sep11.pdf), accessed on 13th June 2012

Yepez-García, R.A., Johnson, T., M., Andrés, L., A. (2010), "Meeting the Electricity Supply/Demand Balance in Latin America & the Caribbean", World Bank, September 2010, available at: GUÍA PARA LA RECUPERACIÓN DE ENERGÍA Y MATERIALES DE RESIDUOS

<http://siteresources.worldbank.org/EXTLACOFFICEOFCE/Resources/LACElectricityChallenge.pdf>, accessed on 13th June 2012

Espinoza, P.,T., Martinez Arce, E., Daza, D., Soulier Faure, M., Terraza, H. (2011), “Regional Evaluation of urban solid waste management in Latin America and the Carribean – 2010 Report”, IDB, AIDIS, PAHO/WHO, available at: [http://www.aidis.org.br/PDF/bid\\_english\\_web.pdf](http://www.aidis.org.br/PDF/bid_english_web.pdf)

ABRELPE (2012), “PANORAMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL, 2011”, available at: [http://www.abrelpe.org.br/panorama\\_apresentacao.cfm](http://www.abrelpe.org.br/panorama_apresentacao.cfm), accessed on 13th June 2012

## REFERENCIAS ADICIONALES A LA PARTE 1 DE LA GUÍA

---

<sup>1</sup> Themelis, N.J. and Ulloa, P.A. “Methane generation in landfills”. *Journal of Renewable Energy*, 32 (7), 1243-1257. 2007.

<sup>2</sup> Themelis, N.J. and Ulloa, P.A. Capture and utilization of landfill gas. In: *Renewable Energy 2005*, pp. 77-81. Available from, [www.sovereign-publications.com/renewable-energy2005-art.htm](http://www.sovereign-publications.com/renewable-energy2005-art.htm)

<sup>3</sup> Van Haaren, Rob “Large scale aerobic composting of source separated organic wastes”. Columbia University, 2010. Available from, [www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/haaren\\_thesis.pdf](http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/haaren_thesis.pdf)

<sup>4</sup> Arsova, Ljupka, “Anaerobic digestion of food wastes”, Columbia University, 2009. Available from, [www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/arsova\\_thesis.pdf](http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/arsova_thesis.pdf)

<sup>5</sup> Matthews, E. and N.J. Themelis, “Potential for reducing global methane emissions from landfills”. *Proceedings Sardinia 2007, 11th International Waste Management and Landfill Symposium*, Cagliari, Italy, 1–5 October 2007, pp. 2000-2030, 2007.

<sup>6</sup> Kaufman, S.M. and N.J. Themelis, “Using A Direct Method to Characterize and Measure Flows of Municipal Solid Waste in the United States”; *J. Air & Waste Management. Assoc.* 2009. 59: 1386-1390. (EEC-made figure, appears in several publications including most recent Fig. 4, p. 11834 *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, (ESST, Springer Pub))

<sup>7</sup> N.J. Themelis, M.J. Castaldi, J. Bhatti, and L. Arsova, “Energy and Economic Value of Non-Recycled Plastics (NRP) and Municipal Solid Wastes (MSW) that are Currently Landfilled in the Fifty States”. EEC Columbia University, August 2011.

<sup>8</sup> Eurostat data 2008. Available from, [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY\\_OFFPUB/KS-CD-07-001/EN/KS-CD-07-001-EN.PDF](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFFPUB/KS-CD-07-001/EN/KS-CD-07-001-EN.PDF) (EEC figure)

<sup>9</sup> Van Haaren et al, “Columbia/BioCycle U.S. survey”. *BioCycle*, Oct. 2010. Available from, <http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/SOG2010.pdf>

<sup>10</sup> Tchobanoglous, G., Theisen, H., and Vigil, S., “Integrated Solid Waste Management”, Chapter 4, McGraw-Hill, New York, 1993.

- <sup>11</sup> Themelis, N.J., Y.H. Kim, and M.H. Brady, “Energy recovery from New York City municipal solid wastes”, *Waste Management & Research* 20, no. 3 (2002): 223-233. (EEC made Figure published in several publications, including ref. given in Guidebook reference provided)
- <sup>12</sup> Reitman, D.O., “CEWEP Energy Report II (Status 2004-2007)”. Available from, [www.cewep.eu/studies/climate-protection/art230,223.html](http://www.cewep.eu/studies/climate-protection/art230,223.html) (Reference provided in Guidebook (Reitman), most recent appearance in ESST-Springer, p. 11842)
- <sup>13</sup> Themelis, N.J., “Overview of Global WTE”, *Waste Management World*, July-August 2003, p. 40-47. Available from, [www.seas.columbia.edu/earth/papers/global\\_waste\\_to\\_energy.html](http://www.seas.columbia.edu/earth/papers/global_waste_to_energy.html)
- <sup>14</sup> Franz P. Neubacher, Franz P., WTE Section of Encyclopedia of Science and Technology of Sustainability, Springer Pub. In press (2012). (F. Neubacher presentation at WTERT 2010 Bi-annual meeting, [www.wtert.org](http://www.wtert.org))
- <sup>15</sup> Cen, K. Department of Energy Engineering, Zhejiang University, China
- <sup>16</sup> Energy Products of Idaho. Available from [www.energyproducts.com/EPITechnology.htm](http://www.energyproducts.com/EPITechnology.htm)
- <sup>17</sup> Velis C.A., P. J. Longhurst, G. H. Drew, R. Smith & S. J. T. Pollard (2010) “Production and Quality Assurance of SRF”, *Environmental Science and Technology*, 40:12, 979-1105. Available from, <http://dx.doi.org/10.1080/10643380802586980a>
- <sup>18</sup> Vehlow, Jurgen, Proceedings WTERT Bi-annual Meeting 2008. Available from, <http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/meeting2008/presentations/Vehlow.pdf>
- <sup>19</sup> S. Nagayama. Available from, [www.iswa.org/uploads/tx\\_iswaknowledgebase/Nagayama.pdf](http://www.iswa.org/uploads/tx_iswaknowledgebase/Nagayama.pdf)
- <sup>20</sup> Dr. David Longden, Hans Olav Midtbust, Loren Beaman (Energos) to Ranjith Annepu (Earth Engineering Center, Columbia University), November 17, 2010. Energos Technology, Small Scale Solid Waste Gasification.
- <sup>21</sup> ENERGOS Gasification Technology, Proven Gasification Based Small-scale Energy from Waste. Available from, [http://www.envirolinknorthwest.co.uk/envirolink/Events0.nsf/0/8025739B003AADE38025750000321B0E/\\$file/ENERGOS.pdf](http://www.envirolinknorthwest.co.uk/envirolink/Events0.nsf/0/8025739B003AADE38025750000321B0E/$file/ENERGOS.pdf)
- <sup>22</sup> ENERGOS, “Plant Reference List”. Available from, <http://www.energ.co.uk/energy-from-waste>
- <sup>23</sup> ENERGOS, “Energy from Waste Video Case Study,” (2005). Available from, <http://www.energ.co.uk/?OBH=53&ID=351>
- <sup>24</sup> ENERGOS, “The Process”. Available from, <http://www.energ.co.uk/energy-from-waste-process>



- <sup>25</sup> ENERGOS, “Operational Energos Plants”. Available from, <http://www.energ.co.uk/index1578.aspx>
- <sup>26</sup> ENERGOS, “Energy from waste-Our Customers”. Available from, <http://www.energ.co.uk/energy-from-waste-our-customers>
- <sup>27</sup> S. Suzuki, Ebara Corp. Available from, [www.wtert.org/sofos/nawtec/nawtec15/nawtec15-speaker-abstract06.pdf](http://www.wtert.org/sofos/nawtec/nawtec15/nawtec15-speaker-abstract06.pdf)
- <sup>28</sup> Interstate Waste Technologies. Available from, [www.wtert.org/sofos/IWTThermoselect.pdf](http://www.wtert.org/sofos/IWTThermoselect.pdf)
- <sup>29</sup> Ducharme, C, “Analysis of thermal plasma – assisted WTE processes”, Columbia University, 2010. Available from, [http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/ducharme\\_thesis.pdf](http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/ducharme_thesis.pdf)
- <sup>30</sup> ISWA, Thermal Treatment Group, Energy from Waste Statistics, May 2006. Available from, [www.greenkerala.net/pdf/energy-from-Waste\\_2006.pdf](http://www.greenkerala.net/pdf/energy-from-Waste_2006.pdf)
- <sup>31</sup> <http://www.google.com/search?q=waste+to+energy+plants+pictures&hl=en&biw=1375&bih=784&prmd=imvns&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ei=5xewTsTTLsbh0QHE3aTPAQ&ved=0CFcQsAQ>
- <sup>32</sup> EPA website. Available from, <http://www.epa.gov/ttnatw01/eparules.html>
- <sup>33</sup> EPA website, “Air Emissions from MSW Combustion Facilities”. Available from <http://www.epa.gov/wastes/nonhaz/municipal/wte/airem.htm>
- <sup>34</sup> Kaplan, P.O., J. Decarolis, and S. Thorneloe, “Is it Better to Burn or Bury Waste for Clean Electricity Generation?”. Environ. Sci. Technol., 2009, 43, 1711-1717.
- <sup>35</sup> Karsten Millrath, “University Consortium on Advancing the Beneficial Use of Ash from Waste-To-Energy Combustion”. 11th North American Waste-To-Energy Conference Tampa, Florida, April 30, 2003.
- <sup>36</sup> Monica M. DeAngelo, “Siting of Waste-to-Energy Facilities in New York City Using GIS Technology”. Columbia University, May 2004.
- <sup>37</sup> UNFCCC website. Available from, <http://unfccc.int/2860.php>
- <sup>38</sup> Werner Sunk, Earth Engineering Center, Columbia University. “Increasing the Quantity and Quality of Metals Recovered at Waste-to Energy Facilities”. NAWTEC 14, Tampa, FL, May 2006.
- <sup>39</sup> Ramboll, Denmark

## REFERENCIAS AL USO DE PAPEL Y PLÁSTICOS DE RSU EN LA PRODUCCIÓN DE CEMENTO

---

Ashely Murray and Lynn Price, “Use of Alternative Fuels Cement Manufacture: Analysis of Fuel Characteristics and Feasibility for Use in the Chinese Cement Sector”, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Technology Cooperation and Assistance, through the U.S. Department of Energy under the Contract No. DE-AC02-05CH11231, LBNL-525E).

Genon G, Brizio E, “Perspectives and limits for cement kilns as a destination for RDF., Waste Management, 2008, Nov; 28 (11): p. 2375-2385.

<sup>40</sup> Zhang, Jiao, “Energy, environmental and greenhouse gas effects of using alternative fuels in cement production”, M.S. thesis in Earth and Environmental Engineering, Columbia University, May 2014

<sup>41</sup> Gendebien, A., Leavens A., Blackmore, K. , Godley, A. , Lewin, K. , Whiting, K., Davis, R., Giegrich, J., Fehrenbach, H., Gromke, U., del Bufalo, N., Hogg, D. (2003). “Refuse Derived Fuel, Current Practice and Perspectives: Final Report”, European Commission - Directorate General Environment: 229).

## SEGUNDA PARTE

---

### 8. ESTUDIO DE CASO 1: VALPARAÍSO, CHILE

---

#### 8.1 DATOS DEL PAÍS

---

Chile es una economía emergente con un PIB de aproximadamente US\$ 200 mil millones de dólares, una población de 17 millones y un ingreso per cápita de alrededor de US\$ 12.000 en dólares corrientes y US\$ 15.000 en paridades de poder adquisitivo de dólares (PPA), es decir, aproximadamente un tercio del PIB per cápita de EE.UU.. Chile es una de las economías más abiertas del mundo y su comercio exterior total (exportaciones más importaciones) representa el 67% del PIB de Chile.

Chile lidera los países de América Latina y la mayoría de otras economías emergentes en los rankings de las diferentes agencias de calificación de crédito, como Moody y Standard & Poor, y de organizaciones internacionales tales como el Foro Económico Mundial y The Economist Intelligence Unit. El desempeño de Chile, validado por estas instituciones, ha ayudado a posicionar a Chile como uno de los lugares más seguros del mundo para inversión extranjera en el mundo emergente.

A pesar de las actuales condiciones externas adversas, la economía chilena ha continuado creciendo entre el 4% y el 5% por año, mientras que el mantenimiento de las cuentas externas estables, responsabilidad en el gasto del sector público (que ha transformado el sector público en un acreedor neto) y fuertes reservas internacionales (aproximadamente 1/3 del PIB); Se espera que la tasa de crecimiento del PIB real de 2011 que es de 4%.

#### 8.2 GESTIÓN DE RESIDUOS EN CHILE

---

Chile ha experimentado un enorme crecimiento económico en los últimos 25 años, mejorando enormemente la calidad de vida de su población. Como es habitual, este crecimiento se acopló al aumento de cantidades significativas y no controladas de residuos, creando muchos costos ambientales y sociales que deben abordarse.

El sistema de gestión de residuos sólidos de la mayoría de las regiones de Chile es claramente insostenible y se enfrenta a importantes desafíos políticos, geográficos y ambientales. Por lo tanto, existe una necesidad urgente de investigar nuevas tecnologías de gestión de residuos sólidos, tales como los residuos a energía (WTE). En un enfoque de "desarrollo sostenible", los residuos deben considerarse como un recurso para la recuperación de materiales y energía y no simplemente como un problema de eliminación.

En Chile, los municipios son responsables de la recolección, transporte y disposición final de los RSU. La mayoría de los municipios contratan los servicios de gestión de residuos al sector privado a través de una licitación abierta por los servicios de recogida y eliminación. El resto tienen su propio sistema de recolección e instalaciones de eliminación, que en muchos casos son muy ineficientes. Cada municipio actúa de forma independiente y negocia su propio precio; En consecuencia, no existe un precio fijado para este servicio, y los municipios cobran a los ciudadanos los costes de recogida y eliminación de residuos a través de un "impuesto a la propiedad."

Hay una necesidad urgente de resolver los problemas sanitarios relacionados con la eliminación inadecuada de residuos en todo el país. Sólo la ciudad capital de Santiago, donde el 100% de los residuos recogidos va a rellenos sanitarios modernos, y algunos centros urbanos regionales tienen rellenos sanitarios modernos.

### 8.3 RAZONES PARA LA SELECCIÓN DE LA REGIÓN DE VALPARAÍSO PARA EL ESTUDIO DE CASO DE CHILE

---

El equipo del proyecto evaluó varios factores con el fin de decidir sobre el sitio para el Estudio de Caso para Chile. Las razones para elegir la región de Valparaíso fueron:

Población: La Región de Valparaíso tiene la tercera mayor población urbana en Chile y es también un destino turístico; por lo tanto, genera una gran cantidad de RSU.

Estado actual de la gestión de los RSU: La mayor parte de las instalaciones de eliminación de residuos de la Región de Valparaíso han llegado casi a plena capacidad; por el contrario, Santiago cuenta con tres rellenos sanitarios de una vida útil de más de dos décadas.

Políticas descentralizadas de Chile: El gobierno nacional está desarrollando políticas de descentralización de la Región Metropolitana y que prioricen el desarrollo de proyectos de infraestructura en las regiones.

Ubicación geográfica: Valparaíso es la puerta de entrada al mar para el área metropolitana de Santiago y es una ciudad histórica, designado como Patrimonio de la Humanidad por la ONU. Si la primera planta de WTE en Chile llegara a ser construida en la Región de Valparaíso, podría influir en otras regiones de Chile a desarrollar e implementar soluciones de gestión de residuos sólidos modernas.

### 8.4 VISIÓN GENERAL DE VALPARAÍSO

---

La Región de Valparaíso se encuentra en el centro de Chile (Figura 45), a 120 km al noroeste de la ciudad de Santiago. La capital de la región es la ciudad de Valparaíso, que también alberga el Congreso Nacional y es designada un patrimonio de la humanidad de la UNESCO. Es uno de los puertos más importantes del país y un centro cultural cada vez más vital. Una cincuentena de cruceros internacionales visitan Valparaíso durante los 3 meses de verano chileno. El puerto de Valparaíso es también un importante centro para el envío de contenedores de carga, incluidas las exportaciones de vino, cobre, y fruta fresca. La población de Valparaíso, con el balneario vecino de Viña del Mar y localidades balnearias vecinas como Reñaca, Concón, Quintero y San Antonio, casi se duplica durante los meses de verano y vacaciones de diciembre, enero y febrero. La ciudad es

conocida popularmente como la ciudad jardín y es la capital turística de Chile, debido a sus trece playas y la proximidad a Santiago.

Las principales actividades económicas de Valparaíso son el turismo, cultura, transporte, la industria manufacturera y de producción de alimentos. La Región de Valparaíso es sede de tierras agrícolas, productores de vino, así como actividades industriales como la minería del cobre y cemento. La mayor refinería de petróleo de Chile y también una importante refinería de cobre, el estado de propiedad de Ventanas, están situados en la Región. En los valles interiores, hay una industria de exportación en auge, principalmente de frutas y flores frescas. El área de la superficie terrestre de la Región de Valparaíso es de unos 16.400 km<sup>2</sup>.



FIGURA 45 LOCALIZACIÓN DE LA REGIÓN DE VALPARAÍSO EN CHILE (EEC)

## 8.5 GESTIÓN DE RESIDUOS EN LA REGIÓN DE VALPARAÍSO

De acuerdo con el censo más reciente (2006), la población de la Región de Valparaíso era de 1,9 millones<sup>42</sup>. La RSU generados en 2009 fueron de 1.600 toneladas por día, es decir, alrededor de 584.000 toneladas<sup>43</sup>.

Hay un vertedero sanitario, diez vertederos regulados, y cuatro vertederos abiertos no regulados que representan alrededor del 10% de los RSM eliminados en la zona. No hay estaciones de transferencia en la región y muy poco reciclaje<sup>44</sup>.

Hay varios municipios de esta región, pero este estudio se concentró en siete municipios colindantes, Valparaíso, Viña del Mar, Concón, Quilpue, Villa Alemana, Quillota, y Quintero. El mapa de la Figura 46 muestra los límites geográficos de la zona.

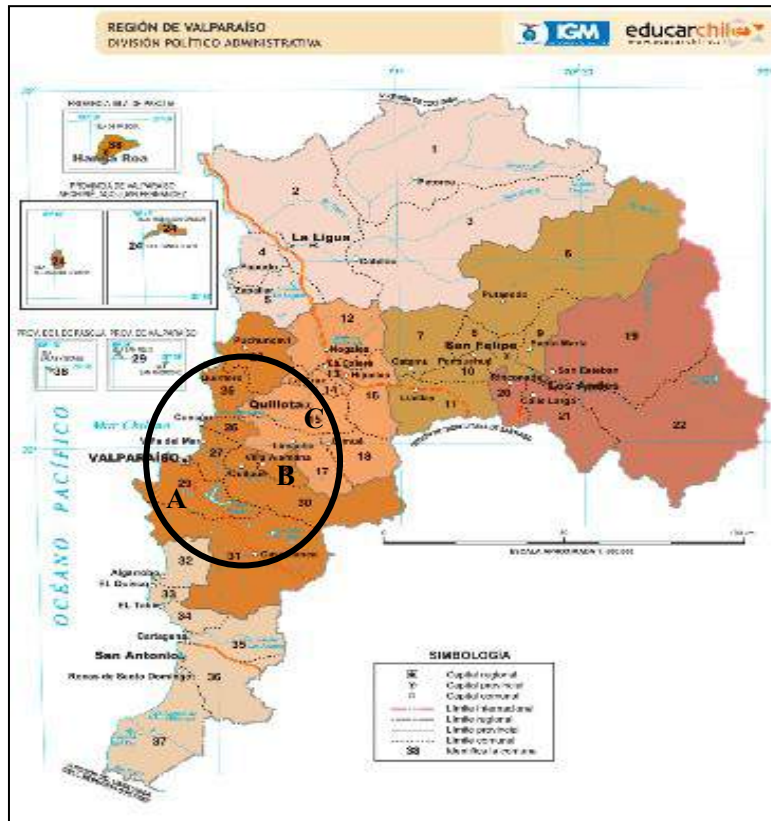


FIGURA 46 ÁREA GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO DE CASO DE VALPARAISO (EEC)

La generación de residuos y población (2009) para los municipios considerados en este estudio se muestran en la Tabla 22.

TABLA 22 GENERACIÓN DE RESIDUOS POR MUNICIPIO<sup>45</sup>

Municipio	Población	TPA	TPD
Concón	53.944	21.684	59
Viña del Mar	291.760	117.362	322
Valparaíso	275.982	97.580	267
Quilpué	155.318	43.085	118
Villa Alemana	125.275	35.108	96
Quintero	25.054	21.632	154

Quillota	86.160	43.062	118
TOTAL	1.013.493	379.513	1.134

Los residuos sólidos introducidos en Valparaíso por cruceros se consideran "residuos extranjeros" (por ley) y deben ser transportados y eliminados en un vertedero de Santiago.

La Municipalidad de Valparaíso y Viña del Mar representan el 56% de la población total de la Región de Valparaíso. La producción de RSU está creciendo a un 1,8% al año y se estima que llegará a 155.000 toneladas en Viña del Mar y 121.000 toneladas por año en el Municipio de Valparaíso<sup>45</sup>.

La generación de energía WTE y los ingresos dependen del valor calorífico de los residuos. Se revisaron varios estudios de caracterización del pasado en la literatura, pero se encontró que eran antiguos y no fiables. El Gobierno Valparaíso no ha desarrollado una caracterización hasta la fecha.

La Tabla 23 muestra la composición promedio de los RSU de Valparaíso y Viña del Mar en 2001, obtenidos a partir de un informe de 2011 proporcionado por Esteban Alvez de Stericycle (<sup>47</sup>). El valor calorífico de 9,38 MJ/kg del estudio de 2001 es bajo en relación con los obtenidos por el EEC para Buenos Aires, Toluca y Montevideo. En vista del desarrollo económico de Chile en la primera década del siglo 21, se espera que el valor actual de calefacción sea algo mayor.

TABLA 23 COMPOSICIÓN DE LOS RSU DE VALPARAÍSO<sup>46</sup> Y PODER CALORÍFICO

Componente de RSU	Caracterización de RSU de Valparaíso (2001)	MJ/kg de material (Manual Tchobanoglous)	Contribución al poder calorífico de los RSU, MJ/kg
Residuo orgánico	63,6%	4,6	2,9
Papel y cartón	11,7%	15,6	1,8
Plástico	11,7%	32,4	3,8
Textiles	4,4%	18,4	0,8
Vidrio	4,1%	0	0
Metal	3,9%	0	0
Otro	0,6%	4	0,02
Total	100%		9,4

## 8.6 DISPOSICIÓN ACTUAL DE LOS RSU EN LA REGIÓN DE VALPARAÍSO

### Reciclaje

El reciclaje en la Región de Valparaíso es informal y mínimo. El gobierno local lo estima a ser tan poco como 2%.

### **Depósito en vertederos**

La Figura 46 muestra la ubicación de las instalaciones actuales de eliminación de los municipios seleccionados en la Región de Valparaíso. Su descripción es la siguiente.

#### **a) Relleno El Molle (A en la Figura 46)<sup>47</sup>**

El Molle es el vertedero principal de la región, administrado por la empresa Stericycle, y está situado al sur de la autopista La Pólvora en la comuna de Valparaíso. Ha estado en operación desde 2001 y ocupa una superficie de 943,6 hectáreas (231 acres). Se compone de tres células, la primera de ellas alcanzó su plena capacidad en 2001, el segundo funciona ahora y alcanzará su plena capacidad en 2014, y el tercero se abrirá como un relleno sanitario en 2013 y se espera que alcance la plena capacidad en el 2028.

El número de célula dos recibe cerca de 357.000 toneladas (1.000 toneladas/día) de residuos sólidos anualmente de los municipios de Valparaíso, Viña del Mar, Quilpué, Concón, La Ligua, Olmué y Limache (con una población total de 872.000 habitantes (2009)). De esta cantidad, 837 toneladas por día es de RSU de los municipios y 163 toneladas por día son de residuos comerciales de empresas privadas. La instalación recoge quema un estimado de 15 toneladas por día de metano y El Molle recibe créditos de carbono por reducir las emisiones de metano a la atmósfera. La densidad final de los RSU depositados en vertederos es de 0,9 ton/m<sup>3</sup>. Como se discutió en la Sección 7.12, la tarifa aplicada promedio es de US \$ 14 por tonelada en vertedero.

El vertedero El Molle ha tenido un historial de problemas ambientales en el pasado con varias multas ambientales. La nueva administración por Stericycle se hizo cargo en 2010 y se ha comprometido a evitar los problemas ambientales del pasado. Stericycle está desarrollando un relleno sanitario en la tercera celda que abrirá en 2013.

#### **b) Vertedero controlado por municipio, no-sanitario Villa Alemana (B en la Figura 46)<sup>44</sup>**

Este vertedero es propiedad y está operado por la municipalidad de Villa Alemana y se encuentra en "Sector Sur Poniente Rosenquista, vía 2B-1" en la comuna de Villa Alemana. Está en funcionamiento desde 1994 y tiene una superficie de 10 hectáreas (25 acres). Se esperaba que llegara a su capacidad final oficial en el año 2010, pero todavía recibe aproximadamente 23.000 toneladas de residuos al año (63 toneladas por día) de una población de más de 116.000 personas. En los últimos años, el vertedero recibió varias multas ambientales, pero aún no hay una solución final debido a la falta de alternativas de sitios de disposición. Está previsto cerrar este vertedero una vez una estación de transferencia prevista sea construida. La tarifa aplicada es de sólo US\$ 6 por tonelada.

#### **c) Vertedero no-sanitario San Pedro (C en la Figura 46)<sup>44</sup>**

Este vertedero abierto, de gestión y propiedad privada, se encuentra en el Fundo Los Hermanos, sector Lo Venecia, en la comuna de Quillota. Ha estado en operación desde 1996 y cubre un área de 10 hectáreas (25 acres). Se proyectaba que alcanzaría su capacidad final en el año 2007, pero todavía recibe los residuos de los municipios de Quillota, Calera, Hijuelas, La Cruz, y Nogales, es



decir, 38.000 toneladas de residuos al año (103 TPD) de una población de alrededor de 194.000 personas. La tarifa aplicada es de US\$ 8 por tonelada.

## 8.7 TARIFAS APLICADAS

Como se señaló anteriormente, las ciudades principales de la Región de Valparaíso, Viña del Mar y la ciudad de Valparaíso disponen sus RSM en el relleno sanitario "El Molle".

La Tabla 24 muestra el coste de recogida, transporte y eliminación de los municipios evaluados en este estudio.

TABLA 24 COSTOS DE RECOLECCIÓN/TRANSPORTE Y ELIMINACIÓN DE DIVERSOS MUNICIPIOS EN 2010<sup>45</sup>

Municipio	Sitio de disposición	Fecha de terminación de contrato	Costo de recolección (US\$/ton)	Costo de eliminación (US\$/ton)	Costo total (US\$/ton)	Costo anual (US\$)	Distancia al vertedero abierto (km)
Concón	El Molle	29-09-21	32,8	15,6	48,4	1.049.146	30
Viña del Mar	El Molle	31-10-21	98,3	13,4	111,7	13.111.765	21
Valparaíso	El Molle	03-10-21	77,2	12,4	89,6	8.938.332	10
Quilpué	El Molle	01-08-13	39,4	11,5	50,9	2.193.600	33
Villa Alemana	Villa Alemana	NA	21,9	6,4	28,3	995.143	7
Quintero	Quintero	NA	25,8	3,6	29,4	637.433	3
Quillota	San Pedro	30-06-11	24,9	7,8	32,7	1.408.629	12

## 8.8 CAPACIDAD PROPUESTA Y POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA

Sobre la base de la información recogida para los municipios seleccionados en la Región de Valparaíso, se propone que la primera planta de WTE en Chile tenga una capacidad nominal de 42 toneladas por hora, es decir, 336.000 toneladas por año (90% de disponibilidad, es decir, 8.000 hr./año). Se propone que esta planta se componga de dos líneas, cada una de capacidad nominal de 21 toneladas por hora. El PCI (Poder Calorífico Inferior) del DSM de Valparaíso se supone que es 9,4 MJ/kg (Tabla 23). Por lo tanto, la replicación de los cálculos en la Sección 5.8 de la Guía

(recuperación de energía), la producción neta de electricidad en una planta de capacidad de 1.000 toneladas/día se estima en 540 kWh/tonelada, o sea 182 GWh / año.

## 8.9 SITIO SELECCIONADO PARA LA PLANTA WTE

---

El equipo del proyecto evaluó varias alternativas para la ubicación de la planta WTE, en consulta con las personas con conocimientos en la Región de Valparaíso:

- Vertedero El Molle
- Zona Industrial Concón
- Zona Industrial Curauma
- Vertedero abierto de Villa Alemana

El vertedero El Molle fue seleccionado por las siguientes razones:

- Es el sitio más cercano a Valparaíso y Viña del Mar, los municipios más poblados de la Región de Valparaíso.
- Se trata de un vertedero en funcionamiento con todos los permisos ambientales y sectoriales aprobados.
- Razones económicas.
- Razones estratégicas.
- La proximidad a las carreteras principales y accesos garantizados.
- El Molle es operado por una empresa privada, que está interesada en el desarrollo de métodos que reduzcan los impactos ambientales.

La superficie aproximada requerida para la planta propuesta se estima en 5 ha en consecuencia con la Sección 5.5 de la Guía (selección de un sitio para la planta de WTE). La Figura 47 muestra una vista aérea del sitio de El Molle.



FIGURA 47 FOTO AÉREA DEL VERTEDERO EL MOLLE (EEC)

## 8.10 LÍMITES DE EMISIÓN PROYECTADOS

Una norma chilena de incineración se aprobó en 2007. La Tabla 25 presenta las emisiones previstas de la planta de WTE (medidas en la chimenea) de distintos contaminantes sobre una base diaria y los compara con las normas de emisión de Chile, EE.UU., y la U.E..

TABLA 25 COMPARACIÓN DE LÍMITES WTE CON ESTÁNDARES INTERNACIONALES<sup>i</sup>

Contaminante	Unidades	U.E. <sup>A</sup>	EE.UU. <sup>B</sup> (EPA)	Chile <sup>C</sup>	Instalación WTE
Material particulado	mg/Nm <sup>3</sup>	10	15	30	9
Opacidad	%	---	10	---	Nulo
Cadmio	ug/Nm <sup>3</sup>	5 *	8	100	8
Plomo	ug/Nm <sup>3</sup>	500 **	107	1000	107
Mercurio	ug/Nm <sup>3</sup>	50	38	100	19
	% Eliminación	---	85	---	> 85
SO <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	50	61	50	49
	% Eliminación	----	80	---	> 80
HCl	mg/Nm <sup>3</sup>	10	29	20	20
	% Eliminación	---	95	---	> 95
CO	mg/Nm <sup>3</sup>	50	89	50	50
NO <sub>X</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	200	219	300	124
Dioxinas/Furanos (EQT)	ng/Nm <sup>3</sup>	0,1	0,13	0,2	0,1

*Diciembre de 2000 relativa a la incineración de residuos.*

*\* Estándar para el Cd + Ti; \*\* Estándar de Pb + Sb + As + Co + Cr + Cu + Mn + Ni + V*

<sup>i</sup> Todas las concentraciones se miden a condiciones de gas seco 11% de O<sub>2</sub> en condiciones normales (0 °C y 1 atm)

- A. Directiva 2000/76/CE del Parlamento Europeo sobre la incineración de residuos, 4 de diciembre de 2000 ([www.ingvar.is/Sorp/FlueGasCleaning.pdf](http://www.ingvar.is/Sorp/FlueGasCleaning.pdf));
- B. Registro Federal, la EPA 40 CFR Parte 60, 19 de diciembre de 2005 ([www.epa.gov/ttn/atw/129/mwc/fr19de05.pdf](http://www.epa.gov/ttn/atw/129/mwc/fr19de05.pdf));
- C. "Norma de Emisión para Incineración y Coincineración. Decreto 45 Fecha Publicación 05/10/2007"

La Tabla 25 muestra que las emisiones previstas de la planta de Valparaíso WTE serán tan bajas como las normas para instalaciones WTE de la U.E. y EE.UU. y por debajo de los límites actuales de Chile.

## 8.11 PROYECCIÓN DE COSTOS DE LA PLANTA WTE

Debe tenerse en cuenta que los costes presentados en este informe son estimaciones basadas en instalaciones de reciente construcción en Europa y los EE.UU., donde las plantas WTE están diseñadas con una horna de combustión de parrilla de alta calidad, y una caldera de múltiples pases seguida de un depurador de gas semi-seco, un filtro de mangas y una chimenea de 75m; las instalaciones WTE se compran en un proceso de licitación competitiva en tres lotes mecánicos y un lote civil; y un consultor es contratado para coordinar el proceso de licitación y las interfaces de lote.

Por lo tanto, estas estimaciones no tienen en cuenta todas las condiciones locales, y también están sujetas a muchos factores variables tales como el precio del acero y el costo de la mano de obra. Por lo tanto, se consideran dentro de una precisión de más o menos 20%.

### Coste de capital:

El sitio necesario para el desarrollo de la instalación se estima aproximadamente en 5 hectáreas (50.000 metros cuadrados). El costo por metro cuadrado en El Molle es equivalente a US\$ 13. En consecuencia, el costo de la tierra será de aproximadamente  $50.000 \text{ m}^2 \times \text{US\$}13 = \text{US\$} 650.000$ . Todos los artículos en el costo de capital se presentan en la Tabla 26.

TABLA 26 ESTIMACIÓN DE COSTO DE CAPITAL

<b>Número de líneas</b>	2
<b>Preparación del sitio, acceso, paisajismo (millones de US\$)</b>	14
<b>Edificios, chimenea (millones de US\$)</b>	46
<b>Parrilla, calderas, suministro de aire, manejo de cenizas, sistemas eléctricos y mecánicos (millones de US\$)</b>	94
<b>generador de turbina (millones de US\$)</b>	23
<b>Sistema de control de la contaminación del aire (millones de US\$)</b>	23
<b>Contingencia (millones de US\$)</b>	23
<b>Terreno</b>	2

<b>Costo total de capital estimado (millones de US\$)</b>	<b>225</b>
<b>costo de capital estimado (US\$/tonelada anual de capacidad)</b>	<b>670</b>

### Costos de operación:

Los costos de operación, asumiendo un personal de 43 personas, y que las cenizas de fondo y volátiles se mezclan y disponen en el vertedero El Molle, se muestran en la Tabla 27.

TABLA 27 COSTOS DE OPERACIÓN

Número de líneas	2
Eliminación de cenizas (millones de US\$; US\$3,75/tonelada)	1,3
Productos químicos (millones de US\$; US\$4/tonelada)	1,3
Servicio de limpieza de gas (millones de US\$; US\$8/tonelada)	2,7
Mantenimiento (millones de US\$; US\$15,6/tonelada)	5,2
Varios (millones de US\$; US\$2/tonelada)	0,7
Personal, empleados (millones de US\$)	1,2
Subtotal (millones de US\$)	12,4
Contingencia (millones de US\$; 5%)	0,6
Subtotal	13
Seguros (millones de US\$; 0,6%)	0,1
<b>Costo de operación estimado (millones de US\$)</b>	<b>13,1</b>

<b>Costo de operación estimado (US\$/tonelada de capacidad)</b>	<b>39</b>
---	-----------

## 8.12 PROYECCIÓN DE INGRESOS DE LA PLANTA WTE

### Tarifas aplicadas

Dado que se prevé que la instalación de WTE se ubicará en El Molle, se considera la tarifa aplicada cobrada en El Molle. Como se señaló anteriormente, El Molle recibe RSU de los municipios y los desechos industriales del sector privado con precios diferentes para tarifa aplicada<sup>47</sup>:

- 16,3% de los residuos eliminados son residuos industriales de empresas privadas que pagan una tarifa de US\$ 22,8 por tonelada.
- 83,7% de los residuos eliminados es RSU de municipios con una tarifa media de US\$ 12 por tonelada de RSU

Por lo tanto, la tarifa media es:  $0,163 \times \text{US\$}22,8 + 0,837 \times \text{US\$}12 = \text{US\$}14$  por tonelada.

Los gastos de recolección se asumen que permanecen constantes. Sin embargo, considerando el alto coste actual de la recogida de RSU en Valparaíso y Viña del Mar, indica que el sistema de recogida debe racionalizarse junto con la construcción de la WTE.

### Venta de electricidad

En Chile, el sector privado es responsable de la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica. Por lo tanto los precios de mercado de la electricidad son resultado de un mercado de energía libre, en contraste con otras economías de América Latina, donde los gobiernos fijan precios de la electricidad, la electricidad se vende en un mercado al contado basado en el envío a un costo marginal de corto plazo; o en un mercado de contratos, por lo que los generadores de electricidad la venden a precios estabilizados en contratos con empresas distribuidoras y también con clientes en minería, industriales, comerciales.

Concesiones o permisos no son necesarios para la instalación de plantas de generación y otras obras anexas; sin embargo, deben cumplir con los requisitos que cualquier otra instalación industrial está sujeta, incluyendo permisos ambientales necesarios.

Las energías renovables no convencionales (ERNC) no han sido un importante contribuyente al sistema de generación de energía chileno, principalmente debido a su alto costo. Sin embargo, en los últimos años, el uso de energías renovables ha comenzado a ser un tema motivador para el gobierno de Chile, y por esa razón se han aprobado varias enmiendas a la ley.

### Precio de contado

El precio de contado está influenciado principalmente por el nivel de agua en el depósito en el Centro-Sur de Chile (si se trata de un año seco o no) y los combustibles fósiles. La Tabla 28 muestra los precios al contado para el Sistema Interconectado Central.

TABLA 28 PRECIOS AL CONTADO (US\$/MWH)<sup>48</sup>

Mes	2007	2008	2009	2010	2011
Enero	57	247	115	116	157
Febrero	123	272	142	135	217
Marzo	144	325	134	135	236
Abril	145	280	121	133	205
Mayo	171	252	95	141	221
Junio	252	181	108	148	
Julio	223	200	102	138	
Agosto	208	143	96	157	
Septiembre	176	134	68	127	
Octubre	154	155	104	128	
Noviembre	169	141	84.7	125	
Diciembre	215	127	80	163	

En los últimos años, los precios al contado de la electricidad en Chile han sido altos, pero también muy variables, debido a la sequía en la región central del sur. Además, el aumento de los precios de los combustibles y la crisis económica internacional han dado lugar a muy altos precios en bolsa en la primera mitad del 2011. Se asume que cuando el nuevo proyecto hidroeléctrico HidroAysén se ponga en marcha en el año 2017 los precios al contado se reducirán, pero no hay certeza acerca esta suposición.

#### Precio bajo acuerdo de compra de energía (Power Purchase Agreement, (PPA))

Un acuerdo de compra de energía (PPA) puede ser firmado, ya sea con una empresa industrial, minera, de distribución o de generación. En 2011, los procesos de licitación de contratos de electricidad en Chile han mostrado precios entre US\$ 80 y 110 por MWh<sup>48</sup>. Este precio no tiene en cuenta el "bien" o el "atributo de energía renovable": Como se ha mencionado en el Apéndice 1 del estudio de caso de Chile, se requiere que los servicios públicos tengan por lo menos un 5% de su generación a partir de fuentes renovables no convencionales entre los años 2010 y 2014 y luego aumentar gradualmente al 10% en 2024. En el caso de los residuos, la ley especifica que la fracción biogénica se encuentra bajo la categoría de biomasa, pero no especifica qué fracción de los residuos sólidos urbanos se considerarían para el atributo de energía renovable.

El mecanismo de PPA es asumido para fijar el precio de la electricidad que se genere por la WTE de Valparaíso. Con este mecanismo, el precio de la electricidad es más bajo pero proporciona un ingreso estable durante 20 años. Este es un escenario más fiable para una instalación de WTE, a pesar de que la regulación chilena permite a las pequeñas instalaciones suministrar electricidad a la red nacional al precio spot.

Un PPA de US\$ 90/MWh se asume en este análisis. En consecuencia, los ingresos procedentes de la venta de electricidad se estiman en US\$ 46 por tonelada de DSM.

### **Créditos de carbón**

Para el cálculo de los ingresos de créditos de carbono, se utilizó el factor de 0,6 toneladas de CO<sub>2</sub>/MWh, según lo dispuesto por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Esto se calculó para el Sistema Interconectado Central, que abarca la Región de Valparaíso y utiliza una combinación de petróleo, carbón y la generación de energía hidroeléctrica que la planta WTE desplazaría. Este factor se multiplica por la generación eléctrica estimada de la planta (182 GWh/año) para obtener la estimación de 109.200 toneladas de créditos de dióxido de carbono.

El cálculo anterior no incluye las emisiones evitadas de metano, ya que la metodología utilizada actualmente por el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) reconoce sólo los primeros diez años de metano de vertedero evitado, que es una fracción del metano general verdaderamente evitado a través de instalaciones WTE (los vertederos pueden desprender metano durante 100 años o más). Por lo tanto, la cantidad de metano de vertederos evitado acreditable es muy probable que sea comparable a las emisiones de la chimenea CO<sub>2</sub> fósil de la planta WTE. Por lo tanto, en este análisis, se supondrá que sólo 109.200 RCE se emitirán a un precio de US\$ 16 (Sección 5.18 de la Guía - Ingresos); esto se traduce en un ingreso de sólo US\$ 5 por tonelada de DSM.

### **Venta de metales recuperados**

Como se ha mencionado en la Sección 5.18 de la Guía, se estima que al menos 50% de los metales contenidos en los RSM pueden ser recuperados de las cenizas de fondo WTE. Dado que los DSM en la Región de Valparaíso contienen 3,9% de metales (Tabla 23), entonces de cada tonelada de RSU quemado aproximadamente 19,5 kilogramos de metales podrían ser recuperados. Por lo tanto, la instalación propuesta en El Molle recuperaría un estimado de 6.500 toneladas de metal por año. Teniendo en cuenta esta cifra y un precio estimado de chatarra en Chile de US\$ 200 por tonelada, la instalación WTE tendría un ingreso de US\$ 1,3 millones por año, es decir, US\$ 3,9 por tonelada de DSM en combustión.

## **8.13 ANÁLISIS FINANCIERO DE WTE PARA EL ÁREA DE VALPARAISO**

El enfoque utilizado para el análisis financiero es el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) de los flujos de efectivo de operación. Esto significa que los costes de financiación específicos no fueron tomados en cuenta y por lo tanto lo más probable es que tanto VAN y TIR disminuyan una vez que se incluyan estos costos. Además, las variaciones en los flujos de efectivo debido a la inflación u otros factores no fueron incluidos y podrían tener un impacto importante en el análisis.

Los escenarios considerados para la evaluación financiera son los siguientes:

- Escenario Base: PPA donde la electricidad se vende a US\$ 90/MWh, y no hay ningún atributo de energía renovable.



- Escenario 2: PPA con una empresa de generación, lo que significa que el atributo de energía renovable está incluido, y por lo tanto el precio de la electricidad sería de US\$ 112,4/MWh.
- Escenario 3: La electricidad se vende al precio al contado. El precio de la electricidad contraído en virtud de este escenario es el promedio del precio spot de 2011, es decir, US\$ 207/MWh.

La tarifa aplicada para los tres escenarios se fija en el precio actual de US\$ 14 por tonelada. Esta tarifa es muy baja e inadecuada para el depósito de RSU en vertederos sanitarios, pero en las actuales circunstancias en las que los municipios no reciben ingresos suficientes para satisfacer su presupuesto de eliminación de residuos, no es realista esperar que paguen una tarifa más alta para la eliminación de RSU, a pesar de los considerables beneficios energéticos y ambientales de la alternativa WTE a la región y Chile en su conjunto.

El periodo de recuperación utilizado fue de 23 años, suponiendo aproximadamente 3 años de construcción y 20 de operación.

Las tasas de descuento utilizadas para el cálculo del VAN son 5%, 10% y 15%. La razón para seleccionar 5% es que este es el costo de capital estimado para el gobierno federal de Chile en dólares estadounidenses; a partir del 18 de octubre de 2011, los 20 años propágación de Chile sobre los bonos de Estados Unidos fue del 2%, y de 20 años del Tesoro se negociaban en el 2,7%<sup>49</sup>. La razón de utilizar también las tasas de descuento del 10% y el 15% es que si los inversores privados participan en la planta de WTE, el costo de capital sería más alto que para el gobierno de Chile.

La Tabla 29 muestra el valor actual neto para los tres tipos de descuento y también la TIR para los tres escenarios.

TABLA 29 VAN A TASAS DE DESCUENTO DEL 5%, 10%, 15% Y LA TIR PARA LOS TRES ESCENARIOS

<b>Escenario</b>	<b>VAN al 5% (millones de US\$)</b>	<b>VAN al 10% (millones de US\$)</b>	<b>VAN al 15% (millones de US\$)</b>	<b>TIR (tasa anual)</b>
Base	-85	-115	-124	-0.2%
Escenario 2	-42	-89	-108	2.7%
Escenario 3	141	19	-39	11.3%

Los resultados muestran que a la actual y muy baja tarifa aplicada, el único escenario posible es el escenario 3, cuando el costo de capital es inferior a 11,3%. Las tarifas requeridas para alcanzar el punto de equilibrio operativo de la planta (es decir, en VAN = 0), a las tasas de descuento de 5%, 10% y 15% en los tres escenarios se muestran en la Tabla 30.

TABLA 30 TARIFAS APLICADAS REQUERIDAS A TASA DE DESCUENTO DEL 5%, 10% Y 15%

Escenario	Tarifa aplicada (US\$/tonelada)		
	Tasa descuento del 5%	Tasa descuento del 10%	Tasa descuento del 15%
Base	38	69	106
Escenario 2	26	56	94
Escenario 3	0	5	43

## 8.14 PARTES INTERESADAS

Cuando una nueva tecnología, como WTE, se introduce en una sociedad, habrá una serie de reacciones, desde pleno apoyo a la oposición abierta, por los actores locales con diversos intereses, niveles de información, y habilidades económicas y de organización. Es necesario entender sus motivaciones y reacciones antes de proceder a las etapas de planificación y ejecución del proyecto.

Un sistema óptimo manejo de los RSM que satisfaga las necesidades de la comunidad y proporcione soluciones amigables con el ambiente requiere la identificación y el análisis de los interesados y sus intereses previamente; y la difusión adecuada de la información.

La Tabla 31 en el Apéndice 2 del Estudio de Caso Chile enumera los posibles interesados que podrían intervenir en la discusión y desarrollo de una planta de WTE en la Región de Valparaíso, sus intereses y su influencia.

Durante las visitas de campo a la Región de Valparaíso y la ciudad capital de Santiago, el equipo del EEC encontró una reacción positiva al concepto de avanzar en la gestión sostenible de los residuos mediante la implementación de la primera WTE de Chile en la Región de Valparaíso. La mayor preocupación expresada, por funcionarios del gobierno, la industria y el mundo académico, fue la viabilidad económica de un proyecto de este tipo en las condiciones económicas prevalecientes.

## 8.15 CONCLUSIONES DEL ESTUDIO DE CASO DE CHILE

La Región de Valparaíso se considera que ofrece el sitio más probable para la localización de la primera instalación WTE moderna en Chile, debido a la necesidad urgente de resolver el problema de la gestión de residuos sólidos actual y la importancia de esta región dentro de Chile como a nivel internacional. La mayoría de los rellenos sanitarios en esta región ya han alcanzado su capacidad total, o se espera que la alcancen en el plazo de unos pocos años; También, la ubicación geográfica y la topografía de la región hacen la apertura de nuevos vertederos un reto.

La mejor opción para la instalación WTE de la región de Valparaíso es ubicarse en El Molle, donde la mayoría de los permisos ambientales requeridos ya han sido aprobados. El Molle es la mayor instalación de eliminación de residuos en la Región y recibe los residuos sólidos urbanos de las ciudades de Valparaíso y Viña del Mar, con contratos de eliminación de residuos ya asentados. La colaboración con la empresa que se encuentra operando este vertedero sería ventajoso en el

desarrollo del proyecto WTE y la compañía ha expresado su interés en este proyecto. Es necesario conectar con todas las otras partes interesadas que figuran en el presente informe y discutir sus preocupaciones y necesidades especiales.

Por desgracia, a pesar de todas sus ventajas ambientales, el análisis financiero se presenta en este informe ha demostrado que, en las actuales tarifas y precios de energía en Chile, WTE aún no es económicamente viable a menos que la electricidad se venda al precio spot. Por otra parte, la tarifa aplicada tendría que ser al menos US\$ 38/tonelada (es decir, US\$ 24/ton más alto que la tarifa corriente de compuerta de vertedero) para que el proyecto alcance el punto de equilibrio operativo bajo el escenario base. Sin embargo, El Molle hasta la fecha es un vertedero que no provee la protección de las aguas subterráneas, ni del clima global. Sobre la base de la experiencia internacional, se estima que la aplicación de un verdadero relleno sanitario en la Región de Valparaíso requeriría una tasa de entrada de al menos US\$ 30 por tonelada de RSU; dicha tarifa aplicada haría que la propuesta WTE sea económicamente competitiva con el depósito en vertederos sanitarios.

El pensamiento actual es que los municipios ya están estresados y tienen que cubrir el coste total anual de la gestión de los residuos desde otras fuentes de ingresos; por lo tanto, no pueden permitirse una tarifa más alta, a pesar de que los beneficios medioambientales son evidentes para ellos. Sólo una parte de la población corre con los costes de gestión de residuos a través de la factura de impuestos de propiedad y, además, este impuesto no depende de la cantidad de residuos generados.

Los municipios de la región ya destinan una fracción significativa de su presupuesto a la gestión de residuos sólidos. En particular, del presupuesto total de la gestión de residuos de Valparaíso y Viña del Mar, el coste de recogida y transporte representa el 87%, mientras que los costes de vertido representan sólo el 13% del presupuesto total. Estos altos costos de recolección no parecen estar relacionados con la distancia del viaje al vertedero. Por ejemplo, la distancia entre la ciudad de Valparaíso y El Molle es sólo diez kilómetros, mientras que la recogida y transporte cuestan US\$ 77 por tonelada. El plan para un nuevo WTE en El Molle, sin duda debe considerar un medio más eficiente y menos costoso de recogida de RSU en Valparaíso y Viña del Mar.

Los municipios son totalmente responsables de la gestión de residuos sólidos, por lo tanto, a cargo de los procesos de licitación para la eliminación de residuos. Licitaciones futuras deben incluir la opción de tecnologías WTE, como un municipio en el sur de Chile ya lo ha hecho.

Reciclaje en la Región de Valparaíso es informal y mínimo. Se recomienda que el plan para una planta de WTE en Molle también tenga en cuenta el siguiente sistema de reciclaje:

a) Los municipios de Valparaíso y Viña del Mar piden a los ciudadanos recoger materiales reciclables designados (por ejemplo papel mixto, envases de metal y plástico, otros metales) por separado y una vez a la semana (por ejemplo, los sábados), colocarlos en la acera para ser recogidos por los mismos camiones de recogida que durante el resto de la semana recogen la basura que va a los RSU.

b) La colección de flujo único es transportada a un edificio adyacente a la planta WTE en El Molle, donde los trabajadores clasifican y pacan los distintos materiales reciclables (por ejemplo, papel mixto, envases plásticos, metales ferrosos, metales no ferrosos) para el transporte a plantas de

reciclaje en Chile o el extranjero. Este programa reforzará el principio bien establecido de que el reciclaje va de la mano con WTE.

Los aspectos económicos desarrollados en este informe se basan en una vida de 20 años de la planta WTE propuesta, aunque algunas modernas instalaciones WTE ya han llegado al trigésimo quinto año y continuarán operando en el futuro previsible.

Con el fin de desarrollar una instalación de tecnología de punta de WTE en Valparaiso, será necesario que el gobierno nacional lleve el tema de la gestión de residuos sólidos más arriba en su lista de prioridades, de manera similar a la decisión gubernamental tomada hace una década con respecto al tratamiento de aguas residuales en Chile; Hoy en día, las aguas residuales son tratadas en instalaciones modernas con una cobertura de casi el 95%. El primer proyecto WTE en Chile debe llevarse a cabo como una decisión de infraestructura similar a la previa decisión para desarrollar carreteras nacionales que han cambiado el panorama de la infraestructura del país. Por ejemplo, en algunas otras naciones el gobierno ha apoyado el primer WTE en el país mediante la subvención de la tarifa o co-financiación de un porcentaje de la inversión de capital, la devolución de lo que representa el elemento de mayor costo de la WTE propuesta. Por lo tanto, el gobierno nacional puede examinar los medios por los cuales se puede fomentar la construcción de la primera planta de WTE de la nación.

Apoyo financiero adicional puede ser posible mediante compensación de carbono y mecanismos de mitigación de gases de efecto invernadero. Metodologías más precisas de compensación de carbono, que reflejan mejor el impacto neto de carbono de estas instalaciones, incrementarán el beneficio monetario de los proyectos de compensación de carbono, y, en consecuencia, la viabilidad de este tipo de proyectos<sup>50</sup>.

Este proyecto debe ser visto como un desarrollo positivo genuino con efectos muy beneficiosos, tanto ambientales como sociales, como resultado directo de implementar, partiendo con la Región de Valparaíso, un sistema de gestión sostenible de los residuos que incluya el reciclaje, recuperación de energía y vertederos sanitarios. Chile es hoy un país miembro de la OCDE y la aplicación de WTE puede ayudar a la nación para cumplir con las directrices de esta organización con respecto a las cuestiones ambientales.

El desarrollo de proyectos como WTE será más probable, debido a la existencia de multas por incumplimiento de energía verde legalmente requerida, así como la discusión en curso en el Senado que puede dar lugar a la exigencia de que el 20% de la generación de energía en Chile sea derivada de fuentes de energía renovables no convencionales. Además, el potencial, ratificado por la ley, de conectar tal energía a la red eléctrica a un costo marginal y la venta de energía renovable a tasas similares a las de los grandes jugadores acelerará la implementación de proyectos de energía a menor escala, como las instalaciones de WTE.

---

## APÉNDICES DEL ESTUDIO DE CASO DE CHILE

---

### APÉNDICE 1: MARCO LEGAL

---

## 1.1. LEYES Y REGLAMENTOS RELACIONADOS CON LA GESTIÓN DE RESIDUOS

---

1. En 2007, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) invitó a Chile a participar en esta organización, que impone un alto estándar ambiental para las políticas públicas y la calidad del crecimiento. Las recomendaciones de la OCDE están diseñadas para reducir el número de vertederos y aumentar la recuperación de material reciclable, así como el tratamiento térmico de residuos con recuperación de energía.
2. El Ministerio de Salud en 2007 emitió el Reglamento sobre las condiciones de salud y seguridad en rellenos sanitarios (DS N° 189/2007 MINSAL), que requiere que todos los vertederos a cielo abierto se conviertan en rellenos sanitarios o someterse a los planes de cierre del Ministerio de Salud para el 31 de diciembre de 2010 para asegurar el cumplimiento de esta norma. Sin embargo, este y otros "plazos" se han extendido debido a la falta de soluciones de disposición final.
3. La Política de Gestión Integral de Residuos Sólidos aprobada por el Consejo de Administración de la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) en 2005, establece el estándar para el manejo de residuos sólidos en Chile.
4. El Decreto Supremo No. 95 de 2002 modifica las reglas del proceso de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA).
5. Ley 19300 de 1994: La Ley de Bases del Medio Ambiente.

Hay otras dos leyes que están en estudio y se espera que se pongan en vigor durante esta administración: La Ley de Asociamiento Municipal y la Ley General de Residuos.

6. El derecho municipal Valparaíso (artículo 3.16). Esta ley se refiere a la ubicación de las áreas de instalaciones de eliminación de residuos sólidos. Se permitirá la gestión de residuos sólidos urbanos en el área fuera de las zonas urbana y rurales, para el marco de plan establecido entre comunas de Valparaíso, además de los usos de tierra que se establecen en la Ley. El terreno donde tales servicios pueden estar ubicados deben cumplir las siguientes condiciones:

- Respetar una distancia de 300 metros de una vivienda local y más de 600 metros de una zona de residencia.
- Respetar una distancia mínima de 2.000 metros de zonas urbanas y zona residencial urbana.
- No estar ubicados en áreas protegidas.
- Respetar un mínimo de 600 metros de áreas silvestres protegidas y sitios prioritarios para la conservación de la flora y la fauna.

## 1.2. LEYES Y REGLAMENTOS RELACIONADOS A ENERGÍA

---

La Ley General de Servicios Eléctricos DFL4 (2006) es el marco legal que regula las concesiones y permisos eléctricos, derechos de acceso a propiedad, sistemas de transporte de energía eléctrica, desarrollo de los servicios de electricidad y suministro de energía eléctrica.

El siguiente es un resumen de los aspectos más relevantes de fuentes no convencionales de energía:

1. El artículo 149 de DFL4 establece que las fuentes de generación no convencionales, y las pequeñas fuentes de generación que se sincronizan con un sistema eléctrico a través de instalaciones pertenecientes a empresas de distribución, tendrán derecho a:

- Venta de energía evacuada al sistema al costo marginal instantáneo (CMg); o,
- Suscribir un contrato con clientes comerciales e industriales grandes en un acuerdo de compra de energía (PPA).

2. Una modificación de la Ley de la Energía, conocida como "Ley Corta I", introducida en 2004, estableció el primer incentivo directo para la generación de energía renovable (en concreto en el art. 71-7). La ley exonera parcialmente o completamente los generadores que producen electricidad a partir de fuentes no convencionales de pagar un peaje de transmisión. Generadores, que producen menos de 9 MW, están completamente exonerados mientras que los que generan entre 9 MW y 20 MW son parcialmente exonerado, pagando un porcentaje del peaje. Para los generadores de más de 20 MW el peaje de transmisión debe ser pagado.

3. En abril de 2008, la Ley 20257 modificó la ley de energía mediante la redefinición de cuáles fuentes no convencionales de energía se consideran renovables. Bajo esta ley la fracción biodegradable de los residuos se clasificó como biomasa, por lo tanto, una fuente renovable de energía. Antes de esta modificación de la ley, los residuos no eran considerados como biomasa.

4. Artículo transitorio N °1, a partir de la Ley 20257 requiere que los servicios públicos tengan al menos un 5% de su generación a partir de fuentes renovables no convencionales entre los años 2010 y 2014 (a partir de 2015 aumentando 0,5%) y alcanzar el 10% en 2024. El no-cumplimiento será castigado con multas de 0,4 UTM/MWh (33 US\$/MWh) y 0,6 UTM/MWh (49 US\$/MWh) para los infractores repitentes. Esta ley es válida hasta 2035, después de lo cual se espera que las fuentes de energía renovables sigan funcionando sin estos incentivos. Actualmente una nueva ley se está debatiendo en el Senado, que probable tenga éxito en su aprobación que está considerando la posibilidad de sustituir el actual mandato con un objetivo del 20% para el año 2020<sup>51</sup>.

## APÉNDICE 2 AL ESTUDIO DE CASO DE CHILE: LOS POSIBLES INTERESADOS

TABLA 31 LISTA DE POSIBLES PARTES INTERESADAS

<b>Parte Interesada</b>	<b>Interés de la parte interesada</b>	<b>Posible influencia de la parte interesada</b>
Ministerio de Medio Ambiente	<p>El proyecto requiere una evaluación de impacto ambiental</p> <p>Supervisión y control del sistema</p> <p>Establecer políticas ambientales</p> <p>Tratar de alcanzar los estándares internacionales de prácticas ambientales</p>	<p>Terminación, retraso o cambio del proyecto</p> <p>Obstáculos administrativos y burocráticos</p>
Ministerio de Salud	<p>Residuos se gestionan adecuadamente y emisiones al aire de la instalación cumplen con las regulaciones</p>	<p>Terminación, retraso o cambio del proyecto</p>
Municipios	<p>Administración del sistema de gestión de residuos</p> <p>Tener una alternativa económicamente competitiva para la eliminación de residuos</p>	<p>Suministrar residuos a la instalación y pago por la eliminación de residuos</p> <p>Negociación de contratos</p> <p>Problemas de gestión de residuos sólidos urbanos</p> <p>Falta de claridad y transparencia en el cálculo de las tarifas de eliminación de residuos</p> <p>Escasez de iniciativa de reciclaje</p>
Ministerio de Energía	<p>Proponer y regular incentivos para energía limpia</p>	<p>Regular el precio de la energía</p>

Gobierno Valparaiso	Beneficios sociales y de salud ambiental para la comunidad Incentivar la mejora continua del sistema	Demanda de competencias técnicas y recursos para abordar los problemas de corto y largo plazo Resolver los conflictos con las diversas partes interesadas
Cartoneros	Cambio en la gestión de los residuos puede afectar o eliminar su fuente de ingresos	Actividades de cartoneros pueden afectar las propiedades y cantidad de residuos
Grupos comunitarios y ciudadanos cercanos	Mejor calidad de vida debido a las mejoras ambientales Proyecto puede dar lugar a oportunidades de trabajo Impactos negativos	Terminación, retraso o cambio de proyectos debido a las protestas de la comunidad
ONG ambientales	Reducir el impacto de la gestión de residuos en el medio ambiente	Terminación, retraso o cambio de los proyectos debido a las protestas o apoyo a las ONG si el proyecto tiene un impacto ambiental positivo
Vecinos	Barrio libre de ruido, polvo, tráfico de carga y el impacto visual. Impacto de precios de bienes raíces	Terminación, retraso o cambio de los proyectos debido a protestas de los vecinos
Empresas de recolección y transporte	Desean mantener o expandir su negocio	Nuevos requisitos para clasificación, contenedores y vehículos
Generadores de energía	Prefieren pocos proveedores de energía y precios de energía más altos	Variación de los precios de energía debido a los precios de combustibles fósiles y sequía
Instalaciones de eliminación de residuos	Desean recibir más residuos Licitaciones concedidas y aplicadas por los servicios municipales	Puede bajar cuota de inflexión debido al aumento de la competencia



Municipios cercanos al área	Tener una alternativa económicamente competitiva para la eliminación de residuos	Suministrar residuos a la instalación y pago por la eliminación de residuos
-----------------------------	--	---

## REFERENCIAS AL ESTUDIO DE CASO DE CHILE

---

<sup>42</sup> Statistics National Institute of Chile. Available from [www.ine.cl](http://www.ine.cl)

<sup>43</sup> Ministry of The Environment of Chile, “Reporte del Manejo de Residuos Sólidos en Chile (2010)”.

<sup>44</sup> Ministry of the Environment of Chile, CONAMA (National Environmental Commission). Available from [www.mma.gob.cl](http://www.mma.gob.cl)

<sup>45</sup> Centro de Economía y Administración de Residuos Sólidos, Universidad Federico Santa Maria, “Plan de Manejo Integral de Residuos Sólidos Región de Valparaíso”. 2011.

<sup>46</sup> Grupo de Residuos Solidos, P.U.C.V., "Caracterización de RSU para Valparaíso". Report provided by provided by Esteban Alves, Stericycle, Valparaiso.

<sup>47</sup> Esteban Alvez, El Molle Landfill Manager, Stericycle.

<sup>48</sup> SIC-SING, SYSTEP, “Reporte Sector Eléctrico”. June 2011.

<sup>49</sup> Bloomberg.

<sup>50</sup> Weaver, A. J. 2011. Towards the Second Commitment Period of the Kyoto Protocol. Science 332: 795-796.

<sup>51</sup> Bloomberg New Energy Finance 2011.



## 9. ESTUDIO DE CASO 2: TOLUCA, MÉXICO

---

### 9.1 DATOS DEL PAÍS

---

México tiene una superficie de 1,96 millones de km<sup>2</sup>, una población de 112 millones de habitantes (2010), y una tasa de crecimiento de la población del 1,8% (2005-2010)<sup>52</sup>. El país está dividido en 31 estados más el Distrito Federal (Ciudad de México) y cada estado está dividido en municipios.

El PIB de México es US\$ 1.57 billones (2010 est.)<sup>53</sup>, La 12ª más alta del mundo, y la más alta en América Latina. El PIB per cápita es de US\$ 13.900 (estimador 2010 en base de paridad de poder adquisitivo)<sup>53</sup>.

México tiene una economía de libre mercado y alrededor del 90% de su comercio se encuentra bajo acuerdos de libre comercio con más de 50 países, entre ellos la Ley de Libre Comercio de América del Norte y la Asociación Europea de Libre Comercio. La economía se basa en una mezcla de industria (alimentos y bebidas, tabaco, productos químicos, hierro y acero, petróleo, minería, textiles, vehículos de motor, turismo) y agricultura (maíz, trigo, soja, arroz, frijoles, algodón, café, fruta, tomates). Es la 7º mayor productor de petróleo en el mundo, con una producción total de tres millones de barriles por día<sup>54</sup>.

### 9.2 GESTIÓN DE RESIDUOS EN MÉXICO

---

Cada municipio es responsable de su gestión de los residuos, incluyendo recolección, transporte, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos. Sin embargo, el Congreso Federal emite leyes que ayudan a los gobiernos federal, estatales y municipales a gestionar eficazmente todos sus asuntos de protección ambiental (véase el Apéndice 1- Estudio de Caso de México). La mayoría de los municipios gestionan estos servicios directamente, mientras que unos pocos lo hacen a través de empresas municipales autónomas, como SERVILIMPIA en Mérida<sup>55</sup> o empresas privadas, por ejemplo, el relleno sanitario en Queretaro<sup>55</sup>.

Los ciudadanos de México no pagan directamente por la gestión de residuos; los gobiernos municipales son responsables de la financiación de estos servicios a través de bienes raíces y otros impuestos. Por lo tanto, la financiación disponible puede no ser suficiente para proporcionar servicios de calidad.

Se estima que un 66% de los RSM se dispone en rellenos sanitarios, el 12% en rellenos regulados, 12% en vertederos de residuos no regulados, 6% se quema al aire libre y un 4% se desecha en la tierra y las aguas<sup>56</sup>. En las zonas metropolitanas, donde vive el 56% de la población de México, el 77-96% de los RSU se disponen en cualquiera de los rellenos sanitarios o regulados; en las zonas semiurbanas esta fracción varía del 29% al 34%, mientras que en las zonas rurales menos del 3% está dispuesto adecuadamente<sup>57,58</sup>.

### 9.3 OTRA INFORMACIÓN DE ANTECEDENTES PERTINENTE

México tiene la ventaja de contar con bancos de desarrollo que forman parte de la Administración Pública Federal (Apéndice 2-Estudio de Caso de México). Su función principal es facilitar el acceso a la financiación y prestar asistencia técnica a individuos e instituciones. Estos bancos de desarrollo pueden ayudar a esfuerzos, como una planta de WTE, para convertirse en una realidad en México.

### 9.4 RAZONES PARA SELECCIONAR EL MUNICIPIO DE TOLUCA PARA EL ESTUDIO DE CASO DE MÉXICO

Las ciudades consideradas para el estudio de caso de México fueron:

1. Ciudad de México
2. Monterrey y su área metropolitana
3. Toluca

Las razones para la selección de Toluca para este estudio fueron:

1. Es una ciudad de tamaño mediano, lo cual es más representativo de ciudades en América Latina; y en oposición a la Ciudad de México y Monterrey, que son grandes ciudades.
2. Es una ciudad industrial con empresas que pueden contribuir materia prima de alto valor calorífico a la planta WTE y, también, pueden ser potenciales compradores del vapor de baja presión producido por la instalación.
3. Toluca es la capital del Estado de México, el estado con mayor producción de RSU en el país (Figura 48).

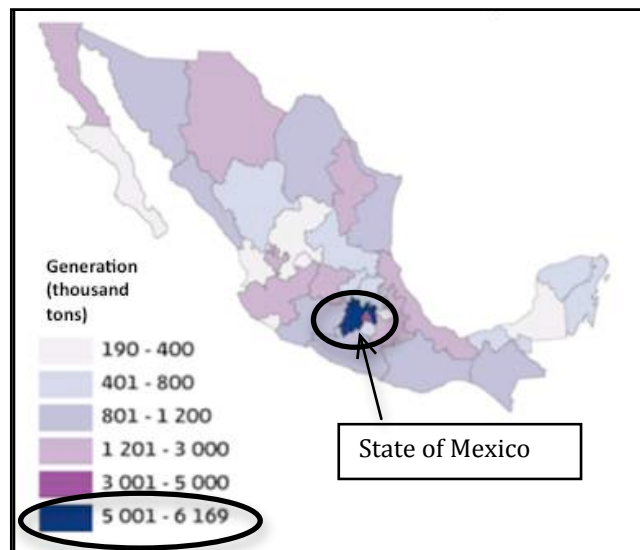


FIGURA 48 DISTRIBUCIÓN DE GENERACIÓN DE RSU EN MÉXICO (2008) (EEC)

## 9.5 INFORMACIÓN GENERAL DEL TOLUCA

---

Toluca tiene una población de 0,82 millones de habitantes y es la capital del Estado de México, el estado más poblado del país (14 millones). Se encuentra en la parte central del Estado de México, aproximadamente 72 kilómetros al este de la Ciudad de México (Figura 49). Debido a su alta elevación (2,6 km sobre el nivel del mar), la temperatura media anual de Toluca es de aproximadamente 12 °C.

Toluca está dividido en 24 delegaciones. Debido a su proximidad a la Ciudad de México, Toluca es a la vez cosmopolita e industrial. Algunas de las industrias más importantes de México se pueden



encontrar aquí, tales como textiles, automóviles, bebidas y productos farmacéuticos.

FIGURA 49 UBICACIONES GEOGRÁFICAS DE TOLUCA Y CIUDAD DE MÉXICO (EEC)

## 9.6 GESTIÓN DE RESIDUOS EN TOLUCA

---

De acuerdo con el Código de Biodiversidad del Estado de México (Apéndice 1 - Estudio de Caso de México), la gestión de residuos sólidos incluye las siguientes etapas:

1. Barrido de las zonas comunes, calles, caminos y cualquier otro tipo de espacio público.
2. Recogida y transporte de RSU a estaciones de transferencia de residuos y/o vertederos.
3. Almacenamiento temporal de los RSU en plantas de selección para distribuir los materiales a compostaje, reutilización, reciclaje, tratamiento térmico o cualquier otro tratamiento.
4. Disposición final en rellenos sanitarios o vertederos controlados.

La Dirección General de Servicios Públicos y Medio Ambiente del Municipio de Toluca ha informado que se recoge y transporta 510 toneladas/día, a un costo de US\$ 39/tonelada de DSM. El coste de eliminación reportado en el vertedero de San Antonio la Isla es US\$ 12,7/tonelada.

La generación per cápita de los RSU en Toluca se ha triplicado, pasando de 0,11 a 0,36 toneladas per cápita en los últimos cincuenta años y ascendió a 295.000 toneladas en 2009. La composición de los RSU en 2009 se muestra en la Figura 50.

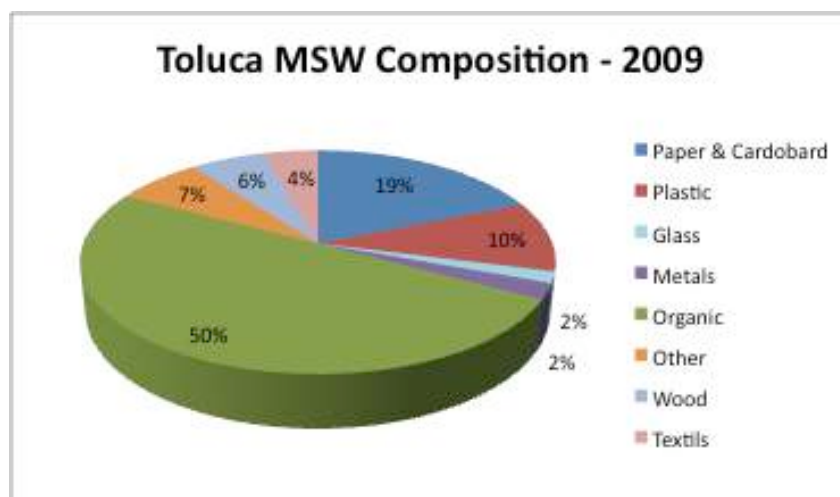


FIGURA 50 COMPOSICIÓN DE RSU EN TOLUCA EN 2009<sup>59</sup>. (EEC)

El poder calorífico inferior (PCI) para el RSU de Toluca se estima en 10,4 MJ/kg (Tabla 32). Esto está cerca del centro de la gama de valores caloríficos de plantas WTE que operan en Europa y América del Norte (7 MJ a 14 MJ/kg).

TABLA 32 COMPOSICIÓN DE LOS RSU DE TOLUCA (2010) Y PODER CALORÍFICO

Material	Porcentaje en RSU	MJ/kg de material (Manual Tchobanoglous)	Contribución al valor calorífico de los RSU (MJ/kg de RSU)
Restos de comida	50%	4,6	2,3
Papel y cartón	19%	15,6	3
Madera	6%	15,4	0,9
Plástico	10%	32,4	3,2
Textiles	4%	18,4	0,7
Vidrio	2%	0	0
Metales	2%	0	0
Otro	7%	4	0,3

Total	100%		10,4
-------	------	--	------

Para el año 2015, se espera que la producción de RSU aumente a 0,45 toneladas por habitante y tenga un ligero aumento en el valor calorífico. La Figura 51 y la Figura 52 muestran el crecimiento proyectado y la composición de los RSU para 2015.

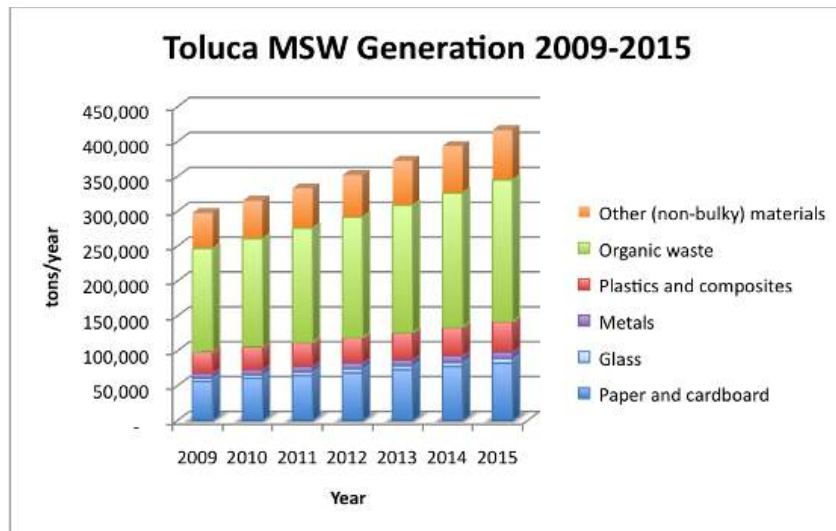


FIGURA 51 PROYECCIÓN DE GENERACIÓN DE RSU EN TOLUCA: 2009 - 2015 (EEC)

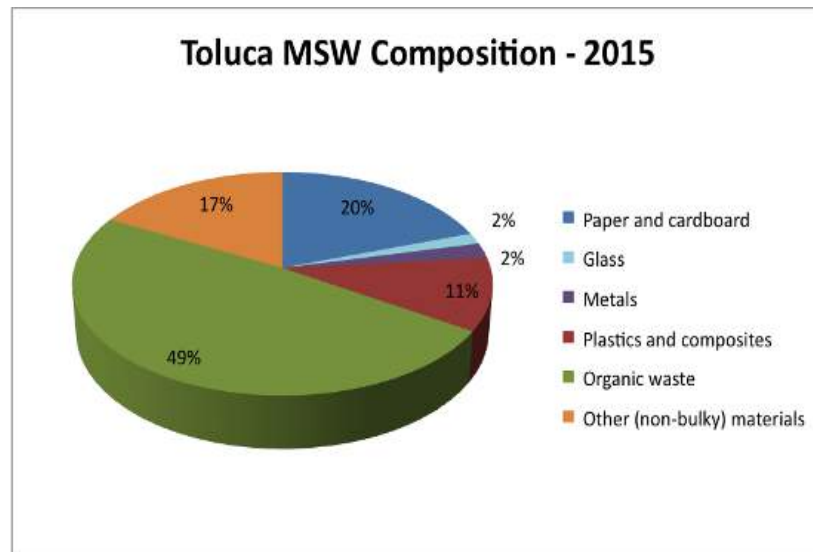


FIGURA 52 PROYECCIÓN DE LA COMPOSICIÓN DE LOS RSU EN TOLUCA EN 2015 (EEC)

## 9.7 DISPOSICIÓN ACTUAL DE LOS RSU EN TOLUCA

---

### **Recolección**

Se estima que 186.000 toneladas<sup>60</sup> de RSU se recogen anualmente en Toluca. Esto representa sólo el 63% del total de RSM generados en Toluca; el resto se desecha en vertederos no regulados.

El servicio de recogida se proporciona a través de la Dirección de Residuos Sólidos a 9 delegaciones. Las otras 15 delegaciones se sirven desde el año 2004 por la empresa privada "Servicio de Transporte SA de C.V.". Los 75 camiones municipales siguen 193 rutas, 148 en zonas urbanas y suburbanas, y 45 en zonas rurales. A pesar de que el Código de la Biodiversidad 2007 establece que los ciudadanos en el Estado de México deben separar sus residuos en flujos orgánicos e inorgánicos, los residuos no están todavía separados en la fuente. El servicio de recogida se efectúa diariamente a las 7:00 de la mañana y continúa hasta que todas las rutas asignadas están cubiertas. No hay estaciones de transferencia de residuos (Waste Transfer Stations, (WTS)) en Toluca. Todos los residuos recogidos se transportan a los sitios de disposición final cuando se haya completado la ruta de recolección, o el camión se llene.

### **Reciclaje**

Al igual que en el resto de México, la recolección informal juega un papel importante en el reciclaje en Toluca y asciende a alrededor del 8% de los residuos sólidos urbanos generados. Es muy común ver a gente que va de casa en casa ofreciendo comprar o tirar todo tipo de papel, cartón, metal y otros materiales. Además, con el fin de promover el reciclaje de los ciudadanos, las autoridades municipales de Toluca han creado doce "centros de recogida" ubicados en diferentes tiendas de conveniencia y barrios que aceptan papel, vidrio, plástico, metal, aluminio, baterías, madera, etc. Por cada kilogramo de material reciclado, los ciudadanos reciben a cambio cupones llamados "Ecos". Los Ecos tienen un valor monetario y se pueden utilizar para la compra de algunos productos básicos como el arroz, frijoles, detergentes, etc.

Además de este programa, la Dirección del Medio Ambiente de Toluca anima a las escuelas para crear centros de acopio. Dieciséis escuelas están participando en este proyecto y reciben certificados que pueden utilizarse para adquirir material educativo o mejorar las instalaciones escolares. Una parte importante en el funcionamiento de estos centros es la creación de un "Consejo de Vigilancia" para garantizar la transparencia en el uso de los ingresos. Un periódico local, "Poder Edomex", informó en febrero de 2011 que durante el año 2010, estos centros recogieron 300 toneladas<sup>61</sup> de materiales reciclables como el aluminio, cartón, papel, vidrio y PET.

### **Compostaje**

Aunque no existen actividades municipales oficiales de compostaje en la ciudad de Toluca, hay algunas plantas de compostaje, como la que está en el vertedero de San Antonio la Isla que sirve a Toluca. Durante una visita del equipo del proyecto, el responsable de este vertedero indicó que los desechos verdes ("Residuos de patio") son triturados y compostados aeróbicamente. Aproximadamente 2 toneladas de residuos por día se procesan aquí, generando alrededor de 500 kg de un producto de compost que se utiliza para el acondicionamiento del suelo.



Durante una visita al segundo relleno sanitario que sirve a Toluca, Zinacantepec, se indicó que habían tratado hacer compost de RSU mixtos pero no fue posible producir un producto de compost utilizable a partir de residuos domésticos mezclados.

### **Depósito en vertederos**

Los RSU recolectados por el municipio están depositados en dos rellenos sanitarios. Casi la mitad está dispuesta en el relleno sanitario de San Antonio la Isla (SALI) que se encuentra a unos 17 kilómetros del centro de Toluca y sirve a la parte norte de la ciudad; la otra mitad de los RSM, recopilada en la parte sur de la ciudad, está dispuesta en el relleno sanitario Zinacantepec, a 15 kilómetros de distancia del centro (Figura 53). Ambos de estos vertederos recolectan y queman parte del gas de vertedero. En cuanto a las tarifas aplicadas, el gerente general de SALI informó que el municipio Toluca paga una tasa media de alrededor de US\$ 13 por tonelada. La Figura 53 muestra la ubicación de otros vertederos en el área de Toluca.

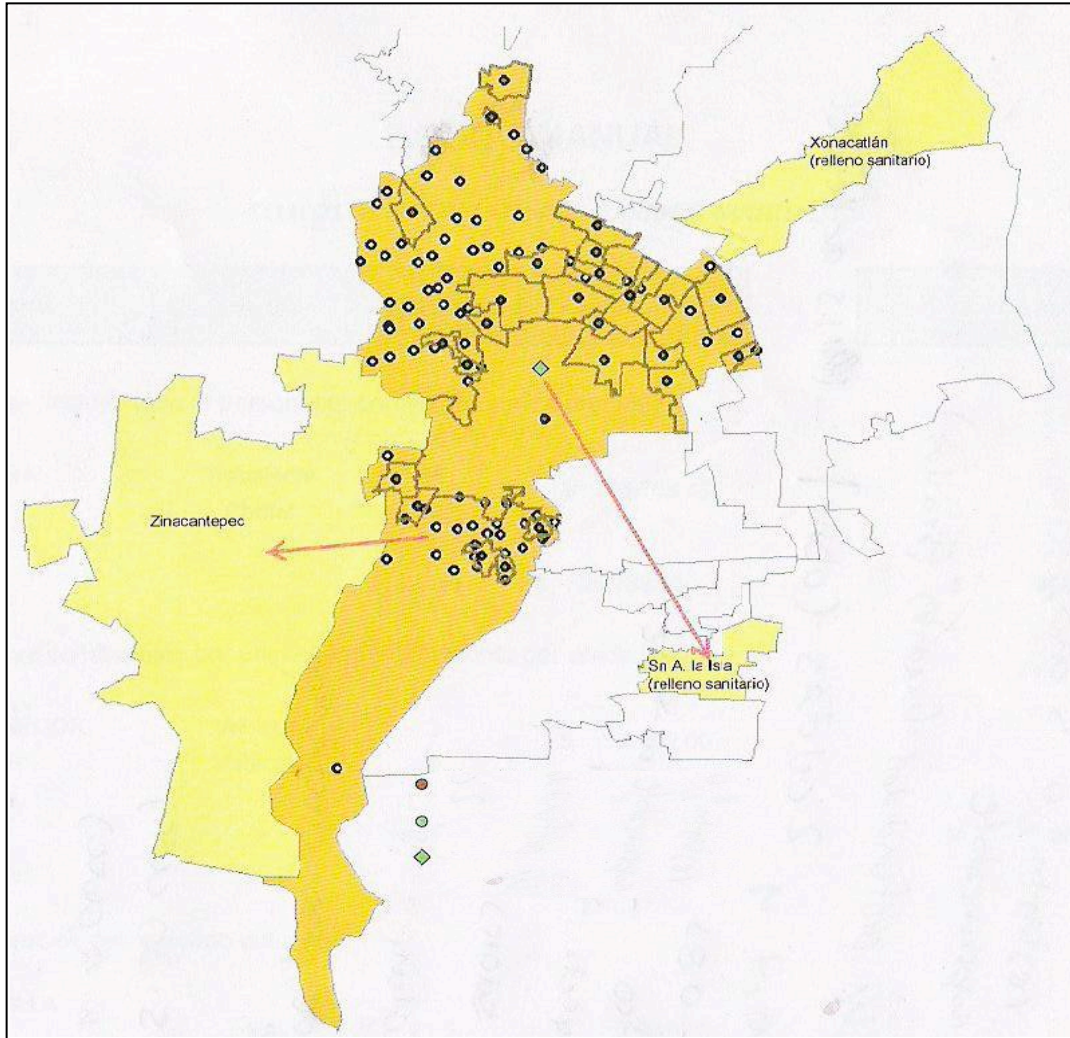


FIGURA 53 LOCALIZACIÓN DE LOS DOS RELLENOS SANITARIOS DE TOLUCA Y VERTEDEROS NO REGULADOS<sup>59</sup> (EEC)

TABLA 33 DATOS DE FUNCIONAMIENTO DE DOS RELLENOS SANITARIOS QUE SIRVEN A TOLUCA (NOVIEMBRE DE 2010)

	<b>San Antonio la Isla</b>	<b>Zinacantepec</b>
Distancia del centro de Toluca (km)	17	15
Área total del vertedero (hectáreas)	10,5	8,5
Año inicio	2007	2007
Promedio de RSU recibido (toneladas/día)	850	600
Capacidad total (millones de toneladas)	2,29	1,48
Toneladas/m <sup>2</sup> a plena capacidad	21,7	17,4
Vida útil (años)	13	8
Capacidad restante (millones de toneladas)	1,78	0,88

## 9.8 CAPACIDAD PROPUESTA Y POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA

El tamaño de la planta WTE seleccionada para el caso de Toluca es de una sola línea de capacidad de 20 toneladas/hora, es decir, 20 toneladas x 8.000 horas de funcionamiento al año = 160.000 toneladas por año. Como se mencionó anteriormente, la actual generación de RSU en Toluca es de aproximadamente 300.000 toneladas por año y se prevé que aumente a 400.000 toneladas en 2015. La idea es comenzar con una planta de costo relativamente bajo y también dejar espacio para un mayor reciclaje. Sobre la base de la experiencia que se puede obtener a partir de esta planta de una línea, una segunda línea se puede añadir en el futuro, lo que duplica la capacidad a 320.000 toneladas por año.

Como se muestra anteriormente, el valor calorífico de los DSM de Toluca se estima en 10 MJ/kg. Para tal valor calorífico, y una capacidad de 160.000 toneladas/año, la producción neta de electricidad se estima en 0,6 MWh/tonelada de RSU, es decir, 96.000 MWh al año y 12 MW de carga básica de electricidad a la red. Dado que la familia promedio mexicana consume 1.660 kWh/año, la planta WTE de Toluca proporcionaría suficiente electricidad para unos 60.000 hogares.

## 9.9 SITIO SELECCIONADO PARA LA PLANTA DE WTE

El sitio más adecuado para la WTE de Toluca está al lado del relleno sanitario "San Antonio la Isla", uno de los dos vertederos que actualmente sirven a Toluca (Figura 54).

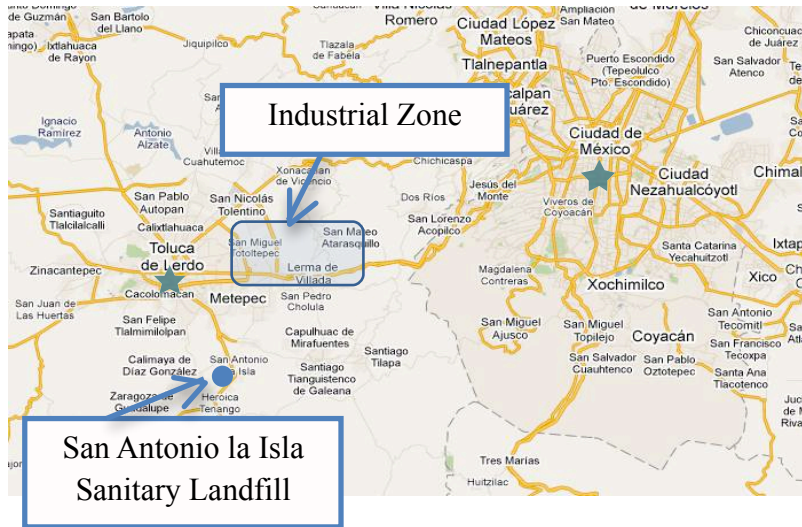


FIGURA 54 MAPA DE TOLUCA MOSTRANDO SITIO POTENCIAL PARA LA PLANTA WTE DE TOLUCA (EEC)

Se estima que la instalación WTE ocuparía aproximadamente cuatro hectáreas del terreno de San Antonio la Isla (véase la Sección 5.5 de la Guía). Esta estimación incluye un Centro de Recuperación de Materiales y un Centro de Visitantes que ilustraría los distintos métodos de gestión de residuos, incluido el funcionamiento de la WTE. Sin embargo, si se requiere tierra adicional, y no está disponible dentro de la propiedad de San Antonio la Isla, podría ser comprada en los alrededores (Figura 55).

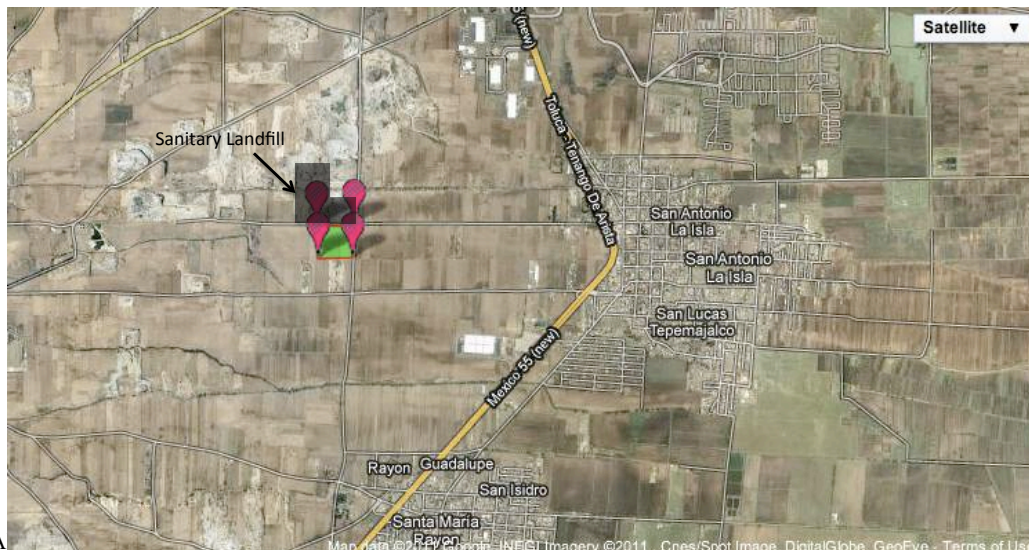


FIGURA 55 ÁREA DE SAN ANTONIO LA ISLA QUE MUESTRA LA TIERRA ADICIONAL QUE RODEA AL RELLENO SANITARIO (EEC)

### 9.10 LÍMITE DE LAS EMISIONES PROYECTADAS

Las normas de emisión para las instalaciones de incineración en México se publican en la NOM-098-SEMARNAT-2002 (Apéndice 1 - Estudio de Caso de México). Sin embargo, la WTE de Toluca será diseñada para satisfacer los estándares aún más estrictos de la U.E. (Tabla 20). La Tabla 34 compara las normas vigentes en México con los estándares de la U.E. que serán cumplidos por la instalación WTE de Toluca proyectada. A pesar de que los estándares de México requieren un monitoreo continuo de sólo el monóxido de carbono, la WTE propuesta también tendría un seguimiento continuo de todos los gases ácidos y del material particulado.

TABLA 34 NORMAS DE EMISIÓN DE LA NOM-098-SEMARNAT-2002 PARA INSTALACIONES DE INCINERACIÓN EN MÉXICO EN COMPARACIÓN CON NORMAS DE EMISIÓN DE LA U.E. (11% DE O<sub>2</sub>, BASE SECA)

Emisión	Estándar de México (mg/m <sup>3</sup> )	Frecuencia de medición (México)	Estándar de la U.E. (mg/m <sup>3</sup> )
CO	63	Continuo	50
HCl	15	Trimestral	10
NO <sub>x</sub>	300	Semestral	200
SO <sub>2</sub>	80	Semestral	50
Partículas	50	Semestral	10
Cadmio	0,07	Semestral	0,05
Titanio	0,7	Semestral	
Selenio			
Cobalto			
Níquel			
Manganeso			
Arsénico			0,5
Plomo	Semestral		
Cromo			
Cobre			
Zinc			
Mercurio	0,07	Semestral	0,05

Dioxinas y furanos (EQT; ng/m <sup>3</sup> )	0,2	Anual	0,1
--	-----	-------	-----

### 9.11 PROYECCIÓN DE COSTOS DE LA PLANTA WTE

Al igual que en los casos de estudio en Chile y Argentina, las estimaciones de los costos que aquí se presentan se basan en instalaciones de reciente construcción en Europa y los EE.UU., donde la planta WTE está provista con un horno de combustión de parrilla de alta calidad, caldera, y un moderno sistema de control de la contaminación atmosférica.

Las estimaciones preliminares presentadas en esta sección no tienen en cuenta las condiciones locales y están sujetas a muchos factores, como el precio del acero. Por lo tanto, se consideran dentro de una precisión de más o menos 20%.

#### Costo de capital:

Como se ha mencionado antes, la instalación necesitará aproximadamente 4 hectáreas de terreno (40.000m<sup>2</sup>). El costo de la tierra alrededor del relleno sanitario "San Antonio la Isla" es de aproximadamente US\$ 22 por m<sup>2</sup>. Esto se determinó después de hacer algunas investigaciones en Internet de los precios de la tierra sobre 2 hectáreas en esa zona.

Por lo tanto, el costo total es de:

$$22,41 \text{ US\$/m}^2 \times 40.000 \text{ m}^2 = \text{US\$ } 900.000.$$

Todos los artículos en el costo de capital se muestran en la Tabla 35.

TABLA 35 ESTIMACIÓN DE COSTO DE CAPITAL

Número de líneas	1
Preparación del sitio, acceso, paisajismo (millones de US\$)	6
Edificios, chimenea (millones de US\$)	33
Parrilla, caldera, suministro de aire, manejo de cenizas, sistemas eléctricos y mecánicos (millones de US\$)	38
generador de turbina (millones de US\$)	16

sistema de control de la contaminación del aire (millones de US\$)	10
Contingencia (millones de US\$)	16
Terreno	1
<b>Estimación del costo total de capital (millones de US\$)</b>	<b>120</b>
<b>Costo de capital estimado (US\$/tonelada anual de capacidad)</b>	<b>750</b>

#### Costos de operacion:

Los costos de operación, asumiendo un personal de 40 personas y la combinación de cenizas de fondo y cenizas volantes para su uso como cubierta diaria en el relleno sanitario San Antonio la Isla se muestran en la Tabla 36.

TABLA 36 COSTOS DE OPERACIÓN

Número de líneas	2
Eliminación de cenizas (millones de US\$, US\$ 3,75/tonelada)	0,6
Productos químicos (millones de US\$, US\$ 4/ton)	0,64
Depuración de gases (millones de US\$, US\$ 8/ton)	1,28
Mantenimiento (millones de US\$, US\$ 21,1/ton)	3,38
Varios (millones de US\$, US\$ 2/tonelada)	0,32
Personal, empleados (millones de US\$)	0,98
Subtotal (millones de US\$)	7,19
Contingencia (millones de US\$; 5%)	0,36
Subtotal	7,55
Seguros (millones de US\$; 0,6%)	0,05
Costo de operación estimado (millones de US\$)	7,6
Costo de operación estimado (US\$/tonelada de capacidad)	47,5

Es importante mencionar que los salarios en México son más bajos que en los Estados Unidos y Europa; por ejemplo, "La Alianza Global Jus Semper" publicó en su informe "Los gráficos de las brechas salariales en México"<sup>62</sup> que en 2008, los trabajadores de la industria de fabricación en México ganaron un 30% menos que los trabajadores análogos en Estados Unidos, lo que significa que los salarios pueden ser sobreestimados en este estudio de caso. Sin embargo, algunos otros costos pueden ser subestimados, por ejemplo, algunos materiales necesarios para el mantenimiento pueden no estar disponibles en México y tendrán que ser importados. Por lo tanto, como se mencionó anteriormente, estas estimaciones pueden cambiar una vez que se tienen en cuenta las condiciones locales.

---

## 9.12 INGRESOS PROYECTADOS DE LA PLANTA WTE

---

En esta sección se presentarán los ingresos de la planta, incluyendo ingresos por venta de electricidad, tarifa aplicada, venta de metales, y créditos de carbono.

### **Tarifas aplicadas:**

Para este análisis, se asumió que la tarifa pagada a la planta de WTE sería la misma que la tarifa actual para el vertido en Toluca. Durante la visita al relleno sanitario San Antonio la Isla, su director, Ing. Jorge Mejía, señaló que la tarifa media aplicada es de MXN\$ 150 por tonelada, lo que corresponde a alrededor de US\$ 13 por tonelada de DSM<sup>ii</sup>. Por lo tanto, los ingresos anuales de las tarifas aplicadas serán de aproximadamente US\$ 2 millones.

### **Venta de Electricidad:**

En diciembre de 2004, el Diario Oficial de la Federación modificó la Ley de Impuesto sobre la Renta (Sección XII del Artículo 40, Apéndice 1 del estudio de caso de México); Ahora los contribuyentes que invierten en maquinaria y equipo para la generación de energía a partir de fuentes renovables pueden deducir el 100% de la inversión en un periodo. La ley estipula que el equipo adquirido debe permanecer en funcionamiento durante un periodo mínimo de cinco años.

El Banco Mundial, el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM) y el Gobierno de México también ha creado una alianza estratégica para apoyar la generación de energía renovable por medio de una subvención de dos fases de US\$ 70 millones que tiene como objetivo de compensar las diferencias que existen entre fuentes de energía eléctrica renovables y convencionales. Este Fondo puede proporcionar el pago de incentivos que van desde US\$ 7,5 a US\$ 15 por MWh de energía renovable sobre el precio que la Empresa Nacional de Electricidad paga a los generadores. Sin embargo, este apoyo sólo se concede por un número limitado de años<sup>63</sup>.

---

<sup>ii</sup> 1 USD = 11.78 MXN



### Ingresos de electricidad:

De acuerdo con la ley mexicana (véase el Apéndice 1 - Estudio de Caso de México), la electricidad producida por los productores independientes, como una futura planta de WTE, sólo puede venderse a la Comisión Federal de Electricidad (CFE), mientras que la energía térmica producida por la planta WTE no puede ser vendida a terceros. Sin embargo, puesto que la ley permite el uso de la electricidad producida en la propiedad de uno, los productores independientes de energía (Independent Power Producer, (IPP)) en México pueden superar este problema mediante la venta de su electricidad a través de acuerdos de compra de energía (PPA) mediante el "alquiler" de la propiedad donde se encuentra la planta a terceros. Bajo este esquema, los usuarios de esta electricidad pagan menos de lo que normalmente tendrían que pagar a la CFE, mientras que el IPP vende la electricidad a un precio más alto que lo que pagaría la CFE.

Los pagos realizados por la CFE a los productores independientes de energía (IPP) consisten en tres categorías principales:

1. Cargos por capacidad fija, destinados a cubrir la inversión de capital.
2. Cargos fijos y variables de operación y mantenimiento
3. Costo de combustible, que es el principal elemento de costo total de generación y es muy variable porque el gas natural se paga a precio de mercado.

El IPP entrega su energía eléctrica en el punto más cercano de interconexión a la red. No hay cargos para el IPP por la transmisión de electricidad y las tarifas de pago son las mismas para todos los productores, independientemente de la fuente de energía (es decir, no existen incentivos para las energías renovables). Los pagos de la CFE para la electricidad, llamados "costes de generación" en el período 2007-2010 se muestran en la Tabla 37.

TABLA 37 COSTOS DE GENERACIÓN DE LA CFE

Año	Cargos por capacidad fija	Cargos de operación y mantenimiento	Subtotal	Combustibles	Total
	US\$/kWh				
2007	0,014	0,007	0,021	0,049	0,07
2008	0,012	0,006	0,018	0,052	0,07
2009	0,014	0,007	0,02	0,031	0,051
2010	0,014	0,007	0,021	0,035	0,055
Promedio 2007-2010	0,013	0,007	0,02	0,042	0,062

La planta WTE de Toluca, con una capacidad de 160.000 TPA (Toneladas Por Año) y una generación de electricidad neta de 0,6 MWh/tonelada, proporcionaría una carga base de 12 MW a la red y una salida de electricidad esperada de 96 GWh al año. En consecuencia, suponiendo un pago de US\$ 62/MWh entregados, los ingresos procedentes de la venta de electricidad se estiman en US\$ 5,95 millones o US\$ 37,2 por tonelada de DSM.

Por otra parte, si se aplicaran los incentivos de reducción de carbono mencionados anteriormente, el precio de la electricidad sería entre US\$ 69,5/MWh (\$62/MWh + \$7,5/MWh) y US\$ 77/MWh (\$62/MWh + \$15/MWh). En este caso, los ingresos procedentes de la venta de electricidad serían entre US\$ 6,67 millones y US\$ 7,39 millones, es decir, US\$ 41,7 - US\$ 46,2 por tonelada de DSM.

#### **Créditos de carbon:**

Como se discutió en la Guía, la reducción proyectada de las emisiones de gases de efecto invernadero debido a la operación de la planta WTE sería de 0,5 toneladas de dióxido de carbono, en comparación con el depósito en rellenos sanitarios. Al igual que en el estudio de caso de Chile se utilizó el valor conservador de US\$ 5 por tonelada de RSU en combustión, es decir, US\$ 0,8 millones anuales para Toluca.

#### **Venta de metales se recuperó de las cenizas de fondo:**

Los RSU de Toluca contienen 2% de metales (Tabla 32) y, al igual que en los otros dos estudios de caso, se supone que se va a recuperar el 50% de este metal. De acuerdo con un estudio llevado a cabo por el Gobierno del Estado de México y la Agencia de Cooperación Técnica Alemana (GTZ), el precio promedio del metal de chatarra en el valle de Toluca es de US\$ 93 por tonelada. Por lo tanto, los ingresos totales de los metales recuperados por año será de US\$ 148.800, o US\$ 0,93 por tonelada.

### 9.13 ANÁLISIS FINANCIERO DE WTE PARA TOLUCA

De manera análoga a los otros estudios de casos, el enfoque utilizado para el análisis financiero fue calcular el valor actual neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) de los flujos de caja. Esto significa que los costes de financiación específicos no fueron tomados en cuenta y, por lo tanto, es probable que tanto el VAN y la TIR disminuyan una vez que se incluyan estos costos. Además, las variaciones en los flujos de caja debido a la inflación u otros factores no fueron incluidos y podrían tener un impacto importante en el análisis.

Los escenarios considerados para la evaluación financiera son los siguientes:

1. Escenario Base: La electricidad se vende en US\$ 62/MWh (no hay ningún incentivo de energía renovable).
2. Escenario 2: Hay un incentivo de energía renovable, y la electricidad se vendería en US\$ 73,25/MWh (promedio entre US\$ 69,5/MWh y US\$ 77/MWh).
3. Escenario 3: El proyecto obtiene una subvención equivalente al 50% de la inversión de capital de un banco de desarrollo (véase el Apéndice 2 para Estudio de caso de México), y la electricidad se vende a US\$ 62/MWh.

La tarifa asumida en ambos casos es la actual tarifa aplicada al relleno San Antonio la Isla (US\$ 12,75/tonelada).

El periodo de recuperación utilizado fue de 23 años, suponiendo aproximadamente 3 años de construcción y 20 de operación.

Las tasas de descuento utilizadas para el cálculo del VAN son 5%, 10% y 15%. La razón para seleccionar 5% es que es el costo estimado de capital del gobierno federal de México en US\$, ya que a partir del 18 de octubre de 2011 los bonos soberanos de México de 23 años en US\$ (UMS 34) se negociaban a 5%<sup>64</sup>. La razón de utilizar también las tasas de descuento de 10% y 15% es que si iban a existir inversores privados en la planta de WTE, entonces el costo de capital sería más alto que el costo de capital del gobierno de México, y por lo tanto el 10% y 15% se utiliza para ilustrar este escenario.

La Tabla 38 VAN a tasas de descuento del 5%, 10%, 15%, y la TIR para los tres escenarios muestra el VAN para las tres tasas de descuento y también la TIR para los tres escenarios.

TABLA 38 VAN A TASAS DE DESCUENTO DEL 5%, 10%, 15%, Y LA TIR PARA LOS TRES ESCENARIOS

Escenario	VAN al 5% (millones de US\$)	VAN al 10% (millones de US\$)	VAN al 15% (millones de US\$)	TIR (tasa anual)
Base	-94	-90	-85	-10,80%
Escenario 1	-83	-83	-80	-7%
Escenario 2	-40	-41	-40	-6,30%

La TIR para los tres escenarios resultó negativa, lo que indica que el proyecto no es viable para cualquier costo de capital a la tarifa actual. Por otra parte, ya que el proyecto está tan lejos del punto

de equilibrio, los resultados obtenidos en el cálculo del VAN para estos escenarios no tienen sentido.

Las tarifas requeridas para que la planta alcance el punto de equilibrio operativo (es decir VAN = 0), con tasas de descuento del 5%, 10%, 15% en los tres escenarios se muestran en la Tabla 39.

TABLA 39 TARIFA APLICADA REQUERIDA PARA TASAS DE DESCUENTO DEL 5%, 10%, 15%

Escenario	Tarifa aplicada (US\$/ton)		
	Tasa de descuento del 5%	Tasa de descuento del 10%	Tasa de descuento del 15%
Base	69	103	145
Escenario 1	62	97	139
Escenario 2	36	53	74

Los resultados muestran que incluso con una subvención del 50% (Escenario 3), la tarifa de las instalaciones WTE tendrían que ser al menos el doble de la tarifa que actualmente se paga en el relleno sanitario San Antonio la Isla. Esto se puede atribuir a la falta de políticas ambientales en México que apoyan la generación de energía a partir de fuentes renovables y a las tarifas muy bajas que se cobran actualmente en México. Por otra parte, el aumento de las tarifas aplicadas parece poco probable ya que el gobierno municipal tendría que pagar más del doble de lo que paga actualmente para su eliminación.

## 9.14 PARTES INTERESADAS

Con la introducción de una nueva tecnología, tal como una planta de WTE en México, un diverso tipo de partes interesadas jugarán un papel vital apoyando o rechazando el proyecto. Sus intereses pueden variar desde niveles como económico, social, ambiental y legal. Es importante identificar las principales partes interesadas que necesitan ser asesoradas y consultadas durante toda la duración de un proyecto como una instalación de una planta WTE en México, sobre todo porque existe muy poca información y muchos paradigmas se han creado con respecto a estas tecnologías.

La identificación de las partes interesadas permitirá a los administradores de proyectos desarrollar planes de acción y también mecanismos para mantener un contacto cercano con ellos y compartir toda la información que pueda ser útil o interesante para ellos. La Tabla 40 en el Apéndice 3 al estudio de caso México lista los más importantes actores que podrían desempeñar un papel en la discusión, planificación y desarrollo de una planta de WTE en el municipio de Toluca, sus intereses e influencia.

Durante la visita al relleno sanitario de San Antonio la Isla y la reunión con los diferentes grupos de interés en la ciudad de Toluca (universidades, funcionarios de gobierno y director del vertedero), el equipo encontró una respuesta muy positiva de todos los contactos, señalando que tenían un cambio en opiniones con respecto a la combustión, la generación de energía y la contaminación atmosférica generada por ésta. Adicional a esto, el administrador del vertedero comentó al equipo del proyecto

que ya están considerando ofertas para la captura y uso del biogás del vertedero para producir electricidad. Los participantes en estos encuentros sugieren que los principales obstáculos para el desarrollo de esta tecnología en México es la financiación necesaria, el marco legal para la generación de energía renovable, el hecho de que la electricidad es proporcionada por sólo una empresa (CFE - y por lo tanto la electricidad de los generadores privados sólo puede ser vendida a la CFE), y la oposición pública debido a la falta de información en cuanto a los beneficios de WTE.

#### Los mecanismos para mantener un contacto cercano con las partes interesadas

La amplia gama de intereses y participación de las partes interesadas puede conducir a la creación de diferentes mecanismos con el fin de mantener un estrecho contacto con ellos. Es muy importante contar con una política de información abierta y promover la participación de las partes interesadas en este proyecto. Si se involucran, es más probable que tengan una influencia positiva en cualquiera de las etapas del proyecto.

Durante las primeras fases, es crucial mantener un contacto regular con los organismos gubernamentales, comunidades cercanas, empresas privadas relacionadas con el manejo de los RSM, ONGs, y cualquier otra figura interesada en este proyecto a través de reuniones y/o presentaciones. Esto permitirá a las partes interesadas a comprender mejor lo que WTE es, cómo funciona y cómo es beneficioso para la comunidad y el medio ambiente, especialmente cuando se compara con los métodos típicos de disposición de residuos (como vertederos y rellenos sanitarios); en una encuesta realizada en Toluca en el año 2010, se encontró que "la incineración de residuos" es visto como el método de eliminación de desechos/tratamiento más peligroso después de vertederos de residuos<sup>65</sup>. Por lo tanto, es necesario cambiar este paradigma con el fin de recibir el apoyo de las partes interesadas.

Otro canal básico para mantener a los participantes informados es la web, lo que se puede realizar a través de la creación de una página web oficial de la instalación, en el que cualquiera puede encontrar más información sobre la planta, preguntas frecuentes, información general sobre WTE, ejemplos de plantas WTE alrededor el mundo, etc., e incluso una sección para recibir sugerencias y/o comentarios. La página web también puede proporcionar un servicio de noticias donde a través de una membresía las personas pueden recibir periódicamente noticias con más información sobre WTE y de la propia instalación.

## 9.15 CONCLUSIONES AL ESTUDIO DE CASO DE MÉXICO

---

No hay duda de que la conversión de residuos en energía es el único medio probado para sustituir el depósito de residuos en vertederos que quedan después de reciclaje y compostaje. En particular, WTE podría ser más beneficioso en lugares como Toluca, donde se ha reportado que no hay vertederos restantes<sup>66</sup>. En países como México, donde no han existido instalaciones WTE, se recomienda el uso de una tecnología de eficacia probada, como la combustión de parrilla.

Debido a su cercanía a la Ciudad de México, una ciudad de tamaño medio como Toluca es un buen sitio para la instalación de la primera WTE en México. Para este estudio, el lugar elegido para la instalación estaba al lado de uno de los dos rellenos sanitarios donde Toluca dispone sus residuos: San Antonio la Isla. Las razones son que los RSU ya están siendo transportados a esa zona, y también, durante la visita del equipo al relleno sanitario, se mencionó que las personas a cargo en el vertedero ya están interesadas en la instalación de tecnología que recupera energía a partir de residuos. Sin embargo, otras posibles ubicaciones pueden ser consideradas, como la parte norte de la ciudad, ya que en este lugar la apariencia estética y arquitectura de la planta también podría ser utilizada como una atracción turística y como motivación para el resto de las ciudades en México.

Sin embargo, incluso con las numerosas ventajas, beneficios ambientales y la necesidad de reemplazar los rellenos sanitarios en México, el análisis financiero ha demostrado que la tarifa de las instalaciones WTE tendría que ser aumentada sustancialmente para que el proyecto sea viable, lo que implica que WTE no es competitivo con el vertido en México. Esto se debe principalmente a la falta de estrategias de políticas públicas y económicas que alineen el marco legal, por ejemplo en los precios de electricidad, con los factores económicos de electricidad generada a partir de fuentes renovables.

Por otra parte, el único escenario realista bajo el cual se podría construir la planta es si es de propiedad pública y el gobierno la construye como un escaparate para avanzar a la nación en la gestión de residuos, a pesar del hecho de que en el corto plazo será más costoso que el depósito en vertederos sanitarios.

Por último, sobre la base de la situación actual del manejo de los RSM en Toluca, donde el reciclaje informal y formal ha sido estimado en menos del 10%, es muy importante planificar para aumentar la tasa de reciclaje actual por medio de recolección de materiales reciclables separados en el origen, como se discute en la Guía (Sección 5.14), en paralelo con la implementación de plantas WTE.

# APÉNDICES DEL ESTUDIO DE CASO DE MÉXICO

---

## APÉNDICE 1: MARCO LEGAL

---

### 1.1 LEYES Y REGLAMENTOS RELATIVOS A LA GESTIÓN DE RESIDUOS

---

La gestión de residuos (Waste Management, (WM)) en México está regulada por leyes establecidas en la Constitución de los Estados Unidos Mexicanos: la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, las Normas Oficiales Mexicanas y la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos.

La Constitución de México (Artículo 115) especifica que los municipios son responsables del barrido, recolección, transporte, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos. Por la presente, está claro que cada municipio tiene la libertad de establecer su propio sistema de gestión de residuos. Sin embargo, el Artículo 73 establece que el Congreso de la Unión tiene la capacidad de emitir leyes que ayuden a los gobiernos federal, estatales y municipales a gestionar eficazmente todos sus asuntos de protección ambiental. Además, sobre la base de este artículo, los legisladores crearon la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, que dio lugar a la formulación de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) para controlar la ubicación, diseño, construcción y operación de los diferentes vertederos utilizados para la disposición final de RSU.

En concreto, las NOM interesadas en la gestión de los residuos sólidos municipales a nivel federal son:

NOM-083-SEMARNAT-2003: Regula la disposición final de los RSU, indicando que todo lo que concierne a estos sitios de disposición final (ubicación, construcción, operación, cierre, control y obras complementarias) debe llevarse a cabo de acuerdo con las directrices técnicas que garantizan protección ambiental y minimizan los efectos de contaminación relacionados con el manejo inapropiado de los residuos.

NOM-098-SEMARNAT-2002: Esta NOM hace referencia a la incineración de residuos, indicando que la incineración de cualquier tipo, incluyendo residuos peligrosos, tiene efectos tóxicos que contaminan el medio ambiente, dañando los ecosistemas y la salud humana, por lo que acciones preventivas deben ser adoptadas con el fin de lograr un nivel aceptable de emisiones. Acerca de las acciones preventivas, también establece que éstas tienen que considerar el control integral de las emisiones a la atmósfera, así como la gestión de las cenizas.

La Ley General de Salud favorece la prevención y el control de los efectos tóxicos de los factores ambientales en la salud pública; sin embargo, no hay un solo artículo que hace referencia a cualquier tipo específico de residuos y su efecto en la salud pública.

El 8 de octubre de 2003, la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) se publicó en el Diario Oficial de la Federación, llenando muchas de las brechas de regulación en materia de gestión de residuos sólidos urbanos (Municipal Solid Waste Management, (MSWM)). Esta ley considera los residuos desde dos puntos de vista; En primer lugar, como un

contaminante potencial que debe evitarse, reducirse y gestionarse de manera ambientalmente adecuada, incluyendo un pago por esto; y en segundo lugar, como material portador de un valor, que podría ser empleado a través de la reutilización, el reciclado o mediante la recuperación de la energía contenida en ella, siempre y cuando esto se realice de una manera ambientalmente adecuada.

Junto con las leyes y regulaciones federales sobre la gestión de residuos, cada estado y municipio tiene su propio marco regulatorio. En el Estado de México éstos son: Código de Biodiversidad del Estado de México, el Programa para la Prevención y Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial del Estado de México, Ley Orgánica Municipal del Estado de México, la Ley de Protección al Ambiente para el Desarrollo Sustentable del Estado de México y las Normas Técnicas Ambientales Estatales. Adicional a estas leyes, Toluca está regulada por el Código Municipal de 2010 (Bando Municipal).

El Código de Biodiversidad del Estado de México ofrece el esquema básico para la planificación y aplicación de programas de gestión de residuos. Con el fin de cumplir con este Código, el Programa para la Prevención y Gestión Integral de Residuos se publicó en abril de 2009. Algunas de las acciones propuestas en este documento son: el apoyo de nuevas tecnologías de tratamiento de residuos y reutilización de residuos que sean viables, económica y socialmente aceptadas, separación en el origen de RSU, recogida selectiva y tratamiento diferenciado. Además, este programa menciona que la SEMARNAT tiene la responsabilidad de coordinar dichas actividades. Las autoridades municipales deben implementar todas estas acciones, programas, estrategias y el sistema de gestión de residuos en sí (Ley Orgánica Municipal, Artículos 31 y 12).

La Ley de Protección al Ambiente para el Desarrollo Sustentable del Estado de México se centra en la promoción de la reutilización y reciclaje, la instalación y funcionamiento de las instalaciones, y animando a los ciudadanos a participar en la planificación, ejecución y evaluación de políticas ambientales.

En cuanto a las Normas Técnicas Ambientales del Estado, las interesadas en la gestión de residuos sólidos son:

NTEA-006-SMA-RS-2006: que establece los requisitos para la producción de enmienda del suelo, o compost, elaborados a partir de residuos orgánicos.

NTEA-010-SMA-RS-2008: que establece los requisitos y especificaciones para la instalación, operación y mantenimiento de la infraestructura para la recolección, transferencia, separación y tratamiento de RSU y de manejo especial.

NTEA-011-SMA-RS-2008: que establece los requisitos para la gestión de residuos resultantes de las actividades de construcción en este estado.

Por último, el Artículo 17 del Código Municipal de Toluca establece que es una obligación de todos los ciudadanos separar los desechos sólidos adecuadamente en orgánicos e inorgánicos. Asimismo, el Artículo 77 clasifica como infracción el incumplimiento de esta obligación. Sin embargo, ninguno de estos dos artículos están realmente en práctica.

Como se mencionó anteriormente, la incineración de cualquier tipo de residuos en México está sujeta a la NOM-098-SEMARNAT-2002, y también a la LGPGIR y el Convenio de Estocolmo.





## 1.2 LEYES Y REGLAMENTOS RELATIVOS A LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD

---

El suministro y generación de electricidad está regulado por la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica (LSPEE). Esta ley prohíbe el libre comercio de energía entre individuos. Sin embargo, hay una disposición para que los individuos generen energía para su propio uso. Por otra parte, los individuos pueden generar energía con el fin de abastecer a la red gestionada por la CFE de conformidad con el productor de energía externa y esquemas de pequeños productores, así como para el mercado de exportación.

En cuanto a la cogeneración, el artículo 104 del Reglamento de la LSPEE, establece que el uso de la cogeneración en una instalación está permitido, siempre y cuando:

- El vapor producido, energía térmica o combustibles producidos sean utilizados por la misma instalación que los produjo.
- Los propietarios de la planta de cogeneración sean copropietarios o socios de la instalación.

Este último punto indica que, en virtud de la legislación actual, una planta WTE en Toluca no puede proporcionar energía térmica a un parque industrial de esta ciudad. Esto es por supuesto contraproducente y puede ser modificado en un futuro próximo.

En noviembre de 2008, la Ley para la Mejora de Utilización de las Energías Eenovables y Financiamiento de la Transición Energética fue publicada. A pesar de que esta ley tiene por objeto regular el uso de las fuentes renovables de energía, su primer artículo excluye explícitamente la generación de electricidad por medio de la combustión u otro tratamiento térmico de residuos. Por supuesto, esto excluye el uso de WTE en México y es totalmente contrario a la legislación en la U.E., EE.UU., China, Japón y algunos otros países.

## APÉNDICE 2 DEL ESTUDIO DE CASO DE MÉXICO: BANCOS DE DESARROLLO

---

Como se explicó anteriormente, México cuenta con bancos de desarrollo que pueden proporcionar financiación y subvenciones para diversos proyectos. En particular, el Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos (Banobras)<sup>67</sup> está a cargo de la promoción y financiación de proyectos y servicios públicos, tales como instalaciones de gestión de residuos. Los servicios de Banobras incluyen: financiación subnacional, financiación de proyectos, estructuración de proyectos de infraestructura, garantías financieras, gestión de la confianza, y asistencia técnica especializada.

Banobras es también el fiduciario del Fondo Nacional de Infraestructura (FONADIN), que es un fondo fiduciario del gobierno mexicano destinado a apoyar el desarrollo de la infraestructura en México en la comunicación, transporte, agua, medio ambiente (incluyendo energía y residuos), y sectores de turismo.

El fondo apoya la planificación, diseño, construcción, y etapas de transferencia en los proyectos de infraestructura con impacto social o económico en donde participa el sector privado.

Algunos de los productos que FONADIN ofrece son:

- **Aportes no recuperables:** El fondo proporciona contribuciones no recuperables a los organismos de la administración pública federal para financiar proyectos de infraestructura sujetos a ciertos criterios de elegibilidad. Entre estos criterios, el proyecto debe tener:
  - Su propia fuente de pago.
  - Participación del sector privado.
  - Estudios de viabilidad que muestren su viabilidad técnica, impacto social, y la justificación para solicitar el apoyo del Fondo.
  - El apoyo del Fondo no debe superar el 50% de la inversión total, salvo que esté justificado.
- **Subvenciones:** Con el objetivo de maximizar inversiones de capital privado en proyectos de infraestructura promovidos por los organismos de la administración pública federal, y con baja rentabilidad económica, pero alto impacto social. Algunos de los criterios de elegibilidad son:
  - El proyecto debe tener su propia fuente de pago.
  - Participación de sector privado con al menos el 25% de la inversión total del proyecto.
  - Mostrar que los flujos de caja proyectados no son atractivos para los inversores privados.
  - Estudio de viabilidad que muestre viabilidad técnica, social y financiera, incluyendo la concesión.
  - El apoyo del Fondo no debe superar el 50% de la inversión total, salvo que esté justificado.
- **Garantías:** El fondo ofrece garantías con el fin de facilitar el acceso a la financiación, por ejemplo, préstamos bancarios, y emisiones de bonos. Las garantías son de hasta el 50% del crédito, préstamo o emisión.
- **Préstamos subordinados:** El fondo asigna préstamos subordinados o convertibles a entidades privadas que reciben concesiones, permisos o contratos que permitan asociaciones público-privadas para proyectos de infraestructura.
- **Capital de Riesgo:** El fondo está autorizado a realizar aportaciones de capital temporales (hasta 49%) para ayudar a proyectos de infraestructura.
- **Estudios:** El fondo proporciona apoyo de financiación de estudios y servicios de consultoría para proyectos de infraestructura.

El apoyo que el FONADIN ofrece no se limita a un solo producto. Por ejemplo, un proyecto en particular se puede financiar con el siguiente esquema:

15% Subvención FONADIN  
25% Capital privado  
20% Préstamo subordinado FONADIN  
40% Deuda garantizada por FONADIN / Banobras

## APÉNDICE 3 DEL ESTUDIO DE CASO DE MÉXICO: LOS POSIBLES INTERESADOS

TABLA 40 PARTES INTERESADAS INVOLUCRADAS EN EL DESARROLLO DE UNA INSTALACIÓN WTE EN TOLUCA, MÉXICO

Parte interesada	Interés de las partes interesadas	Posible influencia de la parte interesada
Ministerio de Medio Ambiente a nivel municipal, estatal y País	<p>El proyecto requiere una evaluación de impacto ambiental</p> <p>Supervisión y control del sistema</p> <p>Establecer políticas ambientales</p> <p>Tratar de alcanzar estándares internacionales de prácticas ambientales</p>	<p>Terminación, retraso o cambio del proyecto</p> <p>Obstáculos administrativos y burocráticos</p>
Ministerio de Salud	<p>Manejo y disposición adecuada de los residuos</p> <p>Emisiones a la atmósfera de la instalación reguladas</p>	Terminación, retraso o cambio del proyecto
Sub ministerio de Gestión de Residuos de los municipios	<p>Administrar del sistema de gestión de residuos</p> <p>Tener una alternativa económicamente competitiva para la eliminación de residuos</p>	<p>Suministrar residuos a la instalación y pago por la eliminación de residuos</p> <p>Negociación de contratos</p> <p>Problemas de gestión de residuos sólidos urbanos</p> <p>Falta de claridad y transparencia en el cálculo de las tarifas de eliminación de residuos</p> <p>Afecta iniciativa de reciclaje</p>
Secretaría de Hacienda y Crédito Público, SHCP	Determina los precios de los servicios públicos como la electricidad	Posibilidad de determinar una tarifa preferencial de energía cuando proceden de una fuente renovable

Ministerio de Energía (SENER)	<p>Proponer y regular los incentivos para la energía limpia</p> <p>Establece las directrices de política general y asegura la coherencia de la política energética nacional.</p>	<p>Regular el precio de la energía</p> <p>Determinar políticas de apoyo a las energías renovables</p>
Comisión Reguladora de Energía, CRE	<p>La regulación del gas natural y la industria eléctrica</p> <p>Aprueba el marco de los contratos para el suministro de energía</p> <p>Proporciona la metodología utilizada para el cálculo de los precios recibidos por los proveedores de energía del sector privado</p>	<p>La regulación del marco para el suministro de energía a la red</p> <p>Apoyo a la creación de una nueva metodología para calcular los precios de los proveedores de energía privados de energía renovable</p>
Comisión Federal de Electricidad, CFE	<p>Proporciona la electricidad</p> <p>Controla la red de transmisión del país</p> <p>Emite permisos para autorizar la generación privada de energía</p> <p>Aprueba los instrumentos de regulación con respecto a la generación de electricidad, y participa en la determinación del suministro de energía eléctrica y las tarifas de venta</p>	<p>Otorga los permisos para utilizar la red</p> <p>Compra de la electricidad generada</p>
Gobierno de Toluca y Estado de México	<p>Beneficios sociales, ambientales y de salud para la comunidad</p> <p>Anima el incentivo a la mejora continua del sistema</p> <p>solución a largo plazo para la eliminación de residuos</p> <p>Toma ventaja de la creación de la primera WTE en México para usar como una atracción turística</p>	<p>Demanda de competencias técnicas y recursos para abordar los problemas de corto y largo plazo</p> <p>Resolver conflictos con varias partes interesadas</p> <p>Incentivos financiero</p> <p>Facilitar la ubicación de la planta</p>

Cartoneros	Cambio en la gestión de los residuos puede afectar o eliminar su fuente de ingresos.	Actividades de cartoneros pueden afectar las propiedades y cantidad de residuos  Cartoneros pueden bloquear o protestar contra la construcción de la instalación
Grupos comunitarios y ciudadanos/vecinos cercanos	Mejor calidad de vida debido a las mejoras ambientales  Proyecto puede dar lugar a oportunidades de trabajo.  Barrio libre de ruido, polvo, tráfico de carga e impacto visual.  Impacto de los precios inmobiliarios en la zona	Terminación, retraso o cambio de proyectos debido a protestas de la comunidad
ONGs ambientales	Reducir el impacto de la gestión de residuos en el medio ambiente	Terminación, retraso o cambio de los proyectos debido a las protestas o apoyo a las ONG si el proyecto tiene un impacto ambiental positivo
Empresas de recolección y transporte	Desean mantener o expandir su negocio	Nuevos requisitos para contenedores de clasificación y vehículos  Contratos para el suministro de residuos procedentes de generadores privados a los que prestan servicios (industrias, restaurantes, etc.)
Rellenos sanitarios	Desea recibir más residuos  Licitaciones concedidas y aplicadas por los servicios municipales	Puede bajar cuota de inflexión debido al aumento de la competencia  Pueden integrar recuperación de gas de vertedero y generación de energía.
Municipios cercanos al área	Tener una alternativa económicamente competitiva para la eliminación de residuos	Suministrar residuos a la instalación y pago por la eliminación de residuos

## REFERENCIAS AL ESTUDIO DE CASO DE MÉXICO

---

- <sup>52</sup> Statistics and Geography National Institute (INEGI). Available from, <http://www.inegi.org.mx>
- <sup>53</sup> CIA – The World Factbook. Available from, <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook>
- <sup>54</sup> Petróleos Mexicanos. Available from, <http://www.pemex.com>
- <sup>55</sup> Organización Panamericana de la Salud / Organización Mundial de la Salud, AMCRESPAC, INE/DGMR. “Análisis Sectorial de Residuos Sólidos en México”. Plan Regional de Inversiones en Medio Ambiente. Serie Estudios No. 10. (1996). Available from, <http://www.bvsde.ops-oms.org/eswww/fulltext/analisis/mexico/mexico.html>
- <sup>56</sup> Banco Interamericano de Desarrollo (BID), “Informe de la Evaluación Regional Del Manejo De Residuos Sólidos Urbanos en América Latina y El Caribe”, 2010, pág. 134, tabla 29
- <sup>57</sup> SEMARNAT, “El Medio Ambiente en México en Resumen”. 2009. Available from, [http://appl.semarnat.gob.mx/dgeia/resumen\\_2009/07\\_residuos/cap7\\_2.html](http://appl.semarnat.gob.mx/dgeia/resumen_2009/07_residuos/cap7_2.html)
- <sup>58</sup> Banco Interamericano de Desarrollo (BID), “Informe de la Evaluación Regional Del Manejo De Residuos Sólidos Urbanos en América Latina y El Caribe”, 2010, pág. 136, tabla 30
- <sup>59</sup> Toluca General Direction of Public Services and Environment, 2010.
- <sup>60</sup> Municipal Development Plan 2010 – 2012, October 2009, General Direction of Public Services and Environment of Toluca
- <sup>61</sup> Poder Edomex. “Los Centros de Acopio de Toluca recibieron 300 toneladas de productos reciclables”. February 3rd 2011. Available from, <http://www.poderedomex.com/notas.asp?id=64425>
- <sup>62</sup> La Alianza Global Jus Semper, Gráficas de brecha Salarial de México, 2010, <http://www.jussemper.org/Inicio/Recursos/Recursos%20Laborales/GBS/Recursos/GrafsbrechasMex2008.pdf>
- <sup>63</sup> Energy Secretariat, Energías Renovables Para el Desarrollo Sustentable en México, [http://www.sener.gob.mx/res/PE\\_y\\_DT/fe/e\\_renovables\\_mexico.pdf](http://www.sener.gob.mx/res/PE_y_DT/fe/e_renovables_mexico.pdf), 2003
- <sup>64</sup> Bloomberg
- <sup>65</sup> Velasco, M. Generation and Disposition of MSW in Mexico and Potential for Improving Waste Management in Toluca Municipality, Earth and Environmental Engineering Department, Columbia University, January 2011
- <sup>66</sup> Maass, S. “Los Sistemas Municipales de Información Ambiental. Requerimientos y Limitaciones para su puesta en marcha”. CienciaErgoSum. Vol. 11. No. 001. Universidad Autónoma del Estado de México. México. Pp. 85-94. (2004)
- <sup>67</sup> [www.banobras.gob.mx](http://www.banobras.gob.mx)





## 10. ESTUDIO DE CASO 3: BUENOS AIRES, ARGENTINA

### 10.1 DATOS DEL PAÍS

Argentina tiene una población de 40 millones y un PIB per cápita de US\$ 14.700. Es el segundo país más grande (2.8 millones de kilómetros cuadrados) en América del Sur, su población es 92% urbana, e incrementó un 10,6% en la última década.

El país es rico en recursos naturales, y solía ser uno de los países más ricos del mundo, pero ha sufrido muchas crisis financieras severas en las últimas décadas. Aunque la tasa de crecimiento del PIB en 2010 fueron del 7,5%, la tasa de inflación en el mismo año fue de 22%, y el 30% de su población está por debajo del umbral de la pobreza<sup>68</sup>.

Una parte importante de la economía de Argentina se basa en los productos básicos y exportaciones (soja, petróleo, gas natural, vehículos, maíz, trigo). Las exportaciones son principalmente a Brasil, China, Chile y los EE.UU.

### 10.2 GESTIÓN DE RESIDUOS EN ARGENTINA

En la Argentina, cada municipio es responsable de gestionar sus propios residuos. Esto ha dado lugar a una amplia variación en los servicios prestados en diferentes partes del país y, en muchas áreas, los RSU se disponen en vertederos no regulados. Un estudio realizado en 2005 por el Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (Tabla 41) informó que 12,3 millones de toneladas de RSU se generaron a nivel nacional; hay una amplia variación en la generación per cápita que van desde 0,16 toneladas en la provincia de Misiones a 0,55 toneladas por habitante en la Ciudad de Buenos Aires. El mismo estudio estima que el DSM contiene aproximadamente 50% de alimentos más desechos de jardín/verdes y alrededor de 15% de papel y cartón<sup>69</sup>.

TABLA 41 RSU GENERADOS EN ARGENTINA EN 2004<sup>69</sup>

Provincia	Población	Producción de RSU (Kton/año)	Producción de RSU per cápita (toneladas/año).
Buenos Aires	14.312.138	4.268	0,3
Catamarca	359.963	90	0,25
Ciudad de Buenos Aires	2.721.750	1.493	0,55
Córdoba	3.177.382	1.204	0,38
Corrientes	979.223	306	0,32
Chaco	1.053.335	232	0,22
Chubut	433.739	148	0,35
Entre Ríos	1.209.218	261	0,22

Formosa	518	122	0,24
Jujuy	650.123	166	0,26
La Pampa	314.131	111	0,36
La Rioja	315.744	88	0,28
Mendoza	1.637.756	678	0,42
Misiones	1.033.676	163	0,16
Neuquén	508.309	169	0,34
Río Negro	571.013	178	0,32
Salta	1.157.551	316	0,28
San Juan	655.152	226	0,35
San Luis	399.425	161	0,41
Santa Cruz	211.336	63	0,3
Santa Fe	3.079.223	1.235	0,41
Santiago del Estero	852.096	255	0,3
Tierra del Fuego	113.363	26	0,23
Tucumán	1.405.521	369	0,27
TOTAL	37.669.167	12.328	0,33215

Hay algunas plantas industriales en las áreas urbanas del país que reciclan papel, cartón, metales y algunos tipos de plásticos y vidrio. La mayor parte del reciclaje es informal, llevado a cabo por personas denominadas "cartoneros", que recogen los materiales reciclables de las calles, o "cirujas", que recogen los materiales reciclables de los RSU dispuestos en rellenos sanitarios. El reciclaje formal de los materiales separados en la fuente se practica sólo en algunos municipios.

El compostaje es practicado formalmente principalmente en ciudades pequeñas, aunque las áreas metropolitanas del país - Gran Buenos Aires, Gran Córdoba y Gran Rosario - también tienen algunas operaciones de hilera de compostaje.

Los rellenos varían a lo largo el país, desde vertederos abiertos a rellenos sanitarios más avanzados. La mayoría de los vertederos existentes tienen parrillas de ventilación pasiva, que evitan la presurización y las consiguientes fisuras de la superficie, acompañadas por fugas de lixiviados. Por otro lado, los respiraderos pasivos liberan GEI a la atmósfera más rápido. Por lo tanto, hace unos años, algunos vertederos incorporaron ventilación activa con posterior quema del biogás, lo que les permite solicitar créditos de carbono según el Protocolo de Kyoto, generando así ingresos para la instalación de gestión de residuos.

La opción más avanzada de utilización del gas de relleno sanitario (GRS) para producir electricidad o calor no se ha aplicado por muchos vertederos debido a la relativamente baja eficiencia térmica del biogás. Sin embargo, algunas plantas piloto se han construido, por ejemplo, una en Santiago del Valle de Catamarca, donde el biogás recogido se quema para generar vapor para la esterilización de

residuos hospitalarios en un autoclave; también hay una planta de generación de energía eléctrica en construcción en el vertedero de Acceso Norte III que sirve a Buenos Aires.

En el otro extremo del espectro de vertederos son los vertederos abiertos y no controlados, a menudo en áreas susceptibles a inundaciones o cerca de cuerpos de agua. Además, existen problemas relacionados con la saturación y fin de vida útil de los vertederos abiertos y el costo de la remediación de dichos vertederos o convertirlos en rellenos sanitarios.

### 10.3 RAZONES PARA SELECCIONAR EL ÁREA METROPOLITANA DE BUENOS AIRES PARA EL ESTUDIO DE CASO DE ARGENTINA

---

Los siguientes lugares fueron considerados en este estudio para la primera planta WTE en Argentina:

- Ciudad de Buenos Aires: La ciudad más grande de Argentina en términos de población y generación de residuos.
- Una ubicación dentro del Área Metropolitana de Buenos Aires (fuera de la Ciudad de Buenos Aires): Esta área recibe los residuos generados en la ciudad de Buenos Aires y sus municipios vecinos.
- Ciudad de Córdoba: Es una ciudad de tamaño medio, lo que hace que sea un buen candidato para la instalación de una planta de WTE.

El Área Metropolitana de Buenos Aires fue considerada como la mejor de las tres alternativas para este estudio de caso debido a que:

- El "747 Ley de Basura Cero" de la Ciudad de Buenos Aires (ver Apéndice 1) en este momento prohíbe la incineración, con o sin generación de energía dentro de la ciudad, y por lo tanto no es posible la construcción de una instalación de WTE en esta ciudad .
- Existe el precedente de un esfuerzo anterior para construir una instalación WTE en Córdoba que falló, debido a la tecnología no probada y deficiencias en el proceso de licitación.

### 10.4 INFORMACIÓN GENERAL DEL ÁREA METROPOLITANA DE BUENOS AIRES

---

El Área Metropolitana de Buenos Aires (Gran Buenos Aires) comprende la Ciudad de Buenos Aires, que consta de 48 barrios que ocupan unos 200 kilómetros cuadrados (Figura 56), y 33 municipios adyacentes (Figura 57).



FIGURA 56 LA CIUDAD DE BUENOS AIRES Y SUS 48 BARRIOS (EC)<sup>70</sup>



FIGURA 57 LA CIUDAD DE BUENOS AIRES Y GRAN BUENOS AIRES (EN AZUL)<sup>71</sup> (EEC)

La población de la Ciudad de Buenos Aires es de 2,9 millones, más un estimado de 1,6 millones de visitantes diarios<sup>72</sup>, mientras que el resto del Gran Buenos Aires tiene una población de 9,9 millones. Durante la última década, Gran Buenos Aires tuvo el mayor crecimiento de población en Argentina (Tabla 42).

TABLA 42 CRECIMIENTO DE LA POBLACIÓN EN LA CIUDAD DE BUENOS AIRES, GRAN BUENOS AIRES Y ARGENTINA<sup>73</sup>

	Población 2001	Población 2010	Porcentaje de Argentina en 2010 Población	Crecimiento 2001-2010
Ciudad de Buenos Aires	2.776.138	2.891.082	7%	4%
Resto del Gran Buenos Aires	8.684.437	9.910.282	25%	14%
Argentina	36.260.130	40.091.359	100%	11%

## 10.5 GESTIÓN DE RESIDUOS EN EL ÁREA METROPOLITANA DE BUENOS AIRES

En 1978 se crea una compañía pública llamada CEAMSE (Coordinación Ecológica del Área Metropolitana Sociedad del Estado), por la provincia de Buenos Aires y la Ciudad de Buenos Aires con el objetivo de gestionar los residuos sólidos generados en el Área Metropolitana (tal como se define más arriba). Es la mayor empresa de gestión de residuos en Argentina. En la actualidad, el

CEAMSE recolecta y elimina los residuos de la Ciudad de Buenos Aires, más los 33 municipios del área metropolitana.

## 10.5.1 GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS EN LA CIUDAD DE BUENOS AIRES

### 10.5.1.1 "GENERACIÓN" DE RSU EN LA CIUDAD DE BUENOS AIRES

Cabe señalar que las estadísticas que se muestran a continuación se refieren a los residuos sólidos recibidos para su disposición final por el CEAMSE y no incluye el reciclaje informal y otros residuos que no son recogidos por el CEAMSE. En 2010, el CEAMSE recibió 2.108.000 toneladas de RSU de la Ciudad de Buenos Aires. De esta cantidad, 690.000 toneladas fueron residuos de construcción y demolición, verde/patio, y voluminosos. La tasa de generación no cambia mucho con la temporada, con la excepción de los períodos de Navidad y Semana Santa donde hay un ligero aumento<sup>74</sup>.

### 10.5.1.2 CARACTERIZACIÓN DE RSU DE BUENOS AIRES

La tasa de producción de RSU en Buenos Aires varía apreciablemente con el nivel económico de la comunidad<sup>75</sup>. La Figura 58 muestra los resultados de un estudio llevado a cabo por la Prof. Marcela Delucca del Instituto de Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Buenos Aires.

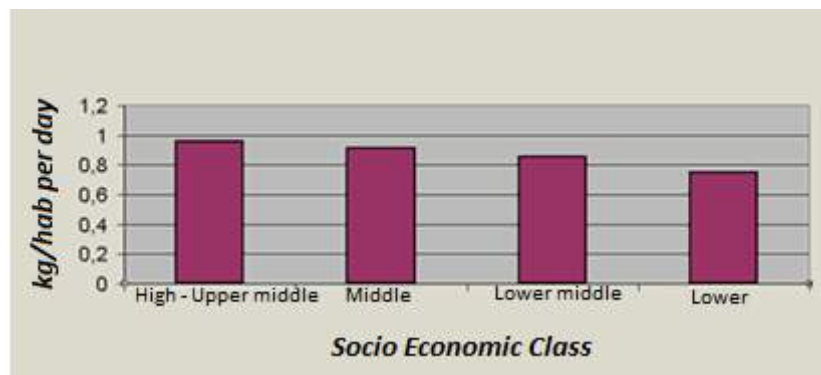


FIGURA 58 TASAS DE GENERACIÓN DE RSU EN LA CIUDAD DE BUENOS AIRES<sup>72</sup> (EEC)

El equipo del Proyecto se reunió con la Prof. Delucca que ha llevado a cabo extensos estudios de caracterización de los RSU de Buenos Aires lo largo de varios años.

La Tabla 43 muestra la composición de los residuos sólidos urbanos en vertederos en 2008, los valores caloríficos de sus componentes, y su respectiva contribución al valor calorífico del total de RSU (10,3 MJ/kg).

TABLA 43 COMPOSICIÓN DE LOS RSU DE BUENOS AIRES (2008<sup>72</sup>) Y SU VALOR CALORÍFICO

<b>Material</b>	<b>Porcentaje de RSU</b>	<b>Valor de calorífico del material<sup>30</sup> (MJ/kg)</b>	<b>Contribución al poder calorífico de los RSU, (MJ/kg)</b>
Desperdicios de alimentos	43,2	4,6	2
Papel y cartones	14,6	15,6	2,3
Plástico	10,5	32,4	3,4
Desechos de jardín	7,7	6	0,5
Pañales desechables	4,3	10	0,4
Textiles	4	18,4	0,7
Madera	1,6	15,4	0,2
Cuero, caucho y corcho	1	22	0,2
Vidrio	5,5	0	0
Metales ferrosos	0,9	0	0
Metales no ferrosos	0,3	0	0
Construcción y demolición	1,8	6	0,1
Residuos peligrosos	0,4	10	0
Desechos médicos	0,4	10	0
Varios finos <12,7 mm	3,2	10	0,3
Otro	0,6	0	0
<b>Total</b>	<b>100</b>		<b>10,3</b>

El mismo estudio demostró que la densidad de los RSU "tal como se recogieron" en 2008 fue de alrededor de 280 kg/m<sup>3</sup>. La fracción de materiales potencialmente reciclables en la recogida de RSU se estimó en 15,7%, correspondiente a 274.000 tons<sup>72</sup>. Como se dijo anteriormente, esta cifra no incluye los materiales reciclables recogidos de manera informal.

### 10.5.1.3 RECICLAJE

Reciclaje en Buenos Aires ahora se lleva a cabo por diferentes cooperativas de "cartoneros". No hay datos oficiales, pero la asociación de gestión de residuos de Argentina (ARS) estima que

aproximadamente 70.000 toneladas al año son rescatadas por estas cooperativas. El reciclaje informal aumentó en 2002 a raíz de una crisis económica que resultó en desempleo y un aumento en el precio de las materias primas como los metales y papel. La combinación de estos dos factores dió lugar a un gran aumento en el número de "cartoneros" en Buenos Aires. No existen estadísticas oficiales sobre el número de cartoneros que operan actualmente en la ciudad, pero se ha estimado en 5.000 a 9.000 personas que operan en pequeños grupos o en solitario.

Antes de 2002, la ley prohibió hurgar en la basura, pero esta actividad fue legalizada en enero de 2003 (Ley 992). El gobierno pretendía abarcar los cartoneros al sistema formal, pero la principal preocupación ha sido que los cartoneros operan por su cuenta y no están interesados en empleos formales. Además, si el trabajo de los cartoneros se formaliza mediante el pago de beneficios e impuestos correspondientes, proporcionando uniformes, y beneficios de salud y seguridad, los ingresos procedentes de los materiales reciclables recogidos no serán suficientes para cubrir los costos de este programa<sup>76</sup>. Este tema se discute en la Sección de reciclaje de la Guía.

El estudio realizado por la Prof. DeLucca<sup>72</sup> estima que 274.000 toneladas de RSU recolectados por la ciudad es potencialmente reciclable; por lo tanto, la tasa de reciclaje de Buenos Aires se podría aumentar de forma apreciable. A partir de 2007, se ha producido un cierto esfuerzo para separar los residuos sólidos urbanos en una corriente "húmeda" que se depositan en vertederos y un arroyo "seco" que se dirige a los centros de reciclaje donde los materiales reciclables se clasifican. Hay más de 9.000 contenedores "secos" colocados alrededor de la ciudad para este propósito<sup>77</sup>.

En la planificación para aumentar la tasa de reciclaje en Buenos Aires, es necesario partir con la información pública y sistemas de recogida adecuados. En una encuesta de 2010 de 300 personas profesionales, realizada por el EEC en Buenos Aires, el 82% respondió negativamente a la pregunta "¿está usted interesado en el reciclaje?"; cuando se les preguntó "¿por qué no?", el 59% respondió que creían que durante la recolección de materiales reciclables éstos se mezclan con los RSU y terminan en los vertederos de todos modos (Apéndice 2 del Estudio de Caso de Argentina).

#### 10.5.1.4 RECOLECCIÓN

La recogida de residuos en la ciudad se lleva a cabo por cinco empresas: Cliba, Urbasur, AESA, Níttida, e Integra. Sin embargo, una solicitud de propuestas está en marcha para proporcionar un nuevo servicio de recolección. La ciudad se divide en cuatro zonas para el RSU "húmedo", en lugar de los actuales seis zonas (59); También, la recogida de RSU "seco" se divide en 15 zonas en toda la ciudad<sup>78</sup>. El flujo seco recogido es probablemente las 60.000 toneladas de reciclaje formal discutido anteriormente.



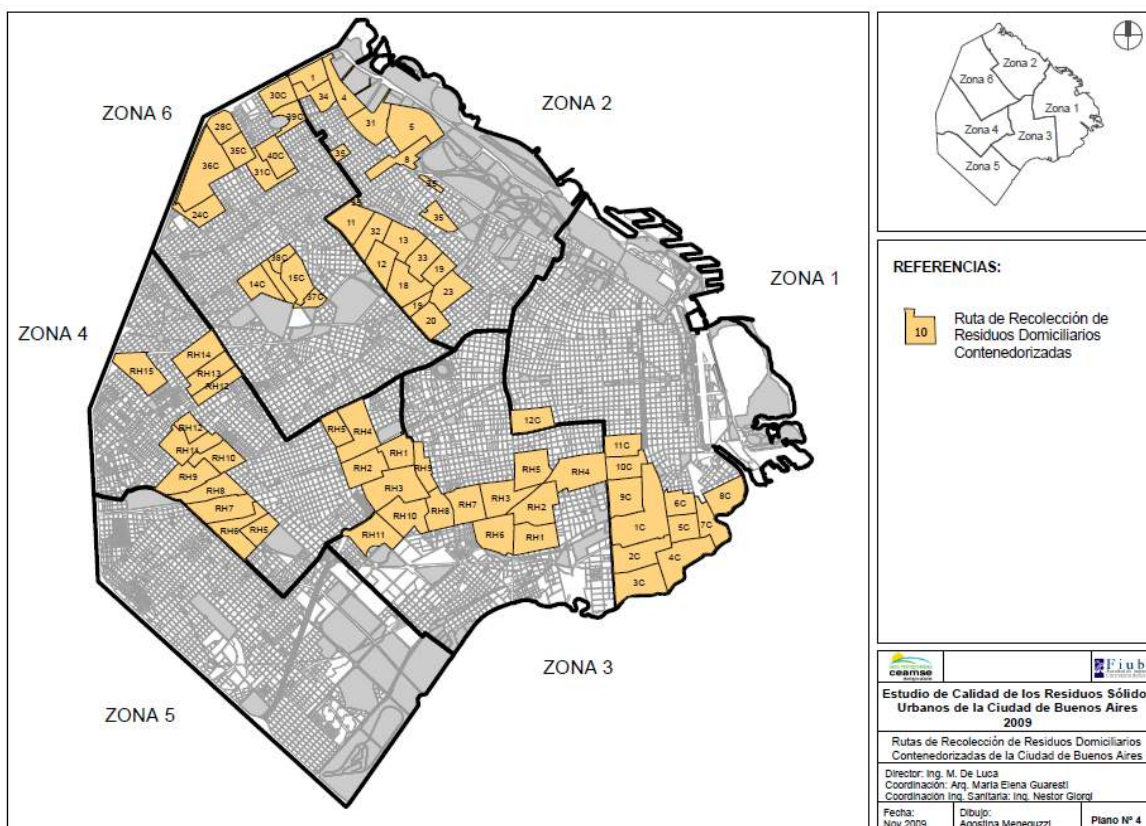


FIGURA 59 RUTAS DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN LA CIUDAD DE BUENOS AIRES<sup>77</sup> (CEE)

#### 10.5.1.5 ESTACIONES DE TRANSFERENCIA DE RESIDUOS (WTS)

Hay tres estaciones de transferencia de residuos (Waste Transfer Station, (WTS)) en la ciudad, ubicadas en las áreas de Pompeya, Flores y Colegiales (Figura 60). Cada WTS maneja alrededor de 65.000 toneladas de RSU al mes y tiene capacidad adicional para el futuro próximo. Como se muestra en la Figura 60 y la Figura 61, la WTS más alejada del vertedero se encuentra en Pompeya, en la parte este de la ciudad y 22,7 km del vertedero Acceso Norte III (distancia aérea). El WTS de Flores está directamente al oeste de Pompeya y 18,5 km de Norte III.

Las WTS más cercanas al vertedero, en la parte norte de la ciudad y 15,7 km del vertedero Acceso Norte es Colegiales. Se encuentra en medio de una zona bastante acomodada de la ciudad y aunque fue construido en 1979, está muy bien diseñado y operado. Al otro lado de su cerca hay un parque público con campos de juego. No hay vertido de RSU en el suelo, y por lo tanto no hay olores detectables, como es el caso de algunas estaciones de transferencia de residuos en la ciudad de Nueva York. Los camiones de recogida suben por una rampla y vuelcan su carga en un contenedor horizontal. Un mecanismo de pistón empuja y compacta los residuos sólidos urbanos en el

recipiente de los grandes camiones que lo transportan al vertedero. La WTS Colegiales sería una buena fuente de materia prima para la hipotética WTE de Buenos Aires.

Hay una cuarta estación de transferencia llamada Varela que es sólo para residuos de demolición, verde y voluminosos.

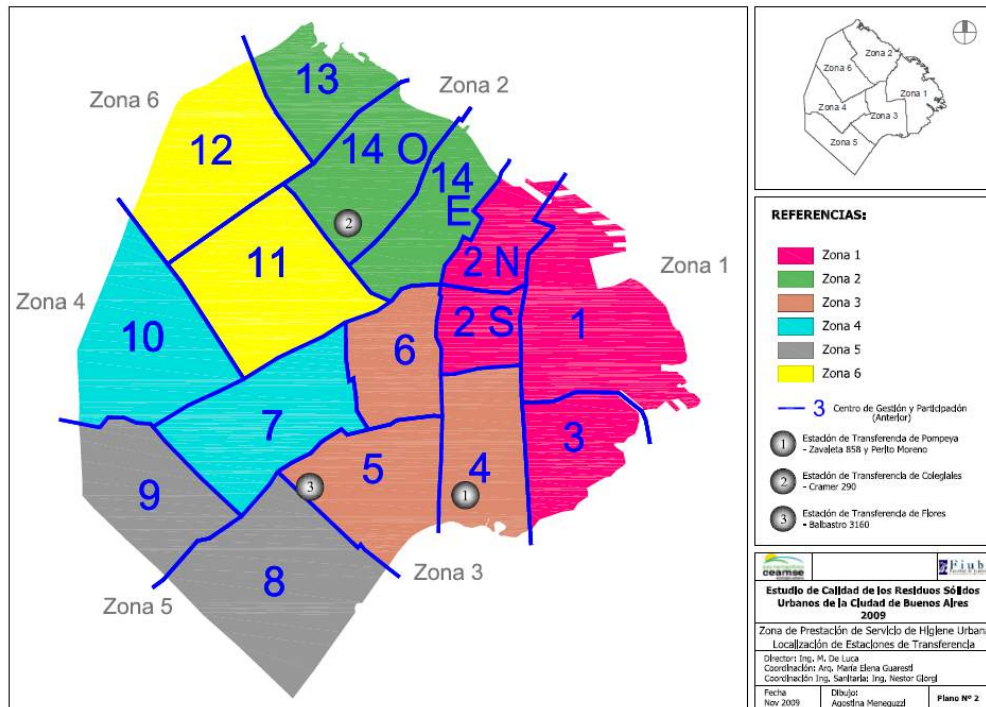
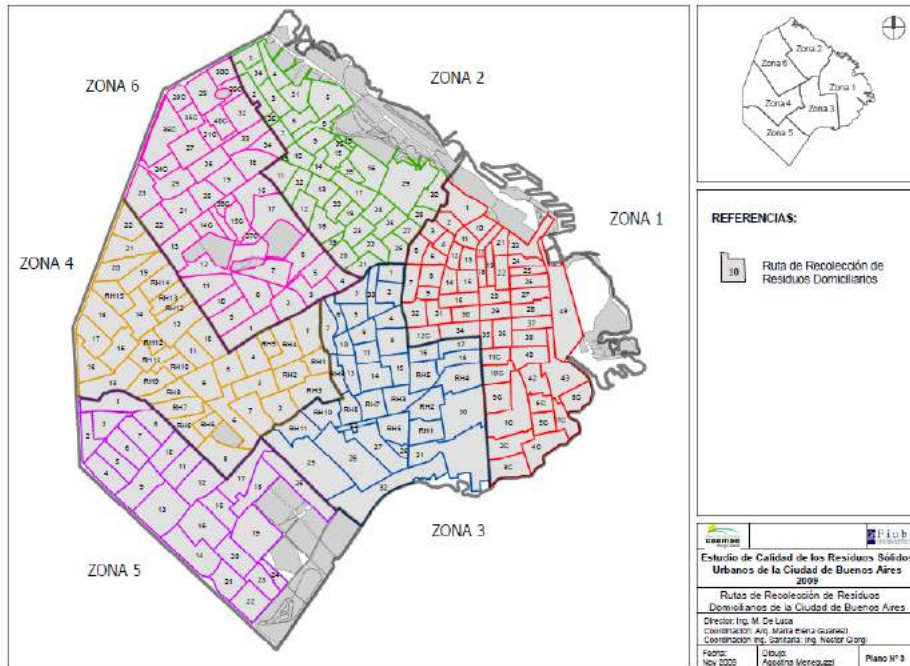


FIGURA 60 DIVISIÓN ACTUAL DE LA CIUDAD EN SEIS ZONAS Y UBICACION DE LAS TRES ESTACIONES DE TRANSFERENCIA (EEC)



FIGURA 61 MAPA QUE MUESTRA EL RELLENO SANITARIO ACCESO NORTE III Y LAS TRES ESTACIONES DE TRANSFERENCIA QUE SIRVEN A LA CIUDAD DE BUENOS AIRES (EEC)

Hay 226 rutas a lo largo de la ciudad (Figura 62), y aproximadamente mil viajes de recolección se realizan todos los días entre las calles de la ciudad y las estaciones de transferencia<sup>79</sup>.



---

## 10.5.2 GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS EN EL GRAN BUENOS AIRES

---

Como se ha señalado anteriormente, el Gran Buenos Aires se compone de la Ciudad de Buenos Aires y los 33 municipios que envían sus residuos sólidos al CEAMSE.

### 10.5.2.1 COMPOSTAJE

---

En la zona del vertedero Acceso Norte III hay una instalación de compostaje en hileras que procesa los desechos verdes aeróbicamente. La capacidad estimada de este proceso es de 2.000 toneladas de residuos verdes por mes. En 2010, 14.400<sup>70</sup> toneladas de residuos verdes se procesaron y se produjeron 4.320 toneladas de compost. Parte de este producto se distribuyó gratuitamente a los municipios más cerca del vertedero y se utilizó como acondicionador del suelo en los espacios públicos. El resto se utiliza para el mantenimiento del vertedero. Cabe señalar que este abono está certificada por el SENASA (Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria) como acondicionador del suelo. Esta es la única planta de compostaje en el Área Metropolitana.

### 10.5.2.2 DEPÓSITO EN VERTEDEROS

---

El CEAMSE opera tres rellenos sanitarios en el área metropolitana de Buenos Aires: El vertedero de Ensenada que recibe residuos de los municipios de La Plata, Ensenada, Beriso y Brandsen; el vertedero Catán González que recibe residuos del municipio La Matanza; y el vertedero Norte III que sirve a Buenos Aires y el resto de los municipios del Gran Buenos Aires (Almirante Brown, Avellaneda, Berazategui, Escobar, Esteban Echeverría, Ezeiza, Fcio. Varela, Gral. Rodríguez, Gral. San Martín, Hurlingham, Ituzaingó, José C. Paz, Lanús, Lomas de Zamora, Luján, Malvinas Argentinas, Merlo, Moreno, Morón, Pilar, Presidente Perón, Quilmes, San Fernando, San Isidro, San Miguel, Tigre, Tres de Febrero, y Vicente López).

Norte III es por mucho el mayor vertedero en Buenos Aires y se espera que alcance la plena capacidad a finales de 2012. Este relleno sanitario es propiedad y está operado por el CEAMSE y está equipado con instalaciones de tratamiento de lixiviados y con captura del biogás que se quema actualmente.

Actualmente, el relleno sanitario Norte III recibe aproximadamente el 90% de los residuos sólidos urbanos generados en el área metropolitana con exclusión de la ciudad de Buenos Aires. Esta cantidad representa un promedio de 9.000 toneladas por día. Además, cerca de 6.200 toneladas/día se transportan en camiones desde las tres estaciones de transferencia de residuos (WTS) que sirven a la Ciudad de Buenos Aires. Acceso Norte III consta de tres células que han sido llenadas y una cuarta que se espera que se complete a finales de 2012. Las células cerradas se mantienen bien con hierba, arbustos y pequeños árboles creciendo sobre ellas. Los detalles de estos módulos se presentan en la Tabla 44. La altura máxima de cierre del vertedero se estima en alrededor de 35 metros. Como puede observarse en la última columna de esta tabla, el vertedero Acceso Norte III ha tenido capacidad similar (16-17 toneladas de RSU por metro cuadrado) con la observación del EEC de que un metro cuadrado de tierra se convierte en vertedero por cada 10-20 toneladas de RSU, dependiendo de la topografía, el uso de la cubierta diaria, y la altura final del vertedero. La Tabla 44

también muestra que el tonelaje diario vertido en Norte III se ha más que duplicado en la primera década de este siglo.

TABLA 44 CARACTERÍSTICAS DE LOS MÓDULOS DEL VERTEDERO ACCESO NORTE III<sup>74</sup>

Módulo	Fecha de inicio	Fecha de cierre	Área (hectáreas)	RSU dispuestos (toneladas)	Toneladas (RSU/día)	Toneladas por metro cuadrado
Norte III	Oct, 1994	Dic. 1, 2001	64	10.501.269	4.062	16
Norte III a	Dic. 1, 2001	Nov. 2, 2006	64	10.944.878	5.900	17
Norte III b	Dic. 1, 2005	Jun. 30, 2010	84	14.054.675	8.406	17
Norte III c	Abr. 5, 2008	Mar. 30, 2013	90	11.294.228	10.169	21

## 10.6 TARIFA APLICADA

En la actualidad, la Ciudad de Buenos Aires paga al CEAMSE una tarifa de ARS\$23 (alrededor de US\$ 5) por tonelada de residuos vertidos. Sin embargo, el CEAMSE estima que el costo real sea de alrededor de US\$ 15/tonelada.

## 10.7 CAPACIDAD PROYECTADA Y POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA DE LA PLANTA WTE

Desde el punto de vista de un menor coste por tonelada de DSM y una mayor producción de energía, el primer WTE en Buenos Aires debe ser una planta de 3 líneas, de 3.000 toneladas por día. En la disponibilidad de planta proyectada de +90% (es decir, 8.000 horas por año de funcionamiento), este WTE procesará un millón de toneladas por año, lo que equivale a aproximadamente el 20% de los residuos vertidos en el Acceso Norte III.

Sin embargo, teniendo en cuenta que la tarifa necesaria para la viabilidad económica de una planta de este tipo será considerablemente más alta que lo que cuesta el vertido de RSU en Buenos Aires actualmente, sería prudente comenzar con una WTE de una sola línea, de 1.000 toneladas/día, con posibilidad de añadir otras dos líneas paralelas en un futuro próximo. Sin embargo, dado que una planta de esta capacidad se discute en el Estudio de Caso para Chile (Región de Valparaíso), para fines de ilustración el Estudio de Caso de Argentina ejemplifica la planta de 3 líneas, 3.000 toneladas por día.

La estimación del potencial de generación de electricidad de la planta WTE requiere que el valor calorífico de los residuos que serán procesados en la instalación. El valor calorífico de los residuos en el área metropolitana del Gran Buenos Aires no está disponible, pero ya que los residuos generados en la ciudad de Buenos Aires dispuestos en el Acceso Norte III representa el 40% de los residuos eliminados en este vertedero, el poder calorífico de los RSU de la ciudad de Buenos Aires (10,3 MJ/kg; Tabla 43) se utilizó para estimar el potencial de generación de energía.

Replicando los cálculos explicados en la Sección 5.8 de la Guía (recuperación de energía), la generación neta de electricidad se estima conservadoramente en 0,6 MWh por tonelada de RSU, es decir, 604.800 MWh por año.

## 10.8 SITIO SELECCIONADO PARA LA PLANTA WTE

---

El estudio del EEC recomienda que la primera planta de WTE en Argentina se ubique en el vertedero del CEAMSE Norte III, por las siguientes razones:

- El futuro de la eliminación de residuos sólidos en el Área Metropolitana de Buenos Aires no está claro. Se espera que el vertedero Norte III alcance su plena capacidad en abril de 2013. El vertedero de Ensenada se cerrará pronto y el municipio de La Matanza, donde se encuentra el vertedero González Catán, no permite la importación de residuos procedentes de otros municipios;
- No hay terrenos aptos para un nuevo relleno dentro del Área Metropolitana de Buenos Aires.
- Varios intentos durante los últimos diez años para localizar un relleno sanitario fuera del Área Metropolitana, para que reciba sus residuos, han fracasado debido al efecto de "no en mi patio trasero".
- La existencia de una empresa pública con experiencia (CEAMSE), con profesionales cualificados y una buena gestión.
- El potencial apoyo del proyecto de la Ciudad de Buenos Aires y la Provincia de Buenos Aires (los dos distritos más importantes de Argentina).
- La extrema necesidad de utilizar una tecnología alternativa al relleno sanitario.
- La amplia oferta de RSU del Área Metropolitana y la Ciudad de Buenos Aires.
- Ubicación relativamente cercana a la conexión a la red eléctrica, a siete kilómetros de distancia.

La superficie aproximada para la planta propuesta es de 11,5 hectáreas (véase la Sección 5.5 de la Guía). La figura 63 muestra la ubicación geográfica del vertedero Acceso Norte III.



FIGURA 63 COORDENADAS DEL VERTEDERO ACCESO NORTE III (EEC)

## 10.9 COSTOS PROYECTADOS DE LA PLANTA WTE

Al igual que en los otros estudios de casos, en esta sección se presentan las estimaciones de gastos de capital y operación basados en instalaciones de reciente construcción en los EE.UU. y Europa, y por lo tanto no tienen en cuenta todas las condiciones locales, y también están sujetos a muchos factores variables tales como el precio de los metales y cemento. Por lo tanto, se consideran dentro de más o menos 20% de precisión.

### Costo de capital

Una planta de tres líneas, 1000 toneladas por día por línea, tendrá una capacidad anual de 990.000 toneladas de RSU (330 días al año de funcionamiento). El costo de capital de una planta de este tipo se estima en el orden de US\$ 600 millones (US\$ 595 por tonelada de capacidad anual).

El desglose estimado del costo de capital en los distintos componentes de la planta WTE se muestra en la Tabla 45 a continuación.

TABLA 45 ESTIMACIÓN DE LOS COSTOS DE CAPITAL

<b>Número de líneas</b>	3
<b>Preparación del sitio, acceso, paisajismo (millones de US\$)</b>	37
<b>Edificios, chimenea (millones de US\$)</b>	119

<b>Parrilla, caldera, suministro de aire, manejo de cenizas, sistemas eléctricos y mecánicos (millones de US\$)</b>	254
<b>Generador de turbina (millones de US\$)</b>	62
<b>Sistema de control de la contaminación del aire (millones de US\$)</b>	62
<b>Contingencia (millones de US\$)</b>	62
<b>Terreno</b>	4
<b>Estimación del costo total de capital (millones de US\$)</b>	600
<b>Costo de capital estimado (US\$/tonelada anual de capacidad)</b>	595

#### Costos de operación

La WTE de tres líneas requerirá un complemento de personal de sesenta. Suponiendo que las cenizas de la parte inferior y volantes se mezclarán y serán dispuestas en el vertedero Acceso Norte III, los gastos de operación estimados se muestran en la Tabla 46 a continuación.

TABLA 46 GASTOS DE OPERACIÓN

<b>Número de líneas</b>	3
<b>Eliminación de cenizas (millones de US\$, US\$ 3,75/tonelada)</b>	3,78
<b>Productos químicos (millones de US\$, US\$ 4/ton)</b>	4,03
<b>Depuración de gases (millones de US\$, US\$ 8/ton)</b>	8,06
<b>Mantenimiento (millones de US\$, US\$ 15,6/ton)</b>	11,19
<b>Varios (millones de US\$, US\$ 2/tonelada)</b>	2,02
<b>Personal, empleados (millones de US\$)</b>	1,21
<b>Subtotal (millones de US\$)</b>	30,29
<b>Contingencia (millones de US\$; 5%)</b>	1,51
<b>Subtotal</b>	31,81
<b>Seguros (millones de US\$; 0,6%)</b>	0,19



<b>Costo de operación estimado (millones de US\$)</b>	32
<b>Costo de operación estimado (US\$/tonelada de capacidad)</b>	31,8

## 10.10 INGRESOS PROYECTADOS DE LA PLANTA WTE

### Ingresos de la electricidad

Existe un interés creciente en la Argentina para plantas de energía WTE, sobre todo por el incentivo de energía renovable. Una ley nacional exige que para el año 2016, el 8% de la energía generada en el país sea proporcionada por fuentes de energía renovables, excluida la hidroeléctrica. Además, el programa "GENREN" lanzado en 2009 por la empresa pública ENARSA (Energía Argentina S.A.) estableció criterios en una solicitud de propuestas para suministrar hasta 1.000 MW de electricidad a partir de recursos renovables. De esta cantidad, hasta 160 MW pueden ser proporcionados por la combustión de RSU en las plantas WTE; la planta WTE sugerida para Buenos Aires generaría 75 MW. Un incentivo financiero proporcionado en este programa es el precio de US\$ 120 por MWh de energía eléctrica renovable, frente a alrededor de US\$ 80/MWh de energía a base de fósiles. Puesto que la energía de los RSU de Buenos Aires se prevé que sea sobre 55% biogénica, el precio de la electricidad producida por la WTE se calcula en US\$ 102/MWh, en relación asumida de 55/45 de la energía bio a fósil en los residuos sólidos urbanos.

Por lo tanto, en el precio proyectado para la energía parcialmente renovable, de US\$ 102/MWh, los ingresos procedentes de la electricidad serán  $0,6 \times 102 = \text{US\$ } 61/\text{tonelada de RSU}$ .

### Tarifa aplicada

Como se mencionó anteriormente, la Ciudad de Buenos Aires paga al CEAMSE una tarifa de alrededor de US\$ 5 por tonelada de residuos vertidos, mientras que el costo real se estima en unos US\$ 15. Está claro que incluso esta tarifa es mucho menor que la requerida para sostener una nueva planta de WTE de Buenos Aires. Por el momento, se asumirá la tasa de entrada es de US\$ 20, pero la sección de análisis financiero calcula la tarifa necesaria para diversos niveles de la tasa interna de retorno a los inversores.

### Ingresos de créditos de carbono

Para el cálculo de los ingresos de créditos de carbono se debe utilizar un factor de emisión. El factor de emisión en Argentina es de 0,481 toneladas de CO<sub>2</sub> por MWh (Ministerio de Planificación e Inversión Pública); se calcula teniendo en cuenta que la electricidad generada por la planta WTE reducirá la combinación actual de petróleo, carbón y la generación de energía hidroeléctrica en la zona de Buenos Aires. Este factor se multiplica por la producción de electricidad de la planta de la red para obtener los correspondientes créditos de emisión de carbono (toneladas de CO<sub>2</sub>). Como se ha mencionado en la Sección 5.18 de la Guía, el valor de créditos por tonelada de emisiones de carbono evitadas (CER) se estima en US\$ 16. Por lo tanto, el valor de los créditos de carbono de los

0,6 MWh por tonelada de DSM que se generan en la WTE son  $0,481 \times 16 = \text{US\$ } 7.7/\text{por tonelada de RSU}$ .

Además de la sustitución de la energía fósil, como se ha señalado en la Sección 5.18 de la Guía, el desvío de los RSU de los vertederos también reduce la cantidad de metano que éstos emiten y un volumen de metano emitido a la atmósfera tiene el efecto de gases de efecto invernadero de 21 moléculas de dióxido de carbono. Debido a estos dos factores, una tonelada de RSU a combustión en lugar de vertidos resulta en la disminución de las emisiones de carbono por hasta 1 tonelada de dióxido de carbono, dependiendo de la eficacia de la captura de biogás en la alternativa de vertedero. En este caso, los créditos de carbono de hasta 1 tonelada de  $\text{CO}_2/\text{tonelada de RSU}$ , es decir,  $\text{US\$ } 16/\text{tonelada de RSU}$ . Sin embargo, el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) actualmente aplicable reconoce el valor de sólo diez años de metano de vertedero evitado, es decir, una fracción del metano general evitado efectivamente a través de instalaciones WTE. Por lo tanto, en este análisis, se asumió que los ingresos procedentes de créditos de carbono serían sólo los  $\text{US\$ } 7.7/\text{tonelada de DSM}$ , según lo calculado en el apartado anterior.

#### Ingresos procedentes de la recuperación de metales

Como se señaló en la Sección 5.18 de la Guía, una estimación muy conservadora es que alrededor del 50% de los metales ferrosos y el 8% de los metales no ferrosos en los RSM se recuperan de las cenizas de fondo WTE. Dado que los RSU de Buenos Aires contienen 0,9% de metales ferrosos, y 0,3% de metales no ferrosos (Tabla 43), por cada tonelada de RSU quemado aproximadamente 4,74 kg de metales (4,5 kg de hierro y 0,24 kg de metales no ferrosos) pueden ser recuperados. Por lo tanto, la instalación de WTE propuesta recuperará 4.800 toneladas de metales al año. Para un precio de mercado asumido en Argentina de  $\text{US\$ } 200$  por tonelada de metal recuperado, la instalación tendrá un ingreso de  $\text{US\$ } 960.000$  por año, es decir,  $\text{US\$ } 0,96$  por tonelada de RSU en combustión.

## 10.11 ANÁLISIS FINANCIERO DE WTE PARA BUENOS AIRES

---

Al igual que en los demás casos, el enfoque utilizado para el análisis financiero de la WTE de Buenos Aires fue el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) de los flujos de caja de la planta WTE. Esto significa que los costes de financiación específicos no fueron tomados en cuenta y, por lo tanto, tanto el VAN y TIR probablemente disminuya una vez que se incluyan estos costos. Además, las variaciones en los flujos de caja debido a la inflación u otros factores no fueron incluidos y podrían tener un impacto importante en el análisis.

Al igual que en los otros casos, el período de recuperación utilizado fue de 23 años, suponiendo 3 años de construcción y 20 de operación; y las tasas de descuento utilizadas para el cálculo del VAN son 5%, 10% y 15%. La Tabla 47 muestra un resumen de los costes e ingresos utilizados en este análisis.

TABLA 47 RESUMEN DE COSTOS E INGRESOS

Ítem	Cost	Revenue
Costo de capital (millones de US\$)	600	
Costo de operación (millones de US\$/año)	32	
Venta de electricidad (US\$/MWh)		102
Tarifa aplicada (US\$/ton)		20
Créditos de carbono (US\$/ton)		7,7
Metales (US\$/ton)		200

La Tabla 48 muestra el valor actual neto para los tres tasas de descuento asumidas, y la Tasa Interna de Retorno, para las condiciones que se muestran en la Tabla 47.

TABLA 48 VAN A TASAS DE DESCUENTO DEL 5%, 10%, 15% Y LA TIR

VAN al 5% (millones de US\$)	VAN al 10% (millones de US\$)	VAN al 15% (millones de US\$)	TIR (tasa anual)
80	-125	-215	6.5%

Los resultados muestran que a una tasa de entrada de US\$ 20/tonelada, la planta es económicamente viable sólo cuando el costo de capital es inferior al 6,5%, (por ejemplo, en el caso de una tasa de descuento del 5%). , Las tarifas requeridas para que la planta alcance el equilibrio (es decir VAN = 0), con tasas de descuento del 5%, 10% y 15% se muestran en la Tabla 49.

TABLA 49 TARIFA APLICADA REQUERIDA PARA TASAS DE DESCUENTO DEL 5%, 10% Y 15%

Tarifa aplicada (US\$/tonelada)		
Tasa de descuento del 5%	Tasa de descuento del 10%	Tasa de descuento del 15%
12	40	73

Para una tarifa de US\$ 15/tonelada (es decir, el costo actual de eliminación de residuos en el vertedero Norte III), el VAN es cero para una tasa de descuento del 6%.

## 10.12 CONCLUSIONES AL ESTUDIO DE CASO DE BUENOS AIRES

---

Buenos Aires necesita urgentemente una solución más sostenible que el relleno sanitario para la gestión de sus RSU. Esto se debe a que se espera que el vertedero Acceso Norte III alcance su plena capacidad a finales de 2012, el vertedero de Ensenada se cerrará pronto, y el municipio de La Matanza, donde se encuentra el vertedero González Catán, no permite la importación de residuos de otros municipios. Por otra parte, no hay terrenos aptos para un nuevo relleno dentro del Área Metropolitana de Buenos Aires, y varios intentos durante los últimos diez años para localizar un relleno sanitario fuera del Área Metropolitana han fracasado debido al efecto de "no en mi patio trasero".

La planta de WTE propuesta (capacidad de 1 millón de toneladas por año) sería capaz de procesar aproximadamente el 20% de los residuos actualmente dispuestos en el vertedero Acceso Norte III, la instalación WTE sería una solución mucho más sostenible que la construcción de un nuevo relleno, y el país se movería más cerca de sus objetivos de energías renovables. El principal problema de esta solución es que lo más probable es que la tarifa sea más alta que el costo de vertido actuales en Acceso Norte III (US\$ 15/tonelada), a menos que el costo de inversión de capital en esta planta sea inferior al 6%, que es un escenario muy optimista. Por otra parte, si el costo de capital es del 10%, la tarifa será de al menos US\$ 40/tonelada. Cabe señalar que sobre la base de la experiencia en los EE.UU. y la U.E., el coste real del depósito en rellenos sanitarios, incluyendo la aplicación de la cubierta diaria, recopilación y uso de gases de vertedero, y mantenimiento de vertedero por un período de 30 años después del cierre, es superior a US\$ 40/tonelada de RSU; por ejemplo, en el taller de la Ciudad de México, organizado por el BID (noviembre de 2011), el número de > 40 euros por tonelada fue mencionado por A. Mavropoulos de ISWA.

Los programas para aumentar el reciclaje y compostaje también deben ser reforzadas a través de programas tales como las campañas de educación para mover Buenos Aires hacia arriba en la jerarquía de la gestión sostenible de los residuos. En particular, el plan para una instalación WTE debe ir acompañado de la separación en origen y recolección de materiales reciclables designados que serían llevados a un Centro de Reciclaje de Materiales, adyacente a la WTE, como se discutió en la parte de la Guía de este informe (Sección 5.14).

## APÉNDICES DEL ESTUDIO DE CASO DE ARGENTINA

---

---

### APÉNDICE 1: MARCO LEGAL

---

Las siguientes son las principales leyes nacionales existentes relacionadas con la gestión de residuos sólidos:

- Constitución Nacional: Un reporte se puede encontrar en <http://www.ambiente.gov.ar/observatoriorisu/grupo.asp?Grupo=8078&Subgrupo=8235>
- Ley N° 26.011: El Convenio de Estocolmo - *sobre contaminantes orgánicos persistentes*

- Ley N° 25.916: Gestión de Residuos Urbanos Integrada. legislación Nacional
- Ley N° 25.675: La legislación Nacional, ley General del Medio Ambiente. Explicación de la coordinación entre las legislaciones nacionales, provinciales y municipales
- Ley N° 26.190: Ley Nacional de energías renovables: Establece que en 2016 el 8% de la energía tiene que ser suministrada por un recurso alternativo.
- Resolución de la Secretaría Nacional de Energía N° 712: Regula los contratos de suministro de energía renovable.
- Constitución de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires Art. 28
- Ley 1.854 - Ciudad de Buenos Aires: la gestión integrada de los residuos sólidos urbanos
- Ley 992 - Ciudad de Buenos Aires: los cartoneros son reconocidos como parte de la gestión de residuos sólidos.
- Ley 13.592 - Provincia de Buenos Aires - Gestión de Residuos Sólidos Urbanos Integrado
- Decreto Ley 9.111/78 regula la disposición final de los residuos y condujo a la creación del CEAMSE
- Ley de Protección del Ambiente N° 11.723
- Ley 11.382 Modificación del Decreto Ley 8.031/73
- Decreto Reglamentario 1.741/96, modificado por la Ordenanza 1712/97
- Ordenanza municipal 39.025 (B.M. 17.049 - publicada en el 13/6/83)
- Código de Prevención de la Contaminación Ambiental de la Ciudad de Buenos Aires
- Ordenanza 33.581 (BM 15.540) Modificado por Ordenanzas 33.681 (BM 15.575) y 38.188 (04/10/82); que modifica los artículos 4, 6 y 7
- Ordenanza 33.691 (BM 15.577); ratificado por Dec. Nac. 3457/77 BO 21/11/77; se aprueba el ex Acuerdo MCBA/Pcia. de BA de 07/01/77 05/06/77
- Ley 992 de cartoneros

La ley municipal en vigor es la Ley N° 1.854 de "cero residuos" - 747 también es modificación de la Ley N° 154. Texto original:

[http://boletinoficial.buenosaires.gob.ar/areas/leg\\_tecnica/boletines/20060112.htm#3](http://boletinoficial.buenosaires.gob.ar/areas/leg_tecnica/boletines/20060112.htm#3)

<http://www.cedom.gov.ar/es/busca/>

*Resumen de la presente ley: Cero residuos es el nombre dado a los esfuerzos hacia la reducción de la cantidad de residuos sólidos para la disposición final a través del reciclaje, la reutilización y la reducción de la cantidad de residuos producidos. Esta ley destinada a reducir el 75% de la cantidad de RSU en 2017, tomando el año 2004 como referencia. Artículo No. 7 prohíbe explícitamente la combustión de cualquier RSU, con o sin producción de energía.*

## APÉNDICE 2: ENCUESTA DE GESTIÓN DE RESIDUOS EN BUENOS AIRES

---

Muestra: Los ciudadanos de la Ciudad de Buenos Aires

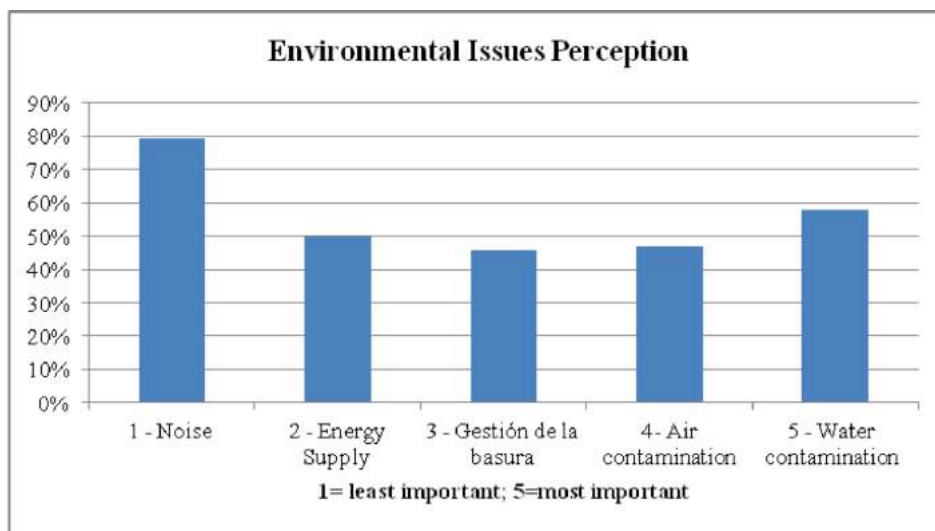
Tamaño de la muestra: 200 + Fecha de la encuesta: Mayo 2011

### **Pregunta 1: Ocupación**

Ocupación		
Opciones de respuesta	Porcentaje de respuesta	Contador de respuesta
Estudiante	28%	61
Ama de casa	0,5%	1
Empleado	14,2%	31
Empleado profesional	50,5%	110
Independiente	17,4%	38
Administración Pública	4,1%	9
Retirado	1,8%	4
Otro	4,1%	9
pregunta respondida		218
pregunta saltada		0

## Pregunta 2

Ordenar los siguientes temas ambientales en función del riesgo que representan, en su opinión, a la vida humana							
Opciones de respuesta	1 = bajo riesgo	2	3	4	5 = mayor riesgo	Valoración media	Contador de respuesta
Contaminación del agua	7	9	18	52	121	4,31	207
La contaminación del aire	4	16	37	97	54	3,87	208
Gestión de residuos	5	52	95	41	14	3,03	207
Proveedor de energía	27	104	51	15	11	2,42	208
ruido	164	27	7	2	8	1,38	208
pregunta respondida							208
pregunta saltada							10

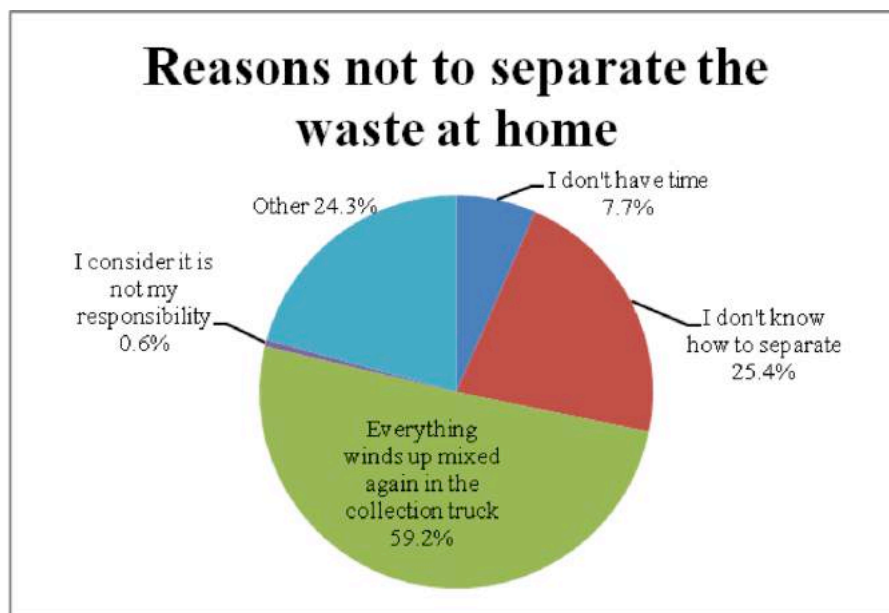


### Pregunta 3

¿Separan los residuos en casa?		
Opciones de respuesta	Porcentaje de respuesta	Contador de respuesta
Si	19.1%	39
No	81.9%	167
Pregunta respondida		204
Pregunta saltada		14

### Pregunta 4

Si su respuesta anterior fue No, ¿cuál es la razón?		
Opciones de respuesta	Porcentaje de respuesta	Contador de respuesta
No tengo tiempo	7,7%	13
No sé cómo separar los residuos	25,4%	43
Todo termina mezclado de nuevo en el camión de recogida	59,2%	100
Considero que no es mi responsabilidad	0,6%	1
Otro:	24,3%	41
Pregunta respondida		169
Pregunta saltada		49



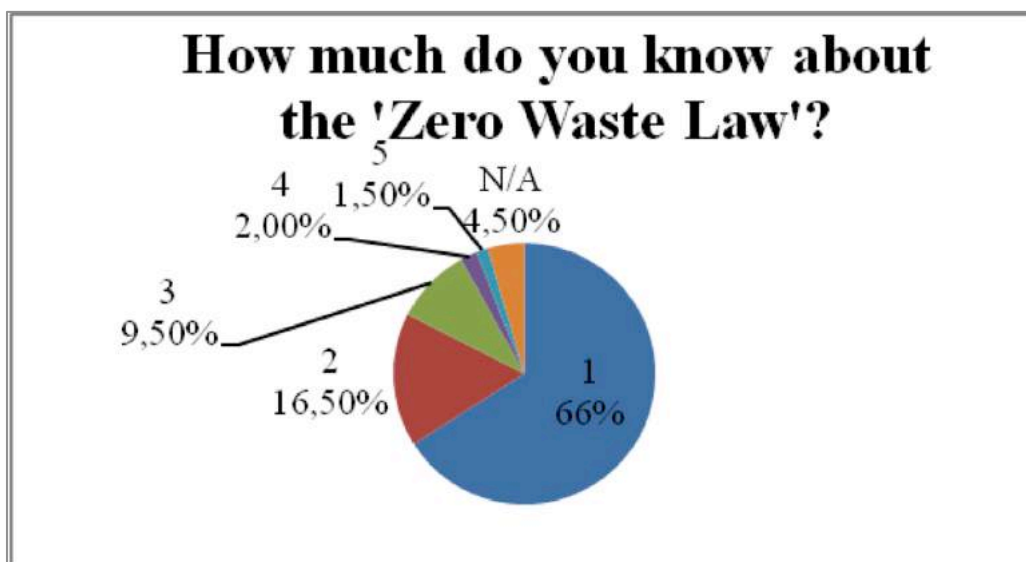
#### Pregunta 5

¿Qué sabe usted acerca del proceso de compostaje?		
Opciones de respuesta	Porcentaje de respuesta	Contador de respuesta
Entiendo el proceso y sé los diferentes tipos de compostaje	8,5%	17
Entiendo lo básico	34,5%	69
No sé nada sobre el proceso	57%	114
Pregunta respondida		200
Pregunta saltada		18



### Pregunta 6

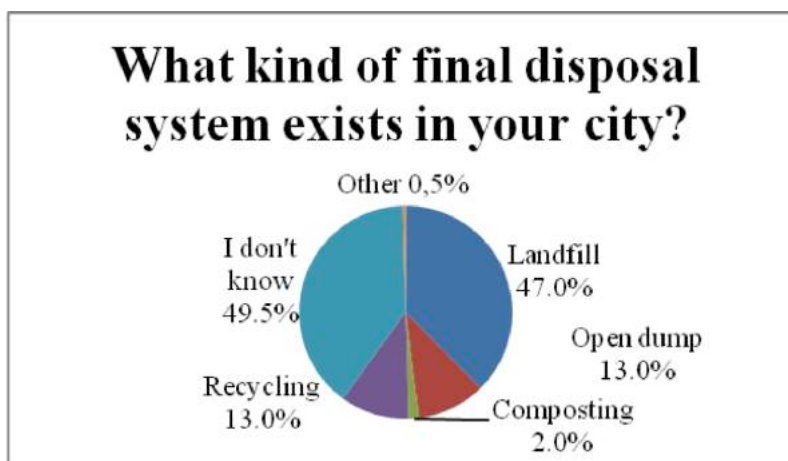
Por favor, conteste las siguientes preguntas (1 = Muy poco/muy pobre, 5 = Mucho/Excelente)								
Opciones de respuesta	1	2	3	4	5	N/A	Valoración media	Contador de respuesta
¿Cuánto sabe usted acerca del sistema de recogida de residuos en su ciudad?	68	57	45	25	3	2	2.18	200
¿Cómo calificaría este servicio?	28	58	71	30	2	11	2.58	200
¿Cuánto sabe usted acerca de la "Cero Ley de Residuos"?	132	33	19	4	3	9	1.50	200
¿Cómo calificaría usted que?	53	22	15	15	5	88	2.06	198
Si usted sabe, ¿cuál es la frecuencia de recogida? (Días, horas)								98
Preguntas respondida								200
Preguntas saltada								18



Código de referencia: 1 = Muy poco / muy mala; 5: Muchos / Excelente

### Pregunta 7

¿Qué tipo de sistema de disposición final existe en tu ciudad?		
Opciones de respuesta	Porcentaje de respuesta	Contador de respuesta
Vertedero	47%	94
Vertedero abierto	13%	26
Compostaje	2%	4
Reciclaje	13%	26
No lo sé	49,5%	99
Otros (especificar)	0,5%	1
Pregunta respondida		200
Pregunta saltada		18



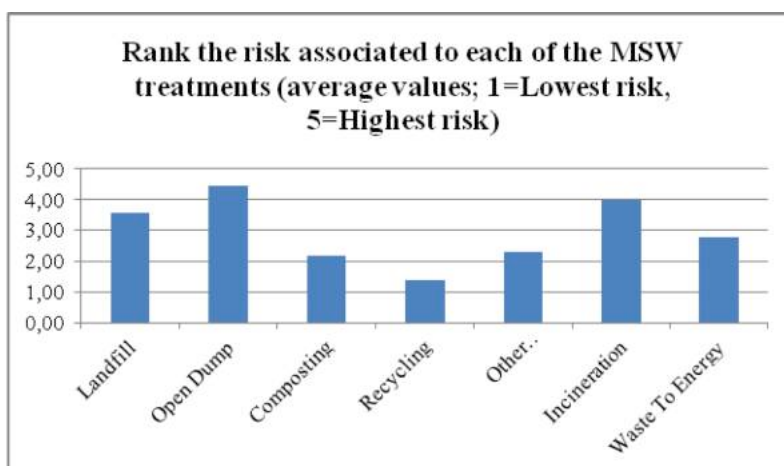
### Pregunta 8

¿Cuánto sabe usted de WTE?		
Opciones de respuesta	Porcentaje de respuesta	Contador de respuesta
No sé lo que es	44,7%	80
Escuché al respecto una vez	29,6%	53
Sé lo básico	24%	43
Estoy bien informado	3,4%	6

Si sabe, por favor explique brevemente	24
Pregunta respondida	179
Pregunta saltada	39

### Pregunta 9

Clasificar el riesgo asociado a cada uno de los siguientes tratamientos de residuos sólidos municipales							
Opciones de respuesta	1 = bajo riesgo	2	3	4	5 = mayor riesgo	Valoración media	Contador de respuesta
Vertedero	15	15	51	52	46	3,55	179
Vertedero abierto	4	5	18	31	121	4,45	179
Compostaje	57	57	51	7	7	2,16	179
Reciclaje	131	35	9	2	2	1,37	179
Otros tratamientos mecánicos o biológicos	35	81	44	11	8	2,31	179
Incineración	3	17	30	61	68	3,97	179
WTE	20	48	71	33	7	2,77	179
Comentarios							29
Pregunta respondida							179
Pregunta saltada							39





## REFERENCIAS AL ESTUDIO DE CASO DE ARGENTINA

---

<sup>68</sup> CIA factbook. Available from: [www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/index.html](http://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/index.html)

<sup>69</sup> ‘Estrategia Nacional Para La Gestión Integral de Residuos Urbanos’, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Ministerio de Salud y Ambiente, República Argentina. September 2005.

<sup>70</sup> ‘Dirección General de Sistemas de Información Geográfica’, Government of Buenos Aires. Further map details available at <http://mapa.buenosaires.gov.ar/>

<sup>71</sup> Wikipedia. Available at [http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Gran\\_Buenos\\_Aires.png](http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Gran_Buenos_Aires.png)

<sup>72</sup> ‘Estudio de Calidad de los Residuos Sólidos Urbanos 2009’, Insituto de Ingeniería Sanitaria Facultad de Ingeniería Universidad de Buenos Aires – CEAMSE, February 2010. Available at <http://ceamse.gov.ar/wp-content/uploads/2009/07/Resumen-Ejecutivo-ECRSU-2009.pdf>

<sup>73</sup> National Census of Population and Housing. Indec, ‘Instituto De Estadísticas y Censos’ 1991, 2001, 2010. Available at [www.idec.gov.ar](http://www.idec.gov.ar)

<sup>74</sup> Interview with Marcelo Rosso, Operation Manager of CEAMSE.

<sup>75</sup> Government of the City of Buenos Aires web-site. Available at [http://www.buenosaires.gov.ar/areas/med\\_ambiente/higiene\\_urbana/basura.php?menu\\_id=10630](http://www.buenosaires.gov.ar/areas/med_ambiente/higiene_urbana/basura.php?menu_id=10630)

<sup>76</sup> ‘Gestión Integral de Residuos, Reciclado y Cartoneo en Buenos Aires’, César Rodríguez. May 2010. Ed. Croquis.

<sup>77</sup> ‘Quality of the MSW 2009’ by the School of Engineering from the University of Buenos Aires and CEAMSE.

<sup>78</sup> [http://www.lanacion.com.ar/nota.asp?nota\\_id=1252975](http://www.lanacion.com.ar/nota.asp?nota_id=1252975)

<sup>79</sup> [Buenosaires.gov.ar/areas/medioambiente](http://Buenosaires.gov.ar/areas/medioambiente)

## 11. APLICACIÓN DE WTE EN ISLAS

### 11.1 INTRODUCCIÓN

Las islas miembros prestatarios del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) son las Bahamas, Barbados, República Dominicana, Haití, Jamaica y Trinidad y Tobago (Tabla 50). Tienen una población total de 24,4 millones de habitantes<sup>80</sup>, es decir, aproximadamente el 4% de la población de los 26 países miembros prestatarios del BID; una superficie total de 102.000 km<sup>2</sup> (0,5% de la superficie terrestre de los 26 países miembros prestatarios)<sup>80</sup>; un PIB de US\$ 164 millones (2,6% del PIB de los 26 países miembros prestatarios)<sup>80</sup>; y un PIB per cápita de US\$ 15.000 (frente a la media de US\$ 10.500 de los 26 países miembros prestatarios)<sup>80</sup>.

TABLA 50 ÁREA DE ISLAS DE MIEMBROS PRESTATARIOS DEL BID, POBLACIÓN Y EL PIB<sup>80</sup>

	<b>Zona (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Población (julio de 2011 est.)</b>	<b>PIB (miles de millones de US\$)</b>	<b>PIB/cápita (US\$)</b>
Bahamas	10.010	313.312	9	28.700
Barbados	430	286.705	6	21.800
República Dominicana	48.320	9.956.648	87	8.900
Haití	27.560	9.719.932	12	1.200
Jamaica	10.831	2.868.380	24	8.300
Trinidad y Tobago	5.128	1.227.505	26	21.200
Total	102.279	24.372.482	164	15.017 <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Promedio

Estos seis islas, junto con Belice y El Salvador (extensión territorial de 23.000 y 21.000 km<sup>2</sup>, respectivamente)<sup>80</sup> son los más pequeños de los 26 miembros prestatarios del BID. Este hecho puede implicar que estos países tienen un espacio limitado para vertederos y por lo tanto una necesidad más urgente de alternativas a los vertederos, como residuos a energía (WTE). Además, la economía de estas islas, con la excepción de Haití, dependen en gran medida de turismo; esto aumenta su necesidad de contar con sistemas avanzados de gestión de residuos, con el fin de estar limpias y seguir siendo atractivas para los turistas.

Otro factor que, en algunos casos, motiva islas para construir instalaciones de WTE es su falta de recursos energéticos. De los seis miembros islas prestatarios del BID, únicamente Barbados y Trinidad y Tobago tienen petróleo y gas natural. Barbados produce el 9% del petróleo que consume y Trinidad y Tobago produce más de lo que consume y exporta el resto<sup>80</sup>. Por otra parte, Bahamas, Barbados y Trinidad y Tobago, son los países miembros prestatarios con el mayor PIB per cápita, lo que podría significar que tienen mejores posibilidades de construir una instalación WTE.

Este estudio demostró que las otras dos islas en el Caribe, Martinica y St. Barth, y también las Bermudas en el Atlántico norte, ya han construido plantas WTE debido a la falta de espacio y el

deseo de mejorar sus sistemas de gestión de residuos. Jamaica también tiene planes para construir dos plantas WTE con el fin de mejorar su sistema de gestión de residuos y aumentar sus fuentes autóctonas de energía; También, en junio de 2010, el gobierno de Barbados hizo una invitación para la cualificación de las empresas que pueden construir y operar una planta WTE<sup>81</sup>.

En la siguiente sección, se presentan los casos de las Bermudas, Martinica y St. Barth, con el objetivo de ilustrar cómo estas islas evolucionaron al sistema WTE, como ejemplo para otros países insulares que son países miembros del BID. Sin embargo, es importante mencionar que estas tres islas han tenido la ventaja de ser territorios de ultramar de Francia e Inglaterra, países con recursos económicos y experiencia en la implementación de WTE.

Después de explorar los casos Bermudas, Martinica y St. Barth, se presenta una descripción de la situación de residuos de Jamaica y los planes para una WTE, también como un ejemplo para otros países miembros prestatarios del BID.

---

## 11.2 BERMUDAS

---

Bermuda es un territorio autónomo de ultramar del Reino Unido. Es un archipiélago formado por 138 islas pequeñas (las siete más grandes conectadas por puentes), que comprenden una superficie total de tierra de 53 km<sup>2</sup>. Se encuentra en el Océano Atlántico Norte, a 1.000 km al sureste de Carolina del Norte, EE.UU.. Tiene una población de 68.000 (2010 est.<sup>80</sup>), y una densidad de población de aproximadamente 1.300 personas/km<sup>2</sup>; Bermuda es en realidad el séptimo país más densamente poblado del mundo (2008<sup>82</sup>). El PIB per cápita de las Bermudas en 2009 fue de US\$ 86.758<sup>83</sup>, uno de los más altos del mundo. Los principales contribuyentes al PIB son los negocios internacionales (tales como seguros y reaseguros) y la intermediación financiera (que representa más del 70% del PIB). El turismo también es importante para la economía, a pesar de que ha disminuido ligeramente en los últimos años. Agricultura y la industria manufacturera hacen sólo pequeñas contribuciones a la economía, que depende altamente de la importación de bienes y prestación de servicios.

La cantidad de residuos generados en las Bermudas se informó en un rango entre 80.000<sup>84</sup> y 100.000 toneladas/año<sup>85</sup>, es decir, entre 1,17 y 1,46 ton/cápita/año. Y tiene un poder calorífico que oscila estacionalmente entre 9 a 11 MJ/kg<sup>86</sup>. La cantidad de residuos per cápita y el valor calorífico son altos, debido al turismo y el hecho de que las Bermudas importa el 85% de los artículos que consumen los locales; además, las importaciones tienen que estar bien embaladas (principalmente utilizando plásticos) con el fin de llegar en buenas condiciones al archipiélago. La Figura 64 muestra la composición de los residuos domiciliarios en 2000.

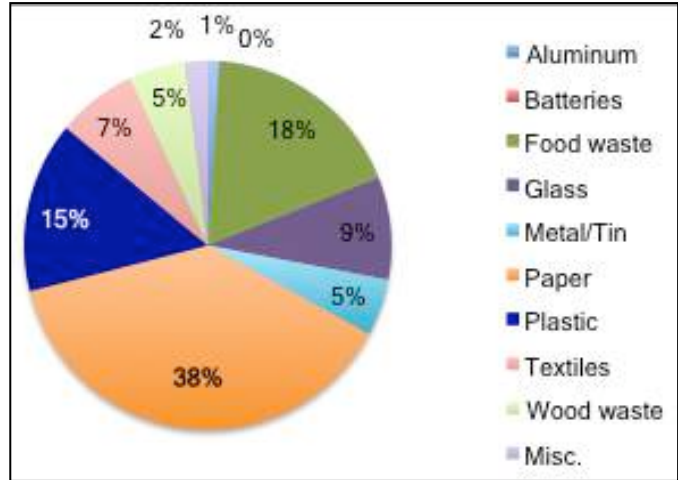


FIGURA 64 COMPOSICIÓN DE LOS RSU DE LAS BERMUDAS (2000)<sup>75</sup> (EEC)

En el pasado, los RSU se disponían en el basurero de Pembroke, que recibió alrededor del 80% de los residuos de la isla. En 1975, este vertedero estaba alcanzando su capacidad máxima y una planta de trituración se instaló para extender su vida útil. Sin embargo, era evidente que el vertedero tenía una vida muy corta. Por lo tanto, en 1977, el Gobierno decidió reemplazarlo con una instalación de conversión de residuos en energía. En 1987, Von Roll Ltd. de Suiza, fue el encargado de construir esta instalación WTE de combustión de parrilla. La construcción comenzó en 1991 y la planta comenzó a operar a finales de 1994. El coste de la instalación (capacidad nominal: 96.000 toneladas) fue de US\$ 70 millones<sup>87</sup> y fue financiado en su totalidad por el Gobierno de las Bermudas. El vertedero de Pembroke cerró después de la apertura de la instalación WTE (llamada "Instalación Tynes Bay de Tratamiento de Residuos") y la mayor parte se utiliza para el compostaje en pilas de desechos verdes ("de patio") y se llama la Instalación Marsh Folly para el Compostaje.



FIGURA 65 INSTALACIÓN TYNES BAY DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS<sup>87</sup> (EEC)



La planta de conversión de residuos en energía Tynes Bay se compone de dos líneas, cada una capaz de incinerar 6 toneladas/hr., y producir un total de 3,6 MW de electricidad<sup>87</sup>. En promedio, en el período 2000-2009, esta instalación quemó 68.000 toneladas de residuos por año<sup>88</sup>. Los residuos incinerados se componen de residuos domiciliarios ( $\approx 35\%$ ), residuos comerciales ( $\approx 45\%$ ), y residuos de madera ( $\approx 20\%$ ). La instalación produce cerca de 18.000 MWh<sup>88</sup> de electricidad por año que corresponde al 2,7% del consumo de electricidad del país. Aproximadamente el 40% de la electricidad producida se consume por la instalación WTE y para ejecutar una planta de desalinización por ósmosis inversa y el restante 60% se vendió a Bermuda Electric Light Company Limited (BELCO). En promedio, 160 kWh se exportaron a la red por tonelada de desechos quemados. El tiempo en línea para la planta de WTE era 6.660 horas/año<sup>88</sup>. Actualmente, mayores volúmenes de residuos han dado lugar a una menor producción de electricidad, debido al hecho de que la instalación no tiene la capacidad de utilizar el calor extra, pero requiere más energía para procesar los residuos adicionales. La instalación Tynes Bay está planeando la renovación de las dos líneas existentes y ampliar la capacidad de la planta mediante la adición de una tercera línea, más eficiente.

Con respecto al control de las emisiones, la instalación tiene que ser permitida anualmente por la Autoridad Ambiental de las Bermudas. Se elimina el material particulado (99%) de los gases de combustión utilizando precipitadores electrostáticos. Se controlan las emisiones de monóxido de carbono, dióxido de azufre y cloruro de hidrógeno para cumplir con los límites establecidos. Las emisiones WTE reportados en 2009 se muestran en la Tabla 51. Las emisiones de dioxinas son mucho mayores que para los límites de la U.E. y EE.UU. ( $0,1 \text{ ng TEQ/Nm}^3$ ), lo que indica un sistema inadecuado para la inyección de carbón activado.

TABLA 51 EMISIONES DE CHIMENEAS<sup>88</sup>

Contaminante	Unidades (11% de O <sub>2</sub> )	Real	Estándar de Bermuda
Material particulado	Mg/Nm <sup>3</sup>	33	35
Monóxido de carbono	Mg/Nm <sup>3</sup>	8	80
Cloruro de hidrogeno	Mg/Nm <sup>3</sup>	351	1.200
Dióxido de azufre	Mg/Nm <sup>3</sup>	20	200
Dioxinas y furanos (EQT)	ng/Nm <sup>3</sup>	4	1

Los metales ferrosos son eliminados de la ceniza de fondo con un separador magnético, y la ceniza restante se mezcla con cemento para formar bloques de hormigón de un metro cúbico y dos toneladas que se utilizan para la protección de la costa y la recuperación de tierras en el aeropuerto de Bermuda. En promedio, se recuperaron 1.000 toneladas/año de metales y se produjeron 11.700 m<sup>3</sup> de cubos de hormigón de ceniza para el período de 2007 a 2009<sup>88</sup>. De acuerdo con el Ministerio de Medio Ambiente, "los estudios realizados por el Laboratorio Bentónica en la Estación de Investigación Biológica de Bermudas (Bermuda Biological Station for Research, (BBSR))" han

demostrado que los bloques de ceniza se mantienen relativamente estables cuando se colocan en el medio marino con poco o ningún efecto adverso sobre los organismos marinos<sup>85</sup>.

Bermuda incinera aproximadamente el 80% de los residuos generados, composta alrededor del 15%, y vierte sólo objetos voluminosos (por ejemplo, automóviles, neumáticos, unidades de A/C) y residuos especiales (por ejemplo, baterías). La tasa de reciclaje es todavía baja, pero el gobierno está tratando de aumentar la tasa a través de programas educativos.

La instalación de las Bermudas WTE ha operado con éxito durante 17 años. Era una solución para la gestión de su alto volumen de residuos en un espacio tan limitado y fue posible gracias a la financiación del Gobierno. Es pertinente mencionar que las Bermudas pasó de disponer los residuos en un vertedero no sanitario a WTE, sin el paso intermedio normalmente recomendado de depósito en vertederos sanitarios.

### 11.3 MARTINICA

Martinica es parte de las Islas de Barlovento, una región de ultramar de Francia situada en el Caribe, al sureste de la isla de Dominica. Ocupa una superficie de 1.100 km<sup>2</sup><sup>89</sup>, con una población de 403.000<sup>90</sup>, y una densidad de población de 366 personas/km<sup>2</sup>. El PIB de Martinica en 2009 fue de US\$ 24.900<sup>91</sup> per cápita. La economía se basa principalmente en el turismo y servicios.

Los residuos generados en Martinica se estiman en 370.000 toneladas/año, es decir, alrededor de 0,92 toneladas/cápita<sup>92</sup>. La composición de los residuos sólidos se muestra en la Figura 66.

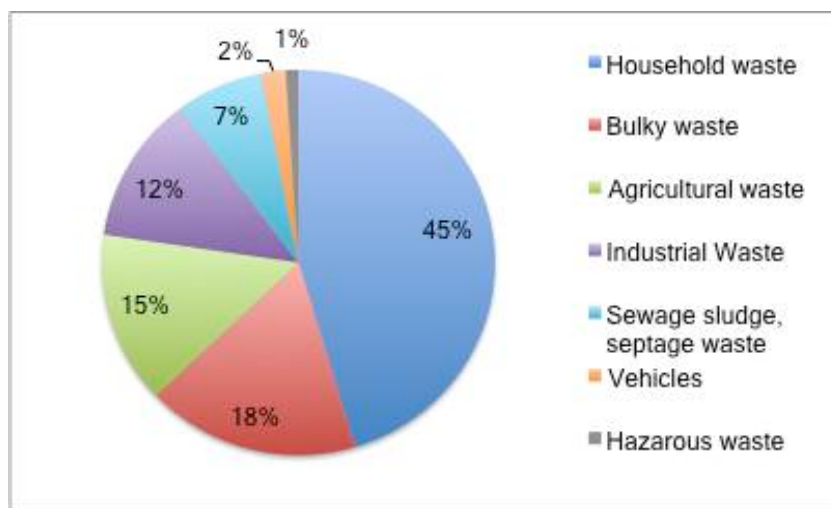


FIGURA 66 FUENTES DE RESIDUOS EN MARTINICA<sup>92</sup> (EEC)

La gestión de residuos es responsabilidad de cuatro entidades públicas: CACEM (Communauté d'Agglomération du Centre de la Martinique), CCNM (Communauté de Communes du Nord

Martinique), CAESM (Communauté d'Agglomération de l'Espace Sud de la Martinique), and SMITOM (Syndicat Mixte pour le Traitement des Ordures Ménagères de la Martinique).

La isla cuenta con las siguientes instalaciones para la eliminación de sus residuos: Tres vertederos no sanitarios, tres rellenos sanitarios regulados abiertos, dos estaciones de transferencia (con 5 adicionales previstas), una instalación de compostaje de digestión anaeróbica capaz de recibir 20.000 toneladas/año de residuos orgánicos, y una instalación de WTE (Figura 67).

La planta de WTE inició operaciones en 2002 y fue desarrollada por CACEM para el tratamiento de los residuos de sus cuatro municipios. La capacidad de la planta es de 112.000 toneladas/año<sup>93</sup> (es decir, el 30% de los residuos de la isla) y que incluye 600 toneladas de desechos médicos. La instalación consta de dos líneas de combustión de parrilla de 7 toneladas/hora cada una y su disponibilidad reportada es de 8.000 horas/año (90%)<sup>93</sup>. El valor calorífico de los residuos recibidos en la instalación varía de 4.2 a la 8.4 MJ/kg<sup>93</sup> y la planta proporciona la red 40.000 a 45.000 MWh/año<sup>93</sup> de electricidad (4% del consumo eléctrico de Martinica).



FIGURA 67 LA PLANTA WTE MARTINICA<sup>94</sup> (CEE)

Las cenizas de fondo son transportadas a una unidad donde se recogen metales ferrosos y no ferrosos. La ceniza se separa primero a una fracción fina (0-40 mm.) y una fracción gruesa (40 a 200 mm). Los metales ferrosos se separan magnéticamente de ambas corrientes. Partículas carbonosas muy ligeras se separan de la fracción gruesa por clasificación por aire y se devuelven al horno para la combustión completa. La fracción fina se hace pasar a través de un separador de corriente de Foucault para extraer metales no ferrosos para reciclaje (200 toneladas recuperadas/año<sup>95</sup>). La ceniza "clinker" restante se almacena durante tres meses para curar y luego se utiliza para la construcción de carreteras (22.000 toneladas/año<sup>93</sup>).

El sistema de control de contaminación atmosférica incluye la inyección de urea para reducir los niveles de NOx, lavado de cal para eliminar gases ácidos, inyección de carbón para eliminar los

metales volátiles y dioxinas (a menos de 0,1 ng TEQ/Nm<sup>3</sup>), y filtros de tela de la cámara de filtros para eliminar material particulado. La ceniza volante que contiene los contaminantes atrapados en la cámara de filtros se envía a Francia, donde se estabilizan y neutralizan (3.000 toneladas/año<sup>93</sup>). La instalación fue diseñada para cumplir con las normas de emisión holandesas (Tabla 52), que en 2002 fueron inferiores a las normas francesas (por ahora son las mismas).

TABLA 52 EMISIONES GARANTIZADAS<sup>95</sup>

Contaminación	Máximo garantizada	Estándares franceses (2002)	Estándares holandeses (2002)
Dioxinas (EQT ng/Nm <sup>3</sup> )	0,1	1	0,1
HF (mg/Nm <sup>3</sup> )	0,8	1	1
Hg (mg/Nm <sup>3</sup> )	0,5	0,5	0,5
SO <sub>2</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> )	20	50	40
HCl (mg/Nm <sup>3</sup> )	10	10	10
PM (mg/Nm <sup>3</sup> )	5	10	5

El costo de la planta Martinica WTE era cercano a US\$ 74 millones<sup>93</sup>. Los cuatro municipios de la CACEM financiaron el 10% del proyecto; el otro 90% fue proporcionado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional, la Agencia del gobierno francés de Medio Ambiente y Gestión de la Energía (ADEME), el Gobierno Francés, y el Consejo Regional y el Consejo General de Martinica. Un consorcio de CGEA-ONYX, Vinci Environment, CT Environment, y SOGEA Martinique construyeron las instalaciones y las empresas SEEN y ONYX la están operando.

La planta Martinica WTE ha funcionado con éxito durante casi nueve años. Fue posible gracias a la financiación proporcionada por Francia y por la Unión Europea. Debe tenerse en cuenta que una gran parte de los RSU de Martinica todavía se disponen en rellenos sanitarios y también no sanitarios.

#### 11.4 ST. BARTH

San Bartolomé (San Barth) es parte de las Indias Occidentales francesas. Tiene una superficie de 21 km<sup>2</sup>, una población de 7.406 (2010 est.<sup>80</sup>), y una densidad de población de 353 personas/km<sup>2</sup>. El PIB de St. Barth se estima en US\$ 35.100 por capita<sup>91</sup>; la economía de la isla se basa en el turismo y el comercio de lujo libre de impuestos. La isla tiene recursos limitados de agua dulce e importa casi todos sus alimentos, energía y la mayoría de sus bienes manufacturados.

St. Barth tiene un centro de WTE que trata casi todos los residuos sólidos de la isla. Esta planta se acopla con una planta de desalinización térmica (Destilación de Efectos Múltiples). No hay mucho reciclaje antes de traer los RSU a la WTE, pero una campaña ha comenzado a promover cierta

separación en origen de los materiales reciclables. La idea es separar: basura, papel/cartón, botellas de plástico/contenedores y otros materiales combustibles que se envían a la planta WTE; vidrio para ser pulverizado y luego utilizado para crear sub-estratos para la pavimentación de carreteras, tapizado para tuberías de agua y filtros de agua para piscinas; aluminio y otros metales exportados para su reciclado; y baterías que se enviarán a Guadalupe para su eliminación o reciclaje.



FIGURA 68 PLANTA WTE DE ST. BARTH<sup>94</sup> (EEC)

La planta de desalinización-WTE comenzó a funcionar en 2001 con el doble objetivo de mejorar el sistema de gestión de residuos de la isla y la satisfacción de las necesidades de agua dulce durante la temporada alta de turismo; fue construida y es propiedad de la empresa de gestión de residuos francés, Groupe TIRU. El proceso WTE utilizado es de combustión con recuperación de energía en un horno oscilante Cyclorige que procesa 1,5 toneladas/hora. Su capacidad anual es de 9.000 toneladas<sup>96</sup>, y la cantidad de vapor entregado permite la producción de 1.200 - 1.720 m<sup>3</sup> de agua potable al día<sup>97</sup>. Tiru informó<sup>98</sup> que en 2008 y 2009, se incineraron 9.762 y 9.038 toneladas de residuos, respectivamente; y que la cantidad de energía (en forma de calor) que se vendió en esos dos años fue de 20.666 MWh, y 19.876 MWh, respectivamente. Las fuentes de desechos quemados en 2009 se muestran en la Figura 69.

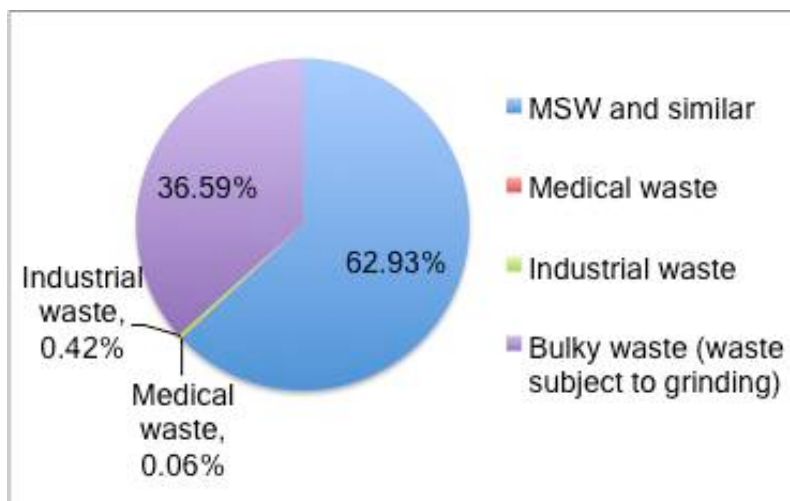


FIGURA 69 FUENTES DE RESIDUOS EN ST. BARTH (2009)<sup>98</sup> (CEE)

Las emisiones notificadas de las instalaciones de WTE en 2009 se muestran en la Tabla 53.

TABLA 53 EMISIONES 2009<sup>98</sup>

Contaminación	Promedio de la emisión	Límite regulador
Las dioxinas (EQT ng/Nm <sup>3</sup> )	0,003	0,1
NO <sub>x</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> )	226	400
SO <sub>2</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> )	2,65	50
HCl (mg/Nm <sup>3</sup> )	3,93	10
PM (mg/Nm <sup>3</sup> )	2,57	10

Los residuos de cenizas procedentes de la instalación WTE se transportan a Guadalupe para el depósito en vertederos. La cantidad de agua desalada por la planta acoplada proporciona aproximadamente el 40%<sup>97</sup> de la demanda de agua de la isla; una planta de desalinización por ósmosis inversa suministra el resto.

Al igual que en el caso de Martinica, la planta WTE de St. Barth ha estado funcionando durante casi diez años y fue posible gracias a la financiación y el "know-how" de Francia. Es importante tener en cuenta que, además de la instalación de WTE, St. Barth no tiene otra forma legal de eliminar residuos. Todo lo que no se envía a la planta WTE, o bien se vierte ilegalmente o se quema, o es enviado a Guadalupe para el depósito en vertederos. También vale la pena señalar que la WTE se realizó debido a la doble necesidad de la gestión de residuos y desalar agua de mar.

## 11.5 JAMAICA

Jamaica es una isla del Caribe ubicada al sur de Cuba y al oeste de Haití. Tiene una población de 2,9 millones<sup>99</sup>, un área de unos 10.831 km<sup>2</sup>, y una densidad de población de 246 personas/km<sup>2</sup>. El

PIB per cápita en 2010 fue de U \$ 4.700 al tipo de cambio oficial, y US\$ 8.300, teniendo en cuenta la paridad de poder adquisitivo<sup>81</sup>. Los principales contribuyentes al PIB (más del 50%) son las industrias de servicios (por ejemplo, finanzas, bienes raíces, turismo). Las principales fuentes de divisas para el país son el turismo y la minería de bauxita (alúmina).

Jamaica importa 91% de su energía (combustibles derivados del petróleo), y genera el 9% restante a partir de fuentes renovables (solar, minihidráulica, eólica y biomasa). El Gobierno de Jamaica ha fijado como objetivo generar el 20% de la energía consumida a partir de fuentes renovables para el año 2030, como parte de su plan de desarrollo "Visión 2030 Jamaica"; Petroleum Corporation of Jamaica (PCJ) es responsable de la planificación y la construcción de dos plantas de conversión de residuos en energía.

La cantidad de residuos sólidos urbanos (RSU) generados en Jamaica se estima entre 1,2 y 1,4 millones de toneladas/año (0,44 a 0,52 toneladas/cápita<sup>100,101</sup>). Se estima que 70% de los residuos generados es residencial, 20% comercial, y 10% industrial. La Autoridad Nacional de Gestión de Residuos Sólidos (National Solid Waste Management Authority, (NSWMA)) es el organismo responsable de la gestión (recogida, transporte, almacenamiento, reciclaje, reutilización y eliminación) de los residuos sólidos en Jamaica. En 2006, este organismo llevó a cabo un estudio de caracterización de los residuos y los resultados se muestran en la Figura 70.

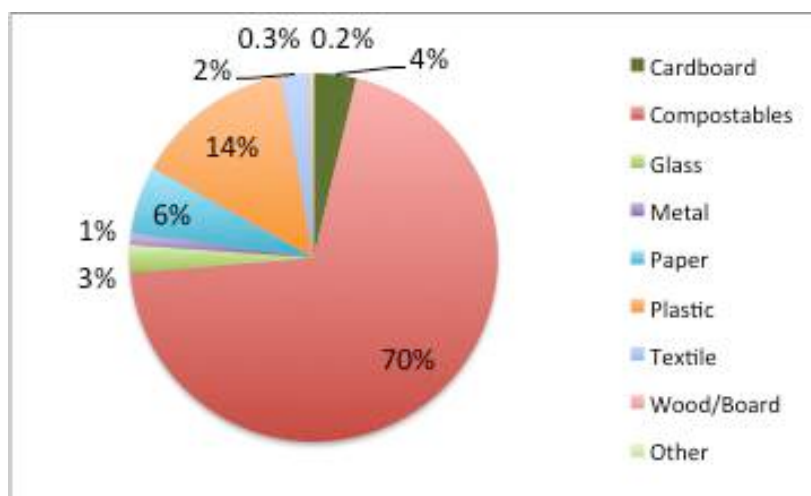


FIGURA 70 CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS DE JAMAICA<sup>102</sup> (EEC)

En 2010, NSWMA estimó que el 70% -75% de los residuos se recolectan<sup>102</sup> mientras que el resto se quema, entierran o vertidos en lotes abiertos o barrancos. El costo medio de recogida y eliminación de residuos en la isla se estimó en US\$ 100/tonelada<sup>102</sup>.

Hay muy poco reciclaje en Jamaica. Hay un poco de reciclaje de vidrio y algunas empresas privadas recogen papel, botellas de PET y chatarra para exportación, principalmente proporcionados de reciclaje informal. El único punto brillante es la recogida de chatarra por los carroñeros, ya que está bien pagado y las exportaciones alcanzaron un valor de US\$ 100 millones en 2009<sup>102</sup>. Esto tiene la ventaja de fomentar el reciclaje de metales, pero también ha creado el problema de robo de metales de la infraestructura de la isla, tales como señales de tráfico y tapas de desagüe. Debido a este tipo

de incidentes, el 28 de abril de 2010, el Gobierno emitió una prohibición sobre el comercio de chatarra, con exclusión de la chatarra primaria generada por los fabricantes<sup>103</sup>.

NSWMA ha dividido Jamaica en cuatro "wastesheds" a efectos de la gestión de residuos (Figura 71).

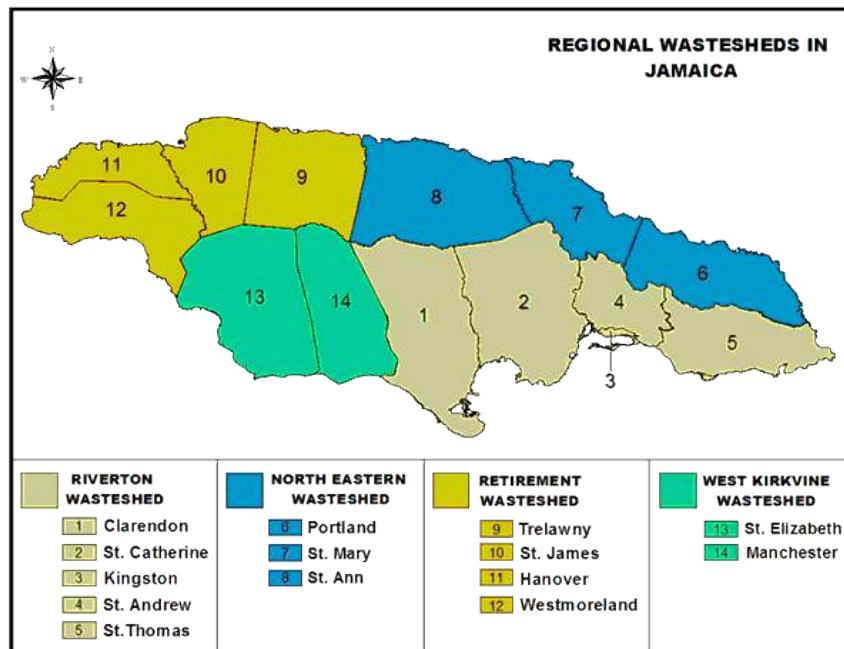


FIGURA 71 WASTESHEDS DE JAMAICA<sup>104</sup> (CEE)

Jamaica cuenta con un total de ocho sitios de disposición, ninguno de los cuales es un relleno sanitario. Los sitios seleccionados para las plantas WTE propuestas están cerca de los dos principales lugares de eliminación. Estos son Riverton en la Parroquia de Santa Catalina (en el N° 2



de la Figura 71); y Retirement, en la Parroquia de St. James (No.10). Riverton recibe el 60% de los residuos de la isla y se espera que alcance su capacidad máxima en 2014<sup>102</sup>. Se han hecho algunas mejoras en el vertedero de Riverton (construcción de caminos de acceso, equipos de relleno sanitario, instalación de iluminación, y construcción de oficinas administrativas). Además, hay planes para construir un relleno sanitario adyacente a la misma, pero el proyecto se suspendió debido a la falta de fondos. El vertedero de Retirement está cerca de dos minas de arena, y recibe residuos principalmente de residencias y hoteles, que representan alrededor del 20% de los RSU de la isla.

La instalación proyectada WTE cerca de Riverton recibirá 545.000 toneladas de residuos y tendrá el potencial de generar 45 MW de electricidad<sup>105</sup>. La planta WTE cerca de Retirement recibirá 219.000 toneladas de residuos, y generará 20 MW<sup>100</sup>. Por lo tanto, en total, las dos instalaciones procesan 764.000 toneladas de residuos (55% -60% del total de RSM de la isla) y producen un total de 65 MW de electricidad. Dado que se espera que las plantas funcionen aproximadamente 7.150 horas/año<sup>100,105</sup>, proporcionarán 465.000 MWh a la red, lo que equivale a alrededor del 7% del consumo eléctrico de Jamaica.

Petroleum Corporation of Jamaica (PCJ) ya ha invitado ofertas y seleccionado la empresa con sede en Miami, Cambridge Project Development Company Inc., para formar una empresa conjunta con PCJ. La empresa conjunta va a financiar, construir, poseer y operar las dos instalaciones WTE. En la actualidad, las partes involucradas en este proyecto están negociando y el esquema de financiación propuesto es una asociación pública y privada y un crédito bancario por el 80% del costo de capital. Los ingresos propuestos para estas dos instalaciones serán la venta de electricidad a través de un acuerdo de compra de energía con el Servicio Público de Jamaica, y una tarifa aplicada que se negociará con NSWMA.

Este proyecto aún no se ha implementado, pero es interesante observar, que como en los casos de las islas discutidos anteriormente, si se materializa Jamaica avanzará de vertederos no sanitarios a WTE sin el paso intermedio del depósito en vertederos sanitarios, y también con la ventaja de tener un sistema de recogida relativamente organizado. También hay que señalar que a pesar de que la mejora del sistema de gestión de residuos de Jamaica es un objetivo importante del proyecto, la motivación principal para la construcción de las dos instalaciones WTE es aumentar las fuentes autóctonas de energía.

## 11.6 CONCLUSIONES DE LA APLICACIÓN DE WTE EN LAS ISLAS

---

Las islas tienen cantidades crecientes de residuos, espacio limitado, fuentes de energía muy limitadas o inexistentes, y en algunos casos, recursos de agua dulce insuficientes. Estas condiciones conducen a oportunidades para avanzar del vertido a WTE.

En todos los casos analizados en este estudio, el uso de vertederos para la eliminación de residuos es, o solía ser, la práctica común. Los gobiernos son ahora conscientes de las consecuencias ambientales de tales prácticas y están tratando de mejorar sus sistemas de gestión de residuos.

Por lo general se recomienda mejorar un sistema de gestión de residuos un paso a la vez, es decir, pasar de vertederos a rellenos sanitarios y luego a los residuos en energía. Sin embargo, es interesante notar que en algunas islas, omiten la etapa de vertido regulado, y fueron directamente de vertederos a WTE. Este fenómeno puede atribuirse en parte a la escasez de tierra y en parte a la

conveniencia de desarrollar fuentes de energía locales y renovables. Por lo tanto, WTE representaba una solución para el problema de los residuos de la isla y también alivió la carga en el frente de la energía.

La Tabla 54 presenta un resumen del PIB y la generación de residuos per cápita de las cuatro islas discutidas en esta sección.

TABLA 54 PIB Y GENERACIÓN DE RESIDUOS PER CÁPITA

<b>Isla</b>	<b>PIB per cápita (US\$)</b>	<b>Generación de residuos per cápita (toneladas/año)</b>
Bermudas	86.758	1,46
Martinica	24.908	0,92
St. Barth	35.100	1,22
Jamaica	8.500	0,52

Las tres islas en las que se aplicó con éxito WTE (Bermudas, Martinica y St. Barth) tienen una mayor tasa de generación de residuos y también un mayor PIB per cápita que Jamaica. De hecho, todos los miembros insulares del BID tienen un PIB per cápita inferior al de estas islas, con la excepción de Bahamas, que tiene un PIB per cápita superior a Martinica, y teniendo en cuenta que las Bermudas tiene uno de los PIB más altos en el mundo. Sin embargo, estas tres islas son territorios de naciones altamente desarrolladas con larga experiencia en los beneficios de WTE. Por lo tanto, el gobierno local tenía a su disposición el "know-how" y los recursos económicos de la metrópoli.

La construcción de una instalación de WTE en un país en desarrollo puede ser complicado ya que la nación puede tener otras prioridades antes de la gestión de residuos. Además, en el caso de las islas en las que el uso de vertederos sigue siendo el método principal de eliminación de residuos, las tarifas de descarga son bajas o inexistentes; por lo tanto, la alternativa WTE parece ser muy costosa. Por lo tanto, es muy importante asegurarse de que la WTE propuesta será muy eficiente energéticamente y que la electricidad y vapor "residual" se utilizan para proporcionar una fuente autóctona y renovable de energía.

## REFERENCIAS A LA APLICACIÓN DE WTE EN ISLAS

---

<sup>80</sup> CIA – The World Factbook. Available from: [www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/](http://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/)

<sup>81</sup> UK Trade and Investment. Available from: [www.ukti.gov.uk/export/countries/asiapacific/neareast/israel/localisation/112756.html](http://www.ukti.gov.uk/export/countries/asiapacific/neareast/israel/localisation/112756.html)

<sup>82</sup> The World Bank, “Population density”, (accessed January 23, 2011). Available from <http://data.worldbank.org>

<sup>83</sup> Government of Bermuda, Department of Statistics, *Facts and Figures 2010*. December 2010.

<sup>84</sup> Sustainable Development (Government of Bermuda), “Waste volumes”, (accessed January 23, 2011). Available from <http://www.sdbermuda.bm/case-studies/waste-volumes>

- <sup>85</sup> Government of Bermuda, Ministry of the environment, “State of the Environment Report”, 2005.
- <sup>86</sup> Government of Bermuda, Ministry of Energy, Telecommunications and E-Commerce, *Energy Green Paper, A National Policy Consultation on Energy*. February 6, 2009.
- <sup>87</sup> Tynes Bay Waste Treatment Facility (accessed Jan 25, 2011). Available from <http://www.rossgo.com/Tynes%20Bay/Incinerator.html>.
- <sup>88</sup> Government of Bermuda, Ministry of Works and Engineering, “Tynes Bay Waste Treatment Facility Annual Environmental Report”, 2005, 2007, 2008, and 2009
- <sup>89</sup> Official Website of The Martinique Tourism Authority (accessed February 7, 2011). Available from <http://www.martinique.org>
- <sup>90</sup> UNdata, Martinique (accessed February 7, 2011). Available from <http://data.un.org/CountryProfile.aspx?crName=Martinique>
- <sup>91</sup> National Institute of Statistics and Economic Studies, France. Available from <http://www.insee.fr/fr/regions/martinique/default.asp>
- <sup>92</sup> Conseil General de la Martinique, “Agenda 21 Martinique : axes stratégiques et orientations 2007 – 2013”. Available from [http://www.cg972.fr/site/telechargement/pdf/agenda21\\_gestion\\_dechets.pdf](http://www.cg972.fr/site/telechargement/pdf/agenda21_gestion_dechets.pdf)
- <sup>93</sup> Communauté d'Agglomération du Centre de la Martinique, “L'Unité de Traitement et de Valorisation des Déchets” (WTE information brochure).
- <sup>94</sup> Power Plants Around the world. Available from <http://www.industcards.com/wte-other.htm>
- <sup>95</sup> Waste Management Martinique (accessed February 8, 2011). Available from <http://tpelac.e-monsite.com>
- <sup>96</sup> Groupe Tiru website (accessed February 5, 2011). Available from <http://www.tiru.fr/spip.php?article99>
- <sup>97</sup> St. Barth Tourism website (accessed February 5, 2011). Available from [http://www.saintbarth-tourisme.com/page\\_articles\\_us.php/water\\_production\\_st\\_barth.html](http://www.saintbarth-tourisme.com/page_articles_us.php/water_production_st_barth.html)
- <sup>98</sup> Groupe Tiru, “Saint-Barthelemy Indicator sheet” (accessed January 25, 2011). Available from <http://www.tiru.fr/IMG/pdf/stbarthelemy.pdf>
- <sup>99</sup> Statistical Institute of Jamaica (accessed January 25, 2011). Available from <http://stainja.gov.jm>
- <sup>100</sup> Jamaica Petroleum Corporation, “Western Renewables Waste to Energy Thermal Treatment Plant – Project Brief 1”. 2010.

<sup>101</sup> Smith, Ianthe, National Solid Waste Management Authority, “The National Solid Waste Management Authority Purpose & Scope of Work”, May 11, 2003.

<sup>102</sup> Government of Jamaica, Ministry of Energy and Mining, “National Energy-from-Waste Policy 2010-2030”. October 4, 2010 (Draft).

<sup>103</sup> Jamaica Information Service, “Ban on Scrap Metal Trade”, April 26, 2010 (accessed January 29, 2011). Available from [http://www.jis.gov.jm/news/107-industry-investment-commerce/23742-commerce\\_science-ban-on-scrap-metal-trade](http://www.jis.gov.jm/news/107-industry-investment-commerce/23742-commerce_science-ban-on-scrap-metal-trade)

<sup>104</sup> National Solid Waste Management Authority (accessed January 29, 2011). Available from <http://www.nswma.gov.jm/about.htm>

<sup>105</sup> Jamaica Petroleum Corporation, “Eastern Renewables Waste to Energy Thermal Treatment Plant – Project Brief 2”. 2010.

## LISTA DE ACRÓNIMOS UTILIZADOS

ACI: Inyección de carbono activado para eliminar las moléculas orgánicas e inorgánicas a partir de gas de proceso, Activated Carbon Injection

AF: Combustibles alternativos (“Alternative Fuels”)

ALC: América Latina y el Caribe

APC: Sistema de Control de Contaminación del aire utilizado para limpiar el gas de proceso WTE, Air Pollution Control

BID: Banco Interamericano de Desarrollo (patrocinador de esta Guía WTE)

C&D: Desechos de construcción y demolición, Construction and Demolition debris

EEC: Earth Engineering Center de Columbia ([www.eecny.org](http://www.eecny.org)), autor de la guía WTE

EF: Combustible desarrollado (“Engineered Fuel”)

GEI: Gases de Efecto Invernadero (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, etc.) contribuyendo al calentamiento global y cambio climático observado (patrocinador de esta Guía WTE)

MDL: Mecanismo de Desarrollo Limpio

MRF: Centro de Recuperación de materiales (“Materials Recovery Facility”)

OCDE: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico

PCI: Poder Calorífico Inferior de un combustible, no incluye el calor de condensación del vapor de agua en los gases de combustión.

PIB: Producto Interno Bruto

PPA: Acuerdo de Compra de Energía, (Power Purchase Agreement)

RDF: Combustible derivado de residuos (“Refuse Derived Fuel”)

RSU: Residuos Sólidos Urbanos; todos los residuos sólidos que se generan en una ciudad, con la excepción de C&D.

SCR: Reducción catalítica selectiva de compuestos de NO<sub>x</sub> en el gas de proceso WTE

SNCR: Reducción no catalítica selectiva de compuestos de NO<sub>x</sub> en el gas de proceso WTE

TIR: Tasa Interna de Retorno de una inversión

TMB: Tratamiento Mecánico Biológico de los RSU que consiste en bioreacting o biosecado de los compuestos orgánicos naturales en los RSU y la separación de RSU a reciclables, compost y fracciones RDF.

VAN: Valor Actual Neto de una inversión

WTE: Procesos residuos-a-energía para recuperar el contenido energético de los RSU

WTS: Estación de transferencia de residuos, donde la carga de los camiones de recogida es transferida a camiones de larga distancia, (Waste Transfer Station)