



# Modelos Económicos y Rol del Sector Privado en la Cadena de Valor del Co-Procesamiento de Residuos Sólidos y Líquidos en la Industria del Cemento

**giz** Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

  
*Presidencia de la República Dominicana*  
Consejo Nacional para el Cambio Climático y Mecanismo de Desarrollo Limpio

Por encargo de:

 Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza y Seguridad Nuclear

de la República Federal de Alemania

Como empresa federal, la GIZ asiste al Gobierno de la República Federal de Alemania en su labor para alcanzar sus objetivos en el ámbito de la cooperación internacional para el desarrollo sostenible.

Publicado por:  
Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Friedrich-Ebert-Allee 36 + 40  
53113 Bonn, Alemania  
T +49 228 44 60-0  
F +49 228 44 60-17 66

Dag-Hammarskjöld-Weg 1-5  
65760 Eschborn, Deutschland  
T +49 61 96 79-0  
F +49 61 96 79-11 15  
E [info@giz.de](mailto:info@giz.de)  
I [www.giz.de](http://www.giz.de)

Este documento forma parte del proyecto: Apoyo para el Plan de Desarrollo Económico Compatible con el Cambio Climático (DECCC) de la República Dominicana, en los sectores cemento y residuos (proyecto ZACK) - Programa Iniciativa del Clima Internacional (IKI) realizado por la GIZ y el Consejo Nacional para el Cambio Climático y el Mecanismo de Desarrollo Limpio.

GIZ Santo Domingo  
Calle Ángel Severo Cabral No. 5, Ens. Julieta,  
Santo Domingo, República Dominicana  
+1 809 541 1430  
+1 809 683 2611

E [info@giz.de](mailto:info@giz.de)  
I [www.giz.de](http://www.giz.de)

Autor:  
Andrés Jensen  
Santo Domingo, República Dominicana

Diseño/diagramación:  
Grupo Diario Libre, Santo Domingo

Fotografías/fuentes:  
GIZ; ADOCEM

#### Referencias a URL:

La presente publicación contiene referencias a páginas web externas. Los contenidos de las páginas externas mencionadas son responsabilidad exclusiva del respectivo proveedor. Al incluir una referencia por primera vez, la GIZ ha comprobado que los contenidos ajenos no den lugar a eventuales responsabilidades civiles o penales. Sin embargo, no puede esperarse un control permanente de los contenidos de las referencias a páginas externas sin que existan indicios concretos de una infracción de índole legal. Cuando la GIZ constate o sea informada por terceros que una página externa a la que ha remitido da lugar a responsabilidades civiles o penales, eliminará de inmediato la referencia a dicha página. La GIZ se distancia expresamente de tales contenidos.

La GIZ es responsable del contenido de la presente publicación.

Impresión y distribución:  
Grupo Diario Libre, Santo Domingo

Santo Domingo, República Dominicana  
Septiembre 2014

## **Modelos Económicos y Rol del Sector Privado en la Cadena de Valor del Co-Procesamiento de Residuos Sólidos y Líquidos en la Industria del Cemento**

# Contenido

1. Resumen Ejecutivo.....	3
2. Antecedentes .....	4
3. Objetivo del Estudio .....	5
4. Introducción .....	5
4.1. Residuos comúnmente co-procesados .....	6
4.2. Residuos no co-procesables.....	8
5. Modelo para un Co-procesamiento Sostenible en la Industria del Cemento.....	8
5.1. Mercado de los residuos, y estructura de la cadena de suministros.....	8
5.2. Capacidad Técnica en Plantas de Cemento y Aspectos Económicos.....	9
5.3. Marcos Regulatorios y Grupos de Interés.....	10
6. El Mercado de Los Residuos en República Dominicana.....	11
7. Principales corrientes de residuos, y alternativas de gestión.....	14
7.2. Plásticos.....	17
7.3. Biomasa.....	17
7.4. Lodos de Aguas Residuales .....	18
7.5. Líquidos (Aceites usados y otros hidrocarburos).....	18
7.6. Residuos Municipales (urbanos).....	19
8. Costos en la Cadena de Suministros de los residuos en República Dominicana .....	20
9. Pre-procesamiento.....	21
9.2. Plásticos.....	23
Residuos Municipales (Urbanos).....	24
9.4. Lodos de Planta de tratamiento de Aguas.....	27
10. Capacidad Técnica y aspectos económicos del reemplazo de combustibles .....	29
10.1. Costo de la Energía Tradicional.....	29
10.2. Tecnología y Tipo de Hornos.....	30
10.3. Restricciones Operativas.....	30
10.4. Capacidad de Recepción y Alimentación de Combustibles .....	31
10.5. Resumen Costos de Capital (Inversiones) para Infraestructura Física involucrada en Co-procesamiento .....	35
11. Marcos Regulatorios y Relaciones con Grupos de Interés.....	36
12. Bases para la Evaluación Económica de proyectos de Co-procesamiento .....	37
12.1. Componentes para la Evaluación Económica de Proyectos de Co-procesamiento.....	37

12.2. Evaluación económica para los diferentes combustibles alternativos identificados con potencial en República Dominicana.....	40
12.3. Resumen Evaluación Económica.....	41
12.4. Resumen Comparación Modelos en Países de Referencia .....	47
13. Modelos Económicos posibles de Implementar .....	50
13.2. Plásticos.....	51
13.3. Residuos Municipales.....	52
13.4. Aceites Usados y Biomasa.....	53
13.5. Lodos de Plantas de Tratamiento .....	54
14. Aspectos Técnico- Económicos Modelo de Desarrollo Sector Privado.....	54
15. Arquitectura para Implementar el Co-procesamiento en República Dominicana .....	55
16. Conclusiones y Recomendaciones .....	56
17. Recomendaciones .....	58
ANEXO .....	60
Definiciones.....	60

# 1. Resumen Ejecutivo

El co-procesamiento de residuos en la industria cementera significa sin lugar a dudas una oportunidad para mejorar los estándares de gestión de residuos en países en desarrollo. Esto ha sido ratificado por el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) a través de la Convención de Basilea, mediante la adopción de las Guías Técnicas sobre co-procesamiento en hornos cementeros, en 2011.

República Dominicana presenta en la actualidad las condiciones ideales para iniciar el camino del co-procesamiento. La necesidad de contar con tecnologías adecuadas, la voluntad política e institucional que el país evidencia en pos del mejoramiento ambiental en la gestión de residuos, y la presencia en el país de importantes empresas productoras de cemento, constituyen los ingredientes fundamentales para iniciar el proceso, siempre en el marco de la cooperación público-privada.

La estructura actual de la gestión de residuos en República Dominicana se caracteriza por la falta de infraestructura adecuada, por un alto grado de informalidad en la cadena de valor y por una lógica económica basada en costos muy bajos para la disposición final de residuos. En este contexto, y considerando el costo actual de la energía térmica tradicional en el país (petcoke, carbón), solamente aquellos residuos con un alto potencial térmico como las llantas usadas y los plásticos se presentan como los más atractivos para iniciar el camino del co-procesamiento, con proyecciones de modelos de negocio rentables y periodos aceptables para recuperación de las inversiones.

Otras corrientes de residuos, algunas de ellas emblemáticas como los residuos domésticos o lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales, requieren del fortalecimiento de los marcos regulatorios y de la evolución de la cadena de suministro, tanto desde el punto de vista de la infraestructura como de la construcción de capacidades a nivel país. Estas corrientes de residuos, muy atractivas para el futuro, y que hoy en día son la base del co-procesamiento en países desarrollados (principalmente Europa), demandan un trabajo conjunto que se oriente hacia el mediano y largo plazo, generando las condiciones económicas que permitan que el co-procesamiento sea una opción de gestión. Para estas corrientes de residuo se recomienda comenzar con el diseño e implementación de proyectos piloto.

La cooperación público-privada, y el alineamiento de los grupos de interés entorno al co-procesamiento, y el fortalecimiento de las capacidades a través de toda la cadena de valor, incluyendo a las autoridades, se identifica como la primera prioridad de gestión a nivel país.

## 2. Antecedentes

El Plan de Desarrollo Económico Compatible con el Cambio Climático (Plan DECCC) de la República Dominicana es una estrategia de control de emisiones para los sectores de energía, transporte, silvicultura, turismo, cemento y residuos sólidos. La estrategia identifica los sectores de residuos y cemento como aquellos en los que pueden lograrse reducciones sustanciales de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Sobre todo, en la producción de cemento existe un potencial de reducción importante, a través de la utilización de residuos apropiados como fuentes de energía (co-procesamiento). Para hacerlo viable, se requiere de la participación de la industria para aprovechar este potencial. Se carece - sobre todo en el sector público - de las capacidades institucionales para gestionar la planificación y la ejecución de las acciones pertinentes.

El proyecto “Apoyo para la implementación del Plan de Desarrollo Económico Compatible con el Cambio Climático de la República Dominicana en los sectores de cemento y residuos sólidos” ha sido desarrollado en estrecha cooperación con contrapartes dominicanas y cuenta con apoyo político al más alto nivel a través del CNCCMDL.

La industria del cemento muestra interés en la valorización de residuos apropiados mediante su utilización como fuente de energía (co-procesamiento), con el objetivo de sustituir las fuentes de energía fósiles, tales como el carbón, el petróleo y el gas natural, utilizadas en el proceso de producción (recuperación de energía). El motivo de este interés radica, por un lado, en la posibilidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, y por otro, en la oportunidad de rebajar los costos de producción. Ciertos materiales de desecho, en especial los de alto contenido energético, pueden utilizarse, tras un procesamiento previo, como combustibles alternativos. Ello explica la vinculación entre los sectores de cemento y residuos en el contexto de la mitigación de las emisiones de GEI.

La ausencia de un marco jurídico coherente y la falta de una cadena de suministro confiable de materiales de desecho aptos para su utilización como fuente de energía son actualmente los obstáculos principales para la difusión y desarrollo del co-procesamiento.

Es en este contexto donde un adecuado análisis de las oportunidades que el mercado de la generación de residuos en República Dominicana y la capacidad instalada de la industria cementera ofrecen para un desarrollo sostenible del co-procesamiento reviste importancia. La realidad actual y oportunidades de mejora que cada una de las variables fundamentales para el co-procesamiento presentan deben ser analizadas bajo la perspectiva de los modelos de negocio factibles de implementar en el futuro, y de los ajustes normativos, desarrollo de infraestructura y aspectos de mercado que será necesario abordar, a nivel país, para dar sostenibilidad a la actividad de co-procesamiento.

### 3. Objetivo del Estudio

El presente Estudio tiene como objetivo establecer los modelos económicos, y proponer los más factibles para la selección, recolección, separación, tratamiento, transporte y utilización de residuos sólidos y líquidos como combustible alternativo en la industria del cemento (co-procesamiento) en República Dominicana.

El Estudio evalúa la factibilidad técnica y comercial para un proceso de gestión de residuos liderado por el sector privado, con el objetivo de proveer materiales adecuados, en cantidad, calidad y costo, a la Industria Cementera Dominicana.

### 4. Introducción

El co-procesamiento, definido por el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUMA), a través de la Convención de Basilea, como el **“Uso de materiales de desecho adecuados en los procesos de fabricación con el propósito de recuperar energía y recursos y reducir en consecuencia el uso de combustibles y materias primas convencionales mediante su sustitución”**<sup>1</sup>, se ha convertido en una de las oportunidades de mayor desarrollo en la última década para enfrentar el desafío de una gestión racional de residuos, principalmente en países en desarrollo.

La disponibilidad de infraestructura adecuada para la gestión de residuos en países latinoamericanos es uno de los principales desafíos ambientales que los gobiernos enfrentan en la actualidad. Una cultura basada en la disposición final de residuos en vertederos o rellenos escasamente controlados es todavía la principal vía de eliminación de materiales de desecho. El trabajo de construcción de mecanismos eficientes para avanzar en la jerarquía de gestión de residuos es una tarea permanente, para cuyo éxito se requiere de la existencia de una oferta de gestión de residuos que permita avanzar hacia soluciones sostenibles de valorización, aprovechamiento, reciclaje y reutilización.

---

<sup>1</sup> Convención de Basilea - Directrices técnicas sobre el co-procesamiento ambientalmente racional de los desechos peligrosos en hornos de cemento – Noviembre 2011.



Figura 1: Jerarquía Gestión de residuos<sup>1</sup>

El co-procesamiento ofrece la ventaja de una infraestructura básica ya existente en prácticamente todos los países, como son los hornos cementeros, muchas veces gestionados por compañías que ya cuentan con la experiencia y conocimiento en este tipo de desarrollo gracias a su presencia internacional. Los hornos cementeros están disponibles, y el mayor desafío corresponde entonces a lograr que la cadena de suministro de los materiales, determinada por un adecuado manejo de los residuos desde su generación, transporte, almacenamiento, tratamiento y utilización en los hornos cementeros, cumpla con las condiciones técnico-económicas que hacen de esta actividad un modelo de gestión sostenible para todos los actores involucrados.

#### 4.1. Residuos comúnmente co-procesados

Los materiales de desecho comúnmente utilizados para el co-procesamiento en hornos de cemento pueden ser de carácter peligroso, como lodos acumulados en el fondo de los tanques, lodos de ácido alquilo, derrames de petróleo y alquitrán ácido procedente de la refinación de petróleo, la purificación del gas natural y el tratamiento pirolítico del carbón; residuos de aceite de maquinado; residuos de aceites hidráulicos y líquidos de frenos; aceites de sentina; lodos, sólidos o emulsiones de los separadores de agua y aceite; líquidos de limpieza y licores madre, residuos indestilables y residuos de reacción de la fabricación, formulación, distribución y utilización de productos químicos orgánicos de base, plásticos, caucho sintético, fibras artificiales, tintes orgánicos, pigmentos, plaguicidas orgánicos y productos farmacéuticos; residuos de tinta; residuos de la industria fotográfica; residuos de alquitrán y otros residuos que contienen carbón procedentes de la fabricación de ánodos (termometalurgia del aluminio); residuos del desengrasado de metales y el mantenimiento de maquinaria; residuos de la limpieza de

<sup>1</sup> Guía para el Co-Procesamiento de Residuos en la Producción de Cemento Cooperación Público Privada GTZ-Holcim – 2006.

textiles y el desengrasado de productos naturales; residuos de procesos de la industria electrónica, entre otros. (Convención Basilea, 2011); y también corresponder a residuos no peligrosos o de tratamiento especial como llantas, lodos de tratamiento de aguas servidas, plásticos, papeles y cartones en general, o residuos urbanos clasificados.

Todos estos materiales, una vez gestionados y seleccionados para su posterior co-procesamiento, se acondicionan en instalaciones especialmente dedicadas, para la obtención de un combustible alternativo, que podrá tener algunas de las características descritas en la Tabla 1 siguiente.

<b>Tipo Combustible Alternativo</b>	<b>Características</b>	<b>Ejemplos de componentes</b>
Combustibles Alternativos (AF) líquidos	Se pueden atomizar con aire comprimido (partículas sólidas en el líquido, < 2-4 mm), todos los puntos de alimentación son posibles	Solventes usados, aceites residuales, emulsiones, aguas residuales, pesticidas agotados.
Lodos	Se pueden bombear mediante bombas de pistón, para luego ser manejados de forma trozados idéntica que los combustibles de sólidos trozados.	Lodos de pintura, lodos petróleo/aceite
Combustibles sólidos enteros	No pueden ser transportados por los gases de horno; son alimentados, gasificados y quemados en la entrada de los hornos.	Neumáticos usados enteros, tonners, tortas de filtrado
Sólidos gruesos: sólidos < 50 mm (tridimensionales) y laminados < 200mm (bidimensionales)	Pueden ser transportados verticalmente por los gases de horno (de este modo, son adecuados para precalcinador)	Trozos de neumáticos, plásticos trozados y telas gruesas, madera residual trozada
Sólidos finos < 5 mm (tridimensionales) y laminados < 25 mm (bidimensionales)	Pueden ser transportados neumáticamente y desplazados horizontalmente por los gases de horno (adecuados para la quema principal).	Aserrín impregnado, harina animal, lodos de aguas servidas secos, plásticos trozados finos y madera residual

Tabla 1: Tipos de combustible alternativo - Fuente: GTZ/Holcim 2006, Adaptación del Autor

## 4.2. Residuos no co-procesables

Tomando en cuenta que la producción de cemento corresponde a una actividad industrial centrada en los materiales de construcción, donde la estabilidad del proceso productivo es fundamental, donde se cuenta generalmente con lineamientos de salud y seguridad muy estrictos, donde el garantizar la calidad del producto (Clinker – cemento) es prioritario, y donde los estándares ambientales a cumplir (legislación local y/o referencia internacionales) son estrictos, la Convención de Basilea recomienda que ciertas familias de residuos no sean coprocesados en las plantas de cemento. Estas familias de materiales son:

- Desechos radiactivos o nucleares;
- Desechos eléctricos y electrónicos (*e-waste*);
- Baterías enteras;
- Desechos corrosivos, incluidos los ácidos minerales;
- Explosivos;
- Desechos que contengan cianuro;
- Desechos que contengan amianto;
- Desechos médicos infecciosos;
- Armas químicas o biológicas destinadas a su destrucción;
- Desechos que contengan mercurio o estén contaminados con él;
- Desechos de composición desconocida o impredecible, incluyendo los desechos municipales sin clasificar.

Fuente: Guías Técnicas Convención de Basilea - 2011

## 5. Modelo para un Co-procesamiento Sostenible en la Industria del Cemento

Existen tres grandes ámbitos de acción a nivel país y de las empresas involucradas en el co-procesamiento, que determinan su factibilidad, potencialidad y sostenibilidad. Estos ámbitos son:

### 5.1. Mercado de los residuos, y estructura de la cadena de suministros

La tipología de materiales de desecho existentes en un país o en una región determinada dependerá de las características de la actividad económica que se desarrolla en el lugar. Así, países o regiones con un alto grado de industrialización presentarán también altas tasas de generación de residuos industriales que puedan ser atractivos para el co-procesamiento, o una región que se caracterice por su actividad portuaria, muy probablemente demandará servicios de gestión orientados a residuos propios de dicha actividad, como aguas de sentina, desechos de aduana, etc. También será relevante la ubicación geográfica relativa de los principales centros urbanos respecto de las plantas cementeras, la que determinará factibilidades de tipo logístico para el caso de los residuos urbanos.

Los tipos de materiales de desecho disponible, y su calidad asociada, determinarán el potencial teórico de co-procesamiento. Mientras más nobles los materiales en términos de poder calorífico, contenidos de elementos perjudiciales para el proceso productivo de los hornos de cemento, y en términos del comportamiento ambiental de los hornos, mejores serán las perspectivas del potencial de co-procesamiento en un horno determinado.

En cuanto a las cadenas de suministro, tanto para el caso de los residuos urbanos como para los industriales, será fundamental contar con un grado de madurez del mercado, que garantice los flujos económicos a través de la cadena (Infraestructura adecuada de gestión, precios justos para la disposición de residuos, disponibilidad de transporte especializado, alternativas de clasificación y pre-tratamiento de los residuos, transporte adecuado hacia las plantas de cemento, etc).

Un mercado formal para la gestión adecuada de residuos, y su cadena de suministro respectiva bien desarrollada son elementos clave para la sostenibilidad del co-procesamiento en hornos cementeros.

## **5.2. Capacidad Técnica en Plantas de Cemento y Aspectos Económicos**

Para un adecuado co-procesamiento, las plantas cementeras deberán estar equipadas idealmente con las mejores tecnologías disponibles, que garanticen una operación estable de los hornos, y el cumplimiento de los estándares ambientales y de seguridad propios de una adecuada gestión de residuos. En este sentido, aquellos hornos cementeros que cuenten con tecnologías modernas como proceso seco, la pre-calcinación o el control de emisiones por medio de filtros de manga, tendrán ventajas considerables en comparación con aquellos hornos de tecnología antigua no actualizada.

También será de vital importancia la condición de calidad de las materias primas disponibles para la producción de cemento en una planta determinada (piedra caliza principalmente), cuyas características químicas, como contenido de cloro, por ejemplo, impondrán límites y desafíos para la incorporación de materiales alternativos al proceso. El tipo y calidad de los combustibles tradicionales utilizados (petcoke, carbón, gas natural) también es relevante para la estimación de los potenciales de co-procesamiento en un horno determinado.

En cuanto a los combustibles tradicionales en particular, es de particular importancia su costo para las plantas cementeras. El costo de la energía tradicional será el elemento limitante para el co-procesamiento, ya que cualquier actividad de utilización de combustibles alternativos competirá en costo con la energía tradicional. Solamente en el caso de tener ahorros respecto del combustible tradicional (combustible alternativo más barato que el tradicional) el co-procesamiento será sostenible.

Es importante destacar también que las características de los combustibles alternativos, y de cada proceso productivo en particular, implicarán la necesidad de evaluaciones técnicas de los eventuales costos ocultos que el co-procesamiento pueda implicar al

proceso, como pérdidas de producción y mayor consumo térmico en el proceso de producción de Clinker principalmente.

### 5.3. Marcos Regulatorios y Grupos de Interés

La sola disponibilidad de residuos en el país y la existencia de plantas cementeras dispuestas a desarrollar el co-procesamiento, no son suficientes para una actividad sostenible. La existencia de marcos regulatorios adecuados basados en la experiencia internacional en estas materias, y de grupos de interés (autoridades, comunidades, etc) correctamente capacitados y/o informados según sea el caso, es un elemento vital en el camino del co-procesamiento.

La experiencia de países latinoamericanos en los que el co-procesamiento ha madurado como alternativa para la gestión de residuos, se caracteriza por el desarrollo de completos programas de construcción de capacidades a nivel país. Casos como el de Chile, Costa Rica o El Salvador son muy ilustrativos de la importancia que reviste un adecuado involucramiento de los diferentes grupos de interés.

En cuanto a marcos regulatorios, la Convención de Basilea en 2011 sentó las bases para una adecuada estructura legal para el co-procesamiento. Las Guías Técnicas de Basilea con una herramienta fundamental para la estructuración de un marco regulatorio que permita garantizar un desarrollo armónico del co-procesamiento con los estándares ambientales y de seguridad de los países en desarrollo. Este marco regulatorio específico para el co-procesamiento, debe sin embargo complementarse con la estructura legal general de gestión de residuos a nivel país, que garantice que el concepto de “el que contamina paga” se aplique en el país, y se establezcan los mecanismos de fiscalización adecuados para asegurar que las cadenas de suministro funcionan en forma eficiente en torno a la gestión de los residuos.

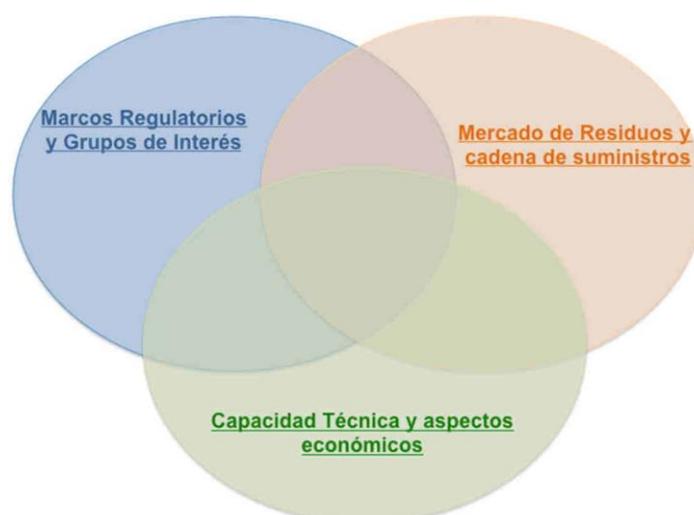


Figura 2: Ámbitos de Acción para sostenibilidad del co-procesamiento Fuente: Elaboración del Autor

## 6. El Mercado de Los Residuos en República Dominicana

Los aspectos fundamentales que tomar en cuenta para caracterizar de forma eficiente el mercado de los residuos disponibles para el co-procesamiento, son los siguientes:

- i. Tipología industrial existente en el país
- ii. Mercado potencial asociado a las industrias existentes (teórico)
- iii. Porción del mercado total teórico que se encuentra disponible o accesible
- iv. Caracterización general de los materiales
- v. Existencia de criterios para la aceptación de materiales.
- vi. Acuerdos comerciales (contratos)
- vii. Capacidad logística existente, y costos asociados
- viii. Disponibilidad o perspectivas para pretratamiento de los residuos (tránsito de residuo hacia combustible alternativo)
- ix. Nivel y tipo de competencia existente por parte de otros actores en la gestión de residuos (tanto formales como informales).

En base a los estudios desarrollados por ECORED y por el Consultor Timon Skoddow en el contexto del proyecto, es factible tener una noción, para el caso particular de República Dominicana, de los puntos i. y ii. anteriores.

De acuerdo con dichos estudios, la disponibilidad general de materiales de desecho para su posterior procesamiento como combustibles alternativos, y posterior co-procesamiento en los hornos cementeros es la que se observa en la Tabla 2.

Tipo	Generación total RD	Exportación de desperdicios (2012)	Total de desperdicios a nivel nacional
	tn/año	Tn/año	Tn/año
Llantas (goma)	38,412	131	38,281
Aceite usado	10,530		10,530
Caucho (mix)	15,057	1,542	13,515
Plastico (mix)	446,851	111,340	335,510
Foam (Poliestireno)	26,896		26,896
Residuos Arroz	317,868		317,868
Residuos Coco	1,549		1,549
Residuos Café	18,405		18,405
Residuos Caña de azucar	3,471,142		3,471,142
Desperdicios de Textiles	196,932	11,700	185,232
DBO Agua residual (10% humedad)	109,360		109,360
Papel y Cartón	714,961	83,529	631,432
<b>Total</b>	<b>5,367,962</b>	<b>208,242</b>	<b>5,159,720</b>

Tabla 2: Mercado Residuos República Dominicana. Fuente: Reporte Consultor Timon Skoddow, Julio 2014.

De la Tabla 2 anterior se desprende que para el caso de República Dominicana se dispone de información que da cuenta de un interesante mercado de residuos co-procesables, en la que destacan llantas / caucho, plásticos, biomasa y lodos de aguas residuales.

Por su parte, los residuos municipales, como es usual en países latinoamericanos, están ampliamente disponibles en volumen, pero son actualmente dispuestos en vertederos sin mayor control, y con un escaso grado de segregación, recuperación, valorización. Se estima un total de 3,5 Millones de toneladas generadas, que podrían dar origen a cerca de 1 Millón de toneladas de RDF (Refuse Derived Fuel).

La Tabla 2 muestra los principales puntos de concentración de los residuos municipales en República Dominicana, destacando los volúmenes disponibles.

El gran desafío actual de la gestión de residuos municipales en República Dominicana es probablemente el estándar ambiental de los vertederos (caracterizado por la inexistencia de mecanismos técnicos de control y una intensa actividad informal de recuperación de materiales llevada a cabo por los “buzos”), que se aleja considerablemente de rellenos sanitarios correctamente gestionados. El precio de disposición de residuos en estos vertederos, que no supera los 3 USD/ton, no permite un manejo adecuado.



Figura 3: Vertedero Duquesa – Santo Domingo. Fuente: Fotografía del Autor.

Provincia	Empresas cementeras en el área de influencia	Número de habitantes (2011)	Generación de residuos		Generación de RDF - Refuse Derived Fuels				
			(t/día)	(t/año)	10% Plástico (tn/año)	10% Papel y Cartón (tn/año)	4% Textil (tn/año)	Total RDF (tn/año)	
EL SEIBO	CEMEX/PANAM	105,984	61	22,407	2,240	3,584	886	6,721	
LA ROMANA	CEMEX/PANAM	246,234	982	137,465	13,946	22,314	5,579	41,839	
SAN PEDRO DE MACORIS	CEMEX/PANAM	337,108	357	130,161	13,016	20,826	5,208	39,048	
HATO MAYOR	CEMEX/PANAM	90,773	60	21,722	2,172	3,475	869	6,517	
SANTO DOMINGO	CEMEX/PANAM/DOMICEM	2,096,330	2,698	911,711	91,171	145,874	30,468	273,513	
ESPAILLAT	CIBAO	337,101	246	89,743	8,974	14,359	3,590	26,923	
LA VEGA	CIBAO	429,363	475	173,253	17,325	27,719	6,930	51,973	
PUERTO PLATA	CIBAO	327,510	479	174,803	17,480	27,968	6,992	52,441	
SANTIAGO	CIBAO	1,040,150	658	239,997	24,000	38,400	9,600	71,999	
VALVERDE	CIBAO	190,253	127	46,293	4,629	7,407	1,852	13,888	
DISTRITO NACIONAL	DOMICEM	1,111,640	3,500	1,277,500	127,750	204,400	51,100	383,250	
PERAVIA	DOMICEM	202,250	183	67,355	6,735	10,777	2,694	20,206	
SAN CRISTOBAL	DOMICEM	600,000	433	158,144	15,814	25,303	6,326	47,443	
PEDERNALES	ANDINO	38,941	27	8,070	807	1,291	323	2,421	
<b>Total</b>		<b>7,222,086</b>	<b>9,481</b>	<b>3,460,609</b>	<b>346,061</b>	<b>553,697</b>	<b>130,424</b>	<b>1,030,183</b>	

Tabla 2 : Generación Residuos Municipales en República Dominicana. Fuente: Reporte Consultor Timon Skoddow, Julio 2014

## 7. Principales corrientes de residuos, y alternativas de gestión

Para las principales y más atractivas corrientes de residuos detectadas en República Dominicana, es conveniente revisar la experiencia internacional en cuanto a las cadenas de suministro que han resultado exitosas, y cómo éstas pudieran replicarse a nivel local, identificando las áreas de oportunidad en cada caso.

La experiencia indica que las principales corrientes de residuos existentes en el país requieren también de diferentes soluciones logísticas (cadenas de suministro), tecnologías de pre-procesamiento y tecnologías de co-procesamiento en los hornos cementeros

### 7.1. Llantas:

Los principales desafíos para una eficiente cadena de suministros en el caso de las llantas usadas son los siguientes:

- Costos de gestión del residuo (Cuánto le cuesta hoy al generador deshacerse de las llantas usadas)
- Cadena de distribución (desde el generador hasta la planta cementera)
- Costos pre-tratamiento
- Tecnología de hornos y su potencial

La experiencia internacional indica tres mecanismos principales en base a los cuales se han establecido condiciones adecuadas para el flujo de llantas usadas hacia el co-procesamiento:

- a) **Establecimiento del concepto de Responsabilidad Extendida del Productor:** En base a la cual es el mismo productor o distribuidor de las llantas el que articula mecanismos para la recolección de llantas usadas en base al concepto de la logística reversa, y para lo cual generalmente establece, al momento de venta de una llanta nueva, un pequeño sobreprecio que se destina a la futura gestión de la llanta usada. Este es un mecanismo ampliamente utilizado en países desarrollados, principalmente Europa, en los cuales ese sobre precio cubre la cadena de suministro de la llanta usada hasta el momento de su co-procesamiento en los hornos cementeros. Es común observar que sea la misma autoridad local (municipios, provincias, etc) la que administre esos recursos de gestión de la llanta usada.

En países en desarrollo, y en particular en América Latina, esta fórmula ha comenzado lentamente a desarrollarse, existiendo en la actualidad algunas experiencias en Brasil, Costa Rica y Chile.

- b) **Apoyo a la recolección y gestión de llantas usadas en base a subsidios:** En Estados Unidos, el principal mecanismo de fomento a una gestión sostenible de llantas usadas es el de los incentivos, en base a subsidios, que la autoridad entrega a actores intermedios de la cadena de valor (recolectores principalmente), para un manejo sostenible de las llantas usadas. Por cada llanta recolectada y correctamente tratada, se recibe un incentivo que puede variar entre diferentes estados, y que se ubica en el rango de los 50 USD/ton llanta.
- c) **Cooperación Público-Privada para la articulación de cadena de suministro:** Esta alternativa de gestión se considera la de más alto impacto potencial en el corto plazo, y depende fundamentalmente de la capacidad para articular mecanismos de cooperación entre actores públicos y privados. Si a la necesidad de las autoridades locales de garantizar una correcta gestión de las llantas usadas, se le agrega la capacidad logística y de procesamiento de la industria cementera, por ejemplo, pueden lograrse importantes resultados. La experiencia mexicana y salvadoreña indica que es perfectamente factible lograr una cooperación en la que la autoridad municipal incentive a la población a depositar sus llantas usadas en centros de acopio, a los que accede la empresa cementera proporcionando su capacidad logística y de pre-tratamiento. De esta forma se optimiza la cadena, y se logran economías que, de no existir, harían poco factible la operación de la cadena.



Figura 3: Secuencia cooperación público-privada para gestión sostenible de llantas usadas – México 2008.

Estos acuerdos de cooperación y acción conjunta entre actores públicos y privados, genera también altos grados de confianza entre autoridades locales e industria, favoreciendo al mismo tiempo una gestión profesional de las llantas usadas, y un mejoramiento de la imagen pública tanto de la autoridad como de la industria.



Figura 4: Afiche promoción campaña recolección llantas usadas, México 2008.



Figura 5 : Impacto campaña de recolección de llantas usadas – México 2008  
 Los costos asociados a la cadena de distribución de las llantas usadas en República Dominicana (costos de transporte principalmente) no son conocidos, siendo una recomendación fundamental investigarlos como parte de las etapas tempranas del proyecto.

## 7.2. Plásticos

Los principales desafíos para una correcta gestión de la cadena de suministro de los plásticos, tanto de origen industrial como doméstico, son los siguientes:

- Costos de gestión del residuo (Cuánto le cuesta hoy al generador deshacerse de los plásticos)
- Cadena de distribución (desde el generador y/o desde el vertedero hasta la planta cementera)
- Costos logísticos, principalmente dada la naturaleza “liviana” del material
- Costos pre-tratamiento
- Tecnología de hornos y su potencial, principalmente referido al balance de cloro en el sistema horno.

De esta manera, el establecimiento de redes de suministro eficientes es fundamental para una gestión sostenible, donde el costo de gestión, o en otras palabras el “precio” de disposición alternativa del residuo (plástico en este caso) juega un rol fundamental.

Es necesario adelantar, que los costos logísticos y de pretratamiento en el caso de los plásticos son absolutamente relevantes al momento de evaluar su factibilidad de co-procesamiento. El alto contenido energético de este material es atractivo para el reemplazo de combustibles tradicionales, pero necesariamente el sistema debe ser capaz de ofrecer un material ya preparado que tenga un costo inferior a ese combustible tradicional, para que éste sea atractivo.

Es importante destacar que, en países desarrollados, principalmente en Europa, la lógica económica de los plásticos implica un costo importante para el generador, el que se ve obligado a disponer estos residuos en forma sostenible (Se prohíbe su ingreso a rellenos sanitarios por ejemplo), por lo que enfrenta costos de disposición que, dependiendo del país, pueden llegar hasta los 80 – 100 EUROS por tonelada. Estos precios favorecen el funcionamiento y articulación de toda la cadena de suministros de una forma sostenible.

Los costos asociados a la cadena de distribución de los plásticos en República Dominicana (costos de transporte principalmente) no son conocidos, siendo una recomendación fundamental investigarlos como parte de las etapas tempranas del proyecto.

## 7.3. Biomasa

El caso de la biomasa es particular de cada país / región, y estará determinado principalmente por el tipo y cantidad de materiales disponibles, y las condiciones comerciales a los que esos materiales está sujetos.

Los principales desafíos en torno a un co-procesamiento sostenible de biomasa son:

- Disponibilidad en las cercanías de las plantas cementeras
- “precio” de mercado de la biomasa
- Capacidad y costo de logística
- Capacidad de almacenamiento en plantas cementeras
- Capacidad de alimentación a los hornos (grandes volúmenes y altas tasas de alimentación).

La experiencia internacional indica que los materiales de biomasa pura (cascarilla de arroz, bagazo, etc) tienden a desaparecer para el co-procesamiento en el largo plazo, debido a su aprovechamiento en otros procesos industriales en los cuales el costo alternativo es considerablemente más alto que en los hornos cementeros, por lo que adquieren un precio de mercado que los hace a la larga poco factibles para su utilización como combustible alternativo en la producción de cemento. Mientras ese fenómeno no ocurra, pueden considerarse como una oportunidad en el corto y mediano plazo.

Los costos asociados a la cadena de distribución de los diferentes tipos de biomasa en República Dominicana (costos de transporte principalmente) no son conocidos, siendo una recomendación fundamental investigarlos como parte de las etapas tempranas del proyecto.

#### **7.4. Lodos de Aguas Residuales**

El co-procesamiento de lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales (aguas domésticas principalmente) corresponde a una actividad común en países desarrollados, donde, además de contar con tecnologías de tratamiento de aguas y secado de los lodos, la disposición final de estos últimos está estrictamente regulada.

Los principales desafíos que enfrenta la idea de utilizar estos lodos para su co-procesamiento en países en desarrollo son:

- Disponibilidad de lodos secos (tecnología de tratamiento disponible)
- Costo de disposición
- Costos logísticos
- Capacidad del proceso de los hornos cementeros para absorber grandes volúmenes.

Los costos asociados a la cadena de distribución de estos lodos (costos de transporte principalmente) no son conocidos, siendo una recomendación fundamental investigarlos como parte de las etapas tempranas del proyecto.

#### **7.5. Líquidos (Aceites usados y otros hidrocarburos)**

Los residuos líquidos podrían clasificarse en aquellos con alto poder calorífico y por lo tanto de gran interés para el co-procesamiento, y aquellos con altos contenidos de agua

(emulsiones, aguas de sentina, etc), que implican desafíos de pretratamiento en caso de pretender utilizarlos como combustibles.

Para aquellos residuos líquidos con alto poder calorífico, la experiencia internacional indica que, al igual que para el caso de la biomasa, son otros aprovechamientos industriales los que toman ventaja, ya que están dispuestos a “pagar más caro” por ellos. Tal es el caso de las calderas industriales, por ejemplo, que en países donde no existe estricta regulación ambiental, son autorizadas a reemplazar diesel por aceite usado, con la consiguiente valorización de este último.

Otro rubro que también compite fuertemente con el co-procesamiento es el de la refinación de aceites usados con el propósito de producir nuevos aceites, o la elaboración de combustibles tipo IFO. En ambos casos la valorización del aceite hace muy poco factible su flujo hacia el co-procesamiento.

Los líquidos de alto poder calorífico pueden transformarse por lo tanto en oportunidades puntuales de corto plazo, siendo su proyección al mediano y largo plazo imprecisa.

Los principales desafíos entonces para los residuos líquidos de hidrocarburos son los siguientes:

- Precio de mercado actual de los residuos y su relación con el precio del combustible tradicional (petcoke / carbón)
- Calidad (contenido agua)
- Disponibilidad de transporte adecuado
- Costos logísticos.
- Condiciones de seguridad (principalmente para residuos inflamables)

Los costos asociados a la cadena de distribución de estos líquidos no son conocidos, siendo una recomendación fundamental investigarlos como parte de las etapas tempranas del proyecto.

## **7.6. Residuos Municipales (urbanos)**

El caso de los residuos municipales o urbanos es especial, principalmente para países en desarrollo, ya que el inicio de la cadena de valor o cadena de suministro está marcado por tarifas extremadamente bajas (3-4 USD/ton en el caso de República Dominicana), que hacen poco factible cualquier desarrollo económico en torno a la gestión de estos residuos.

Esta lógica económica de la gestión de residuos municipales también se traduce en un escaso avance en cuanto a clasificación de residuos en origen. Los residuos que llegan a los vertederos contienen todas las fracciones de materiales que los componen, y los esfuerzos de clasificación, separación y valorización se materializan en los mismos

vertederos, en base a la acción de “buzos” que desarrollan su actividad sin las más mínimas condiciones de salud y seguridad en el trabajo, y en un ambiente informal.

Los principales desafíos en este caso corresponden en consecuencia a :

- Costo o precio por disposición final (Disposal fee)
- Tecnología de clasificación y pretratamiento (inversiones y costos operativos)
- Optimización logística
- Capacidad de recepción, almacenamiento y alimentación a los hornos.
- Capacidad del sistema horno, principalmente en lo que se refiere a balance de cloro.



Figura 6: Buzos en Vertedero San Cristóbal. Fuente: Timon Skoddow 2014.

## 8. Costos en la Cadena de Suministros de los residuos en República Dominicana

La información disponible para caracterizar las cadenas de suministro que operan en Rep. Dominicana para la gestión de residuos es limitada e insuficiente para establecer con claridad los costos asociados, lo que repercute en una indefinición sobre las fronteras geográficas de las áreas de interés.

En particular, en el Capítulo 6 del Estudio de Ecored se enuncia una Matriz de Flujo de Materiales, pero al mismo tiempo establece que: “Debido a la falta de información disponible, no pudimos establecer la cantidad ni costos por cada proceso”.

Para una correcta cuantificación de los posibles modelos de negocio a implementar en torno al co-procesamiento de residuos en República Dominicana, es fundamental

ahondar en la investigación sobre las estructuras, capacidades y costos involucrados en las cadenas de suministro para los diferentes materiales, principalmente en lo que dice relación con los actuales costos de disposición para los diferentes tipos de materiales, y en los costos promedio de transporte, también para cada uno de ellos.

Será necesario por tanto establecer supuestos basados en la experiencia, para caracterizar los costos logísticos de las cadenas de distribución.

Considerando el radio de influencia de 60 km definido por el Proyecto, se considerarán los siguientes costos de transporte, basados en la experiencia de países latinoamericanos, particularmente Costa Rica, Chile y México:

Llantas enteras: 20 USD/ton

Llantas trituradas: 10 USD/ton

Plásticos granel: 20 USD/ton

Plásticos triturados: 20 USD/ton

Biomasa: 20 USD/ton

Lodos secos: 10 USD/ton

Líquidos: 15 USD/ton

En cuanto al costo actual de disposición de los diferentes tipos de residuos, para aquellos que se disponen en los vertederos se asumirá la tarifa actual (3-4 USD/ton), mientras que para los que actualmente se gestionan en base a otras tecnologías, como los aceites usados, se asumirá que ya cuentan con un precio de mercado equivalente a una fracción del precio de los hidrocarburos tradicionales (diesel, bunker).

## 9. Pre-procesamiento

Como se indicó, La mayor parte de los materiales identificados con un mercado potencial para co-procesamiento requiere de infraestructura de pretratamiento para la preparación de los residuos de forma tal de obtener a partir de ellos un combustible alternativo.

En términos generales, los diferentes tipos de residuos deben someterse a los siguientes procesos físicos, siempre con el objetivo de obtener un combustible alternativo que sea compatible con el proceso de producción del horno de clínker.

**Llantas:** Trituración (excepto para aquellos hornos disponibles para co-procesamiento de llantas enteras.

**Plásticos:** Trituración y homogenización

**Biomasa:** En algunos casos secado

## **Residuos Municipales:** Clasificación, trituración y homogenización

**Líquidos:** Mezcla (blending), homogenización. En algunos casos, como las aguas de sentina, también separación de fase acuosa (dewatering)

El principal desafío del pre-procesamiento será por lo tanto convertir un conjunto de materiales heterogéneos como son los residuos, en un material homogéneo con características estables y compatibles con el proceso productivo del cemento.



Figura 7: El desafío del pretratamiento. Fuente: Base de datos del Autor

A continuación, se describen, en términos generales, las tecnologías, niveles de inversión necesarios, y costos operativos para el pre-procesamiento de diferentes corrientes de residuos.

### **9.1. Llantas**

Para aquellas operaciones en las que no es posible o existen limitaciones para la alimentación al horno cementero de llantas usadas enteras, el proceso de tratamiento necesario es el de triturado, lo que puede materializarse a través de plantas móviles o fijas. La experiencia indica que trituradoras móviles permiten una mayor flexibilidad y optimización de los costos logísticos.

En términos generales, la trituración de las llantas estará orientada a la alimentación del material a través del pre-calcinador del horno cementero, por lo que el tamaño típico de trituración es de 50 mmm o 2 pulgadas.



Figura 8: Trituradora móvil de llantas México

Para el caso de la trituración de llantas, los rangos normales de inversión y costos operativos, incluyendo aspectos de protección ambiental, salud y seguridad en el trabajo, son los siguientes:

<p><b>Inversión:</b> 1,0 – 1,5 Mio USD para 20.000 ton/año</p> <p><b>Costo Operativo:</b> 20 – 30 USD/ton</p>
---

## 9.2. Plásticos

Los plásticos, y residuos no peligrosos en general, requieren de un proceso de trituración, clasificación y homogenización con el objetivo de producir un combustible alternativo, denominado RDF (Refuse Derived Fuel), en granulometrías de 25 mm o 50 mm dependiendo del tipo de horno al cual se vaya a alimentar:

- Estas instalaciones generalmente comienzan con una primera etapa, con una capacidad de producción de unas 40.000 ton/año de combustible alternativo.
- Una línea completa, con capacidad de producción de hasta 100.000 – 150.000 ton/año se materializa generalmente en una segunda etapa.

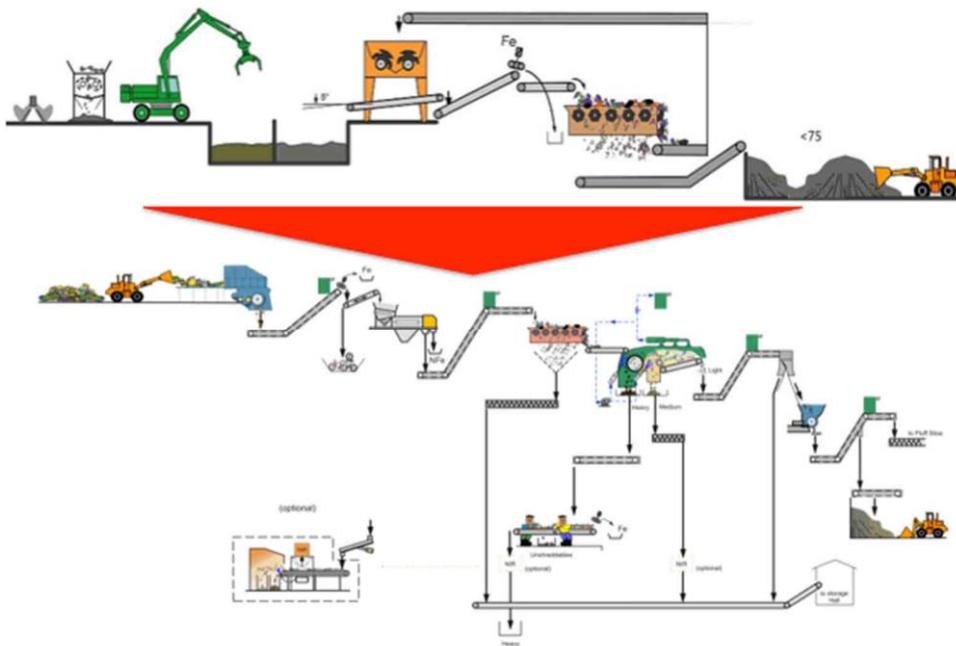


Figura 8: Transición de una primera etapa (inicial) a una configuración definitiva para el pre-procesamiento de plásticos y residuos no peligrosos en general.  
Fuente: Holcim

<p><b>Inversión 1ª Etapa:</b> 4 – 6 Mio USD para 40.000 ton/año</p> <p><b>Costo Operativo:</b> 30 – 40 USD/ton</p>	<p><b>Inversión 2ª Etapa:</b> 10 – 15 Mio USD para 120.000 ton/año</p> <p><b>Costo Operativo:</b> 20 – 30 USD/ton</p>
--	---

### Residuos Municipales (Urbanos)

El proceso de preparación en el caso de los residuos urbanos consta de una mayor cantidad de etapas respecto de plásticos de origen industrial y otros residuos no peligrosos.

El principal desafío inicial para el caso de los residuos municipales es el de la separación y clasificación de los materiales que serán pre-procesados como combustible alternativo. Este proceso previo encarece el pretratamiento, tanto desde el punto de vista de las inversiones como de los costos totales de producción, y establece además desafíos adicionales en materias como salud y seguridad de los operarios, y articulación de mecanismos para que el acceso a los materiales sea factible.

Para residuos municipales existen varias opciones de pretratamiento, siendo la más común la que se basa en una “Estación de clasificación previa” y posterior pre-tratamiento de la fracción aprovechable como combustible. La segunda opción más desarrollada es la de la “Estabilización Mecánico-Biológica”.

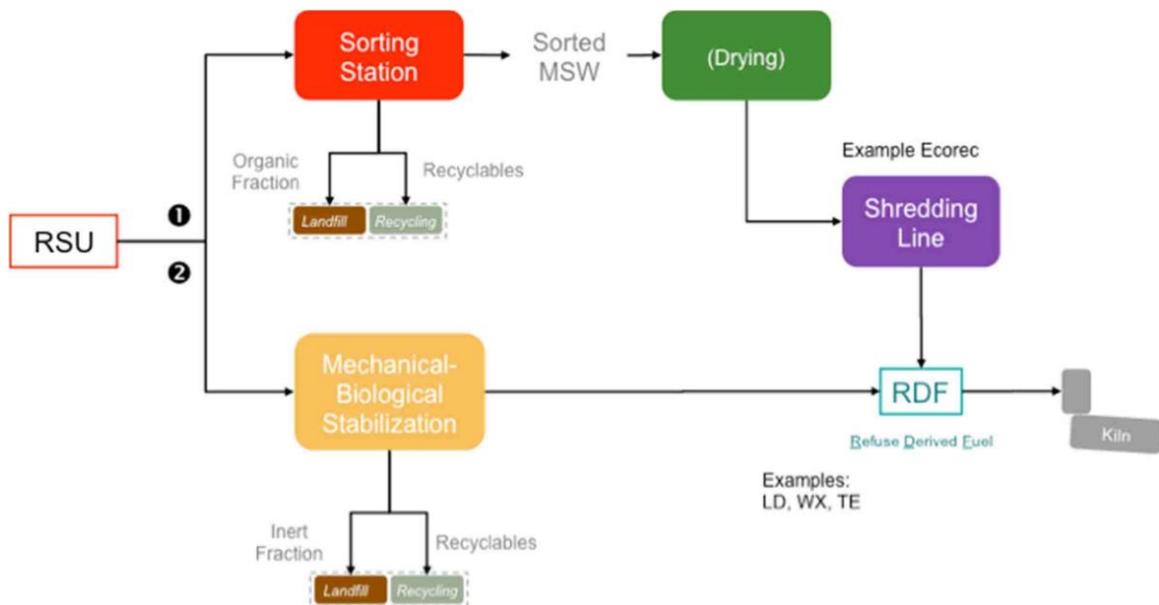
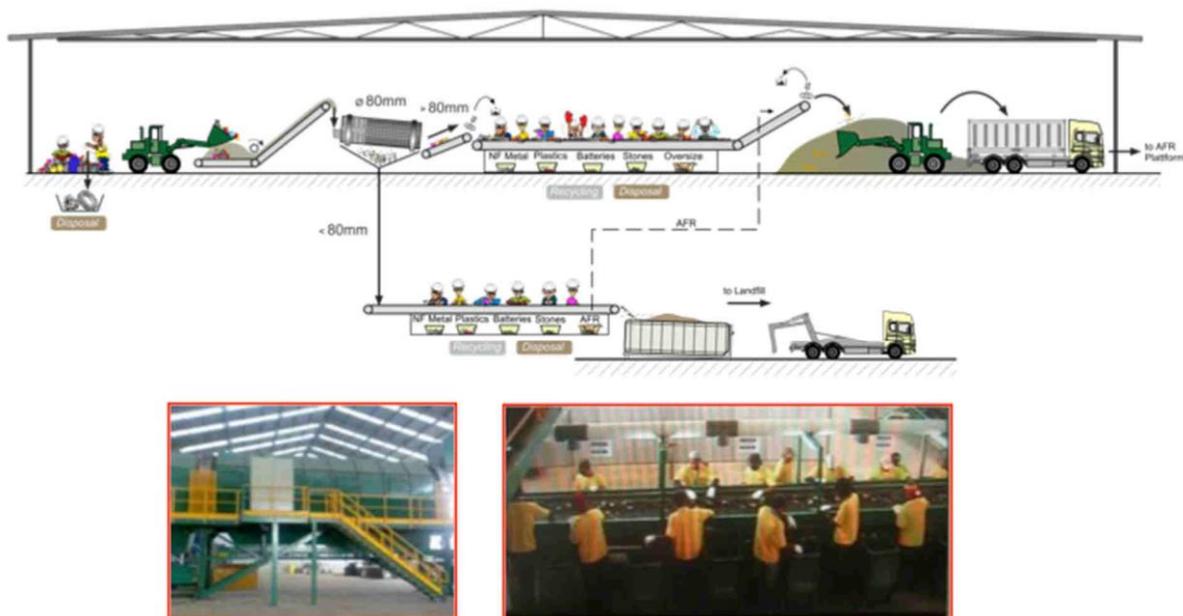


Figura 10: Esquema de opciones para pretratamiento de residuos municipales.  
Fuente: Holcim



Tambor clasificador + clasificación manual

Figura 11: Esquema planta de clasificación manual de residuos sólidos urbanos en Indonesia. Fuente: Holcim



Figura 12: Ejemplo de tratamiento Mecánico-Biológico en base a tecnología Covapro. Fuente: Holcim

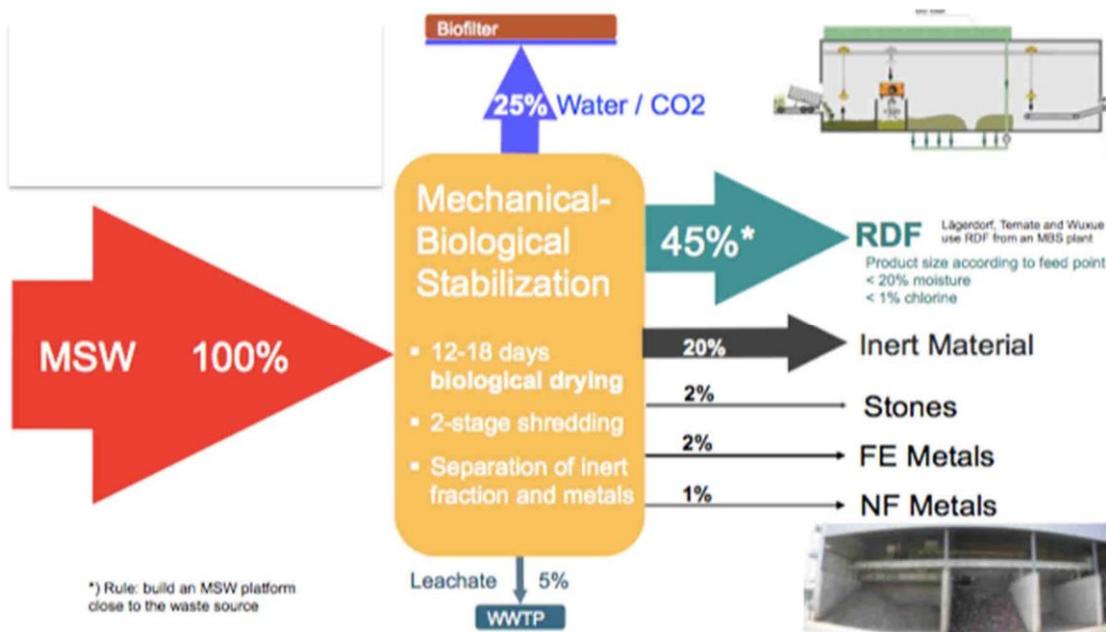


Figura 13: Esquema tratamiento Mecánico – Biológico, proceso Ecodeco. Fuente: Holcim

En términos promedio, y en base a la experiencia internacional de estas tecnologías, los rangos típicos de inversión y costos operacionales para el preprocesamiento de residuos municipales es un tanto superior a aquellos indicados para el caso de plásticos y otros residuos no peligrosos. Como se indicó, esta diferencia se debe principalmente a la etapa previa de clasificación y separación que requieren los residuos municipales, lo que para el caso de los procesos Mecánico-Biológicos se internaliza dentro del mismo proceso de tratamiento.

Los niveles típicos de inversión y costos operacionales en este caso son:

<b>Inversión 1ª Etapa:</b> 7 – 9 Mio USD para 40.000 ton/año	<b>Inversión 2ª Etapa:</b> 15 – 20 Mio USD para 120.000 ton/año
<b>Costo Operativo:</b> 40 – 50 USD/ton	<b>Costo Operativo:</b> 30 – 40 USD/ton

#### 9.4. Lodos de Planta de tratamiento de Aguas

Los lodos de planta de tratamiento de aguas domésticas corresponden a un material comúnmente utilizado en la industria del cemento de países desarrollados, principalmente Europa.

Asumiendo un correcto funcionamiento de las plantas de tratamiento de aguas domésticas, el principal desafío en cuanto a pretratamiento de este material es el secado, que generalmente no es incluido en las inversiones iniciales de dichas plantas de tratamiento.

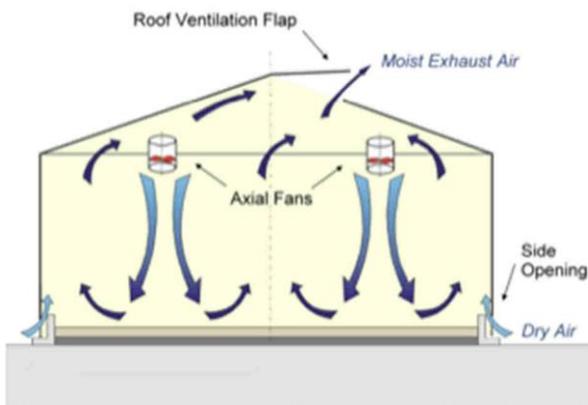
Por aspectos sanitarios y de control de olores, el secado de estos materiales es conveniente que se materialice en el mismo punto de generación, es decir en la planta de tratamiento de aguas, o bien en los monos rellenos que suelen habilitarse para el secado al aire libre.

El secado artificial corresponderá a un tratamiento térmico que, dependiendo del tipo de tratamiento de las aguas, puede abastecerse de los gases generados durante los procesos de fermentación anaeróbica de los mismos lodos. Otra opción es el secado utilizando energía solar.

De acuerdo con la experiencia europea, los costos de inversión para el secado, suponiendo un volumen anual de 40.000 ton, deben estar en el rango de los 4 – 6 Millones de Dólares, con un costo operacional de unos 15 USD/ton.



Figura 21: Secado de Lodos con proceso térmico. Fuente Holcim



Secado Solar



Figura 22: Secado de Lodos por proceso solar. Fuente: Holcim

## 10. Capacidad Técnica y aspectos económicos del reemplazo de combustibles

Los aspectos fundamentales que tomar en cuenta al evaluar la capacidad de los hornos cementeros presentes en el país, y que son eventualmente candidatos para desarrollar el co-procesamiento a gran escala, son los siguientes:

- Costo de la Energía Tradicional, que eventualmente será reemplazada por combustibles alternativos
- Tecnología, tipo y restricciones operacionales de los hornos
- Capacidad de recepción, almacenamiento y alimentación de combustibles alternativos a hornos
- Características de la materia prima (principalmente balance de cloro en el sistema)
- Consideraciones de salud y seguridad
- Consideraciones de restricciones ambientales

### 10.1. Costo de la Energía Tradicional

El costo de la energía tradicional está determinado principalmente por el precio del petcoke / carbón disponible para cada una de las plantas existentes en República Dominicana.

Según los antecedentes disponibles (aportados hasta la fecha de elaboración del presente informe por 2 de las empresas existentes en el país), el precio del petcoke / carbón puesto en planta se ubica en el rango:

95 – 140 USD /ton

Este rango puede explicarse por las diferentes opciones de compra de las empresas, donde aquellas con poder de negociación internacional pueden acceder a menores precios (Compras centralizadas corporativas).

Este rango de costo de combustible tradicional es atractivo para el planteamiento de opciones de co-procesamiento, ya que se ubica en un rango alto del costo estadístico de la energía tradicional en la producción de cemento de América Latina.

Cualquier variación en el costo de los combustibles tradicionales será muy sensible en términos de cuán atractivas son las diferentes corrientes de residuos y combustibles alternativos asociados.

## 10.2. Tecnología y Tipo de Hornos

Los hornos cementeros, dependiendo de su tecnología, ofrecen diferentes alternativas para la alimentación de combustibles alternativos, con el correspondiente potencial de sustitución energética.

Los principales elementos diferenciadores corresponden a:

- Tipo de proceso (seco, húmedo, semi seco)
- Disponibilidad y características de Pre-calcinador
- Disponibilidad y características Pre-calentador
- Disponibilidad puntos de alimentación

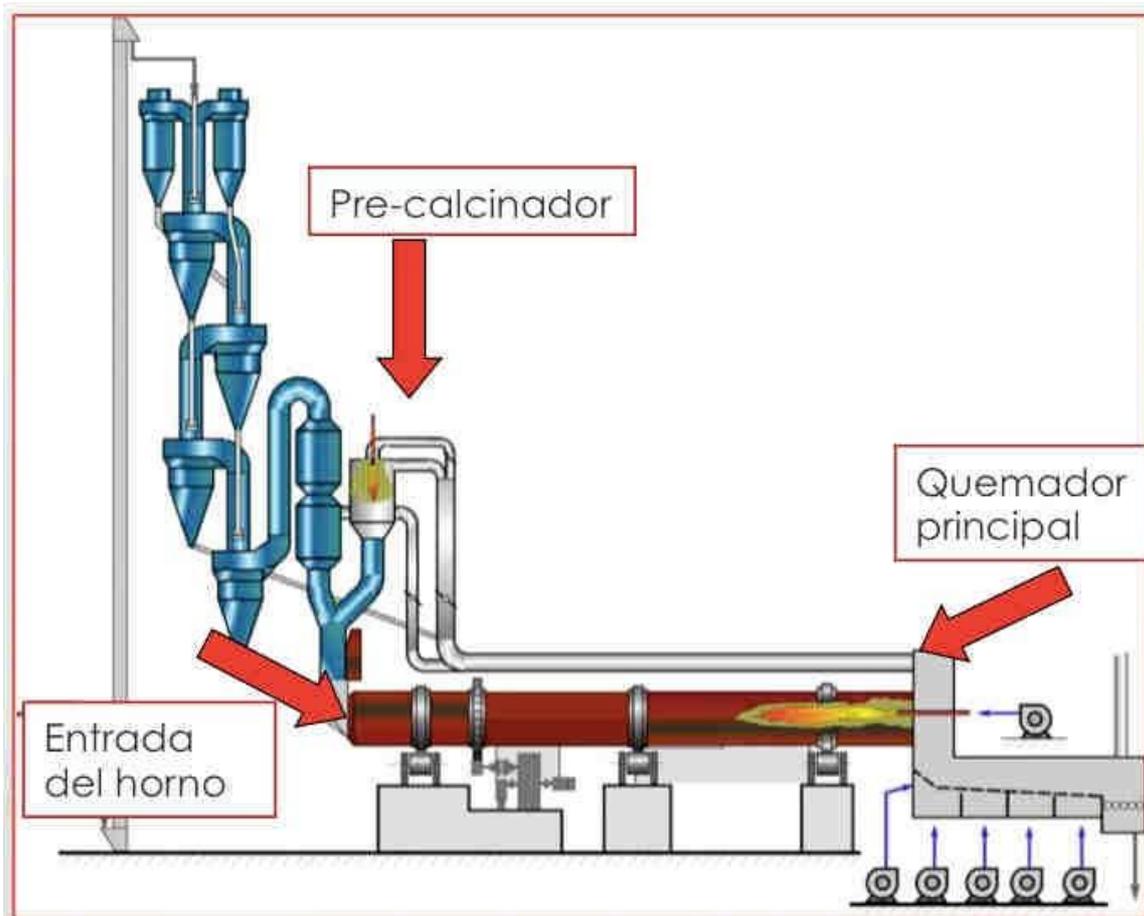


Figura 14: Esquema general Horno Cementero, y principales puntos de alimentación de combustibles alternativos. Fuente: Holcim

## 10.3. Restricciones Operativas

Las restricciones operativas en el proceso de producción de clínker están determinadas principalmente por las características de la materia prima, y la calidad de los combustibles (tanto tradicionales como alternativos).

La estabilidad del proceso térmico, y consideraciones de calidad en el producto determinados por la química del proceso, son variables a tener en cuenta en el diseño de cualquier actividad de co-procesamiento en un sistema de horno cementero.

Los aspectos fundamentales que tomar en cuenta son:

- Granulometría => Control de CO – “quemabilidad”
- Humedad => Energía / producción
- Contenido de cenizas => Calidad producto
- **Cloro => Fenómenos circulación (parámetro limitante)**
- Azufre => Fenómenos circulación
- Poder Calorífico (relacionado con humedad y cenizas)
- Homogeneidad => Control de proceso
- Puntos alimentación => Tº, disponibilidad O2

Nota: Las dos plantas presentes en República Dominicana que han entregado información no presentan limitaciones aparentes para contenido de cloro, lo que constituye una oportunidad para el desarrollo del co-procesamiento. Sin perjuicio de lo anterior, es muy recomendable que estas plantas realicen sus balances de cloro con anterioridad al inicio de cualquier operación de co-procesamiento, esto con el objetivo de determinar los límites de calidad para los combustibles alternativos, y estar en condiciones de evaluar el potencial de sustitución, una vez que se conozcan las características químicas de los materiales disponibles.

#### **10.4. Capacidad de Recepción y Alimentación de Combustibles**

##### **Alternativos**

Al igual que para el caso de las necesidades de pre-tratamiento, los diferentes tipos de combustibles alternativos también implicarán la necesidad de contar con infraestructura específica para la recepción, almacenamiento y alimentación de estos combustibles al horno cementero. Para tasas de sustitución relevantes, la capacidad de recepción y alimentación de los combustibles alternativos es clave en cuanto a su capacidad y a la posibilidad de contar con flujos estables de alimentación de materiales al horno.

A continuación, se presentan esquemáticamente los tipos de instalaciones necesarias para los diferentes tipos de combustible alternativo, indicando también los niveles típicos de inversión necesaria, y costos operativos asociados.

### 10.4.1. Líquidos

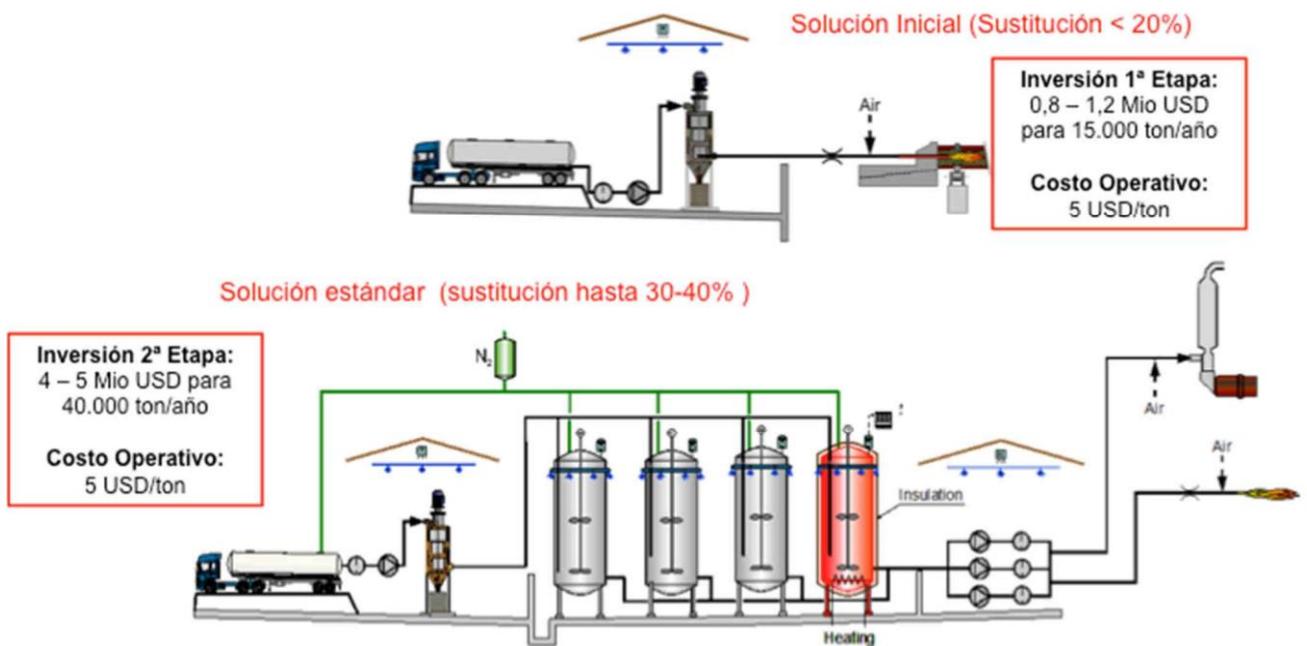
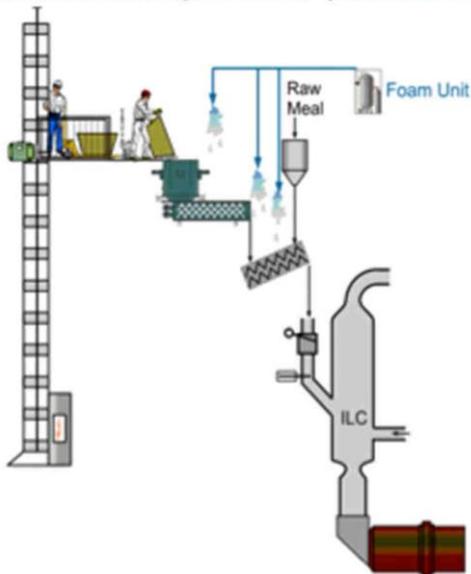


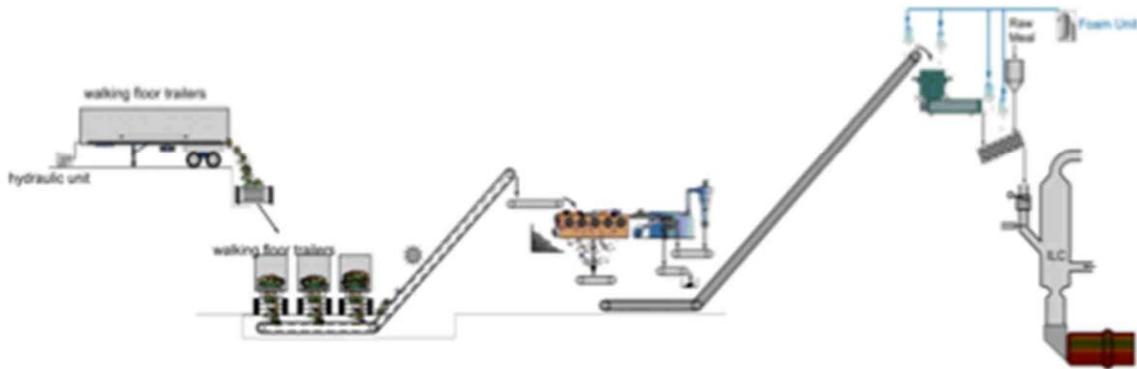
Figura 15: Esquema instalaciones de recepción y alimentación combustibles alternativos líquidos. Fuente: Holcim

### 10.4.2. Sólidos

**Solución inicial provisoria (sustitución <10%)**



### Solución estándar light (Sustitución < 20%)



### Solución estándar (Sustitución >30%)

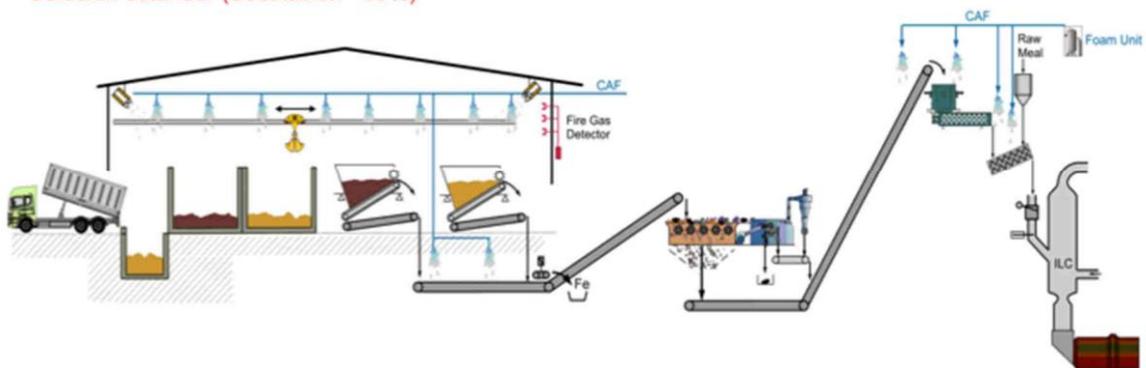


Figura 16: Esquema instalaciones de recepción y alimentación combustibles alternativos sólidos. Fuente: Holcim

<p><b>Inversión 1ª Etapa:</b> 0,5 – 0,7 Mio USD para 6.000 ton/año</p> <p><b>Costo Operativo:</b> 10 USD/ton</p>	<p><b>Inversión 2ª Etapa:</b> 1 -2 Mio USD para 15.000 ton/año</p> <p><b>Costo Operativo:</b> 5 USD/ton</p>	<p><b>Inversión 2ª Etapa:</b> 3 - 4 Mio USD para 40.000 ton/año</p> <p><b>Costo Operativo:</b> 5 USD/ton</p>
--	---	--

Asimismo, es recomendable que la capacidad de almacenamiento de combustibles alternativos en las plantas cementeras sea compatible con los niveles de utilización de estos, dando la flexibilidad operacional que el proceso de producción del clínker demanda.



Figura 17: Almacenamiento de combustible alternativo sólido – Costa Rica.

Fuente: Holcim

Las claves de diseño y operativas para una instalación eficiente están dadas por los conceptos de:

**Gradualidad:** Capacidad de adaptar la instalación a demandas crecientes en la utilización de combustibles alternativos.

**Capacidad:** La relación entre nivel de sustitución energética factible y la capacidad del sistema para recibir, almacenar y alimentar los combustibles alternativos al horno debe ser balanceada.

**Flexibilidad:** Las instalaciones deben ser capaces de adaptarse a las características de los combustibles alternativos, las que pueden variar en el tiempo por diferentes motivos (cambios en el mercado de los residuos, disponibilidad de nuevos materiales por variación en el costo de los combustibles tradicionales, etc.)

**Seguridad:** Los combustibles alternativos están elaborados sobre la base de residuos industriales, algunos de ellos peligrosos. Las características de peligrosidad deben ser tomadas en cuenta durante el diseño de las instalaciones, de forma tal de controlar los riesgos asociados (incendios y derrames principalmente).

Es por lo anterior que el estándar técnico y de seguridad de las instalaciones de co-procesamiento debe ser de vanguardia.



Figura 18: Estándar instalaciones co-procesamiento Coactiva – Cemento Polpaico, Chile.

Fuente: Registros del Autor.

## 10.5. Resumen Costos de Capital (Inversiones) para Infraestructura Física involucrada en Co-procesamiento

Es importante mencionar, que la infraestructura física para la recepción, almacenamiento y alimentación de combustibles alternativos a los hornos cementeros dependerá de las características específicas de cada planta y de cada horno en particular, por lo que el análisis debe hacerse caso a caso en el momento que sea pertinente.

Como aproximación, y tal como se ha descrito en el punto 10.4, se pueden agrupar las inversiones en 2 grandes grupos:

**Líquidos:** Instalaciones capaces de recibir, almacenar y dosificar combustibles alternativos líquidos consistentes en aceites, emulsiones, soventes, etc. Cada proyecto específico tendrá su diseño particular, pero en términos promedio son los que se indican en 10.4 y se resumen a continuación.

Líquidos	Inv. Inicial (1º Etapa)	Inversión Completa
Volumen	Hasta 15.000 ton/año	Hasta 40.000 ton/año
Sustitución	< 20%	30 – 40 %
Monto Inversión	0,8 a 1,2 Mio USD	4,0 a 5,0 Mio USD
Costos operativos	5 USD /ton	5 USD/ton

Tabla 3: Costos Capital (Inversiones) co-procesamiento líquidos

**Sólidos:** Instalaciones capaces de recibir, almacenar y dosificar combustibles alternativos sólidos al pre-calcinador o al quemador principal, consistentes en llantas trituradas, RDF, plásticos y textiles triturados, biomasa o lodos de tratamiento de aguas residuales. Cada proyecto específico tendrá su diseño particular, pero en términos promedio son los que se indican en 10.4 y se resumen a continuación.

Sólidos	Inv. Inicial (1º Etapa)	Inversión Intermedia	Inversión Completa
Volumen	Hasta 6.000 ton/año	Hasta 15.000 ton/año	Hasta 40.000 ton/año
Sustitución	< 20%	20 – 30 %	> 30%
Monto Inversión	0,5 – 0,7 Mio USD	1,0 – 2,0 Mio USD	3,0 – 4,0 Mio USD
Costos operativos	< 20%	20 – 30 %	> 30%

Tabla 4: Costos Capital (Inversiones) co-procesamiento sólidos

## 11. Marcos Regulatorios y Relaciones con Grupos de Interés

Las actividades de co-procesamiento corresponden, en países en desarrollo, a una nueva tecnología que se pone a disposición de la sociedad para una correcta gestión de los residuos. Sin embargo, es común observar que la aparición de nuevas tecnologías en torno a temáticas ambientales genera muchas veces desconfianza y escepticismo en los diferentes grupos de interés.

Es por lo anterior que un claro establecimiento de las “reglas del juego” para el co-procesamiento en base a marcos regulatorios modernos que se basen en la experiencia de países que ya han recorrido el camino para la consolidación de esta tecnología, y a las recomendaciones de PNUMA para esta tecnología específica a través de las Guías Técnicas de Basilea, será fundamental para un armónico crecimiento de esta actividad.

De igual forma, y para lograr lo anterior, será necesario capacitar a los diferentes actores públicos y privados en torno a los retos y oportunidades que el co-procesamiento ofrece. El concepto de “Construcción de Capacidades” toma aquí un rol protagónico.

Así, los aspectos clave a tener en cuenta son:

- Desarrollo de Normativa Legal específica para el co-procesamiento
- Fortalecimiento de la normativa legal general para la gestión de residuos que apunte hacia un escalamiento en la jerarquía de gestión de residuos a nivel nacional.
- Apego a los tratados internacionales, y utilización de las referencias que estos tratados han desarrollado para el tema de co-procesamiento en específico. En particular, Convención de Basilea.
- Articulación de espacios de colaboración público-privada, con participación de diferentes actores bajo un esquema “ganar-ganar” en la gestión de residuos.
- Diálogo permanente con los grupos de interés identificados.
- Facilitación de permisos y autorizaciones necesarias para el desarrollo y crecimiento del co-procesamiento.

Es en este ámbito en que para el desarrollo y consolidación de una estrategia para el co-procesamiento, parece conveniente basarse en las premisas establecidas por la Convención de Basilea.

## 12. Bases para la Evaluación Económica de proyectos de Co-procesamiento

Para la evaluación de las dimensiones económica y financiera del co-procesamiento es necesario establecer algunas premisas:

- El co-procesamiento debe abordarse como una actividad económica en sí misma, que debe contemplar todas las etapas y alcances económicos y financieros.
- Los períodos de retorno de las diferentes inversiones necesarias para la implementación del co-procesamiento deben cumplir con criterios financieros estándar de rentabilidad, considerando cierta flexibilidad a favor de la componente estratégica de este tipo de desarrollos. Esta flexibilidad estará dada por políticas corporativas de sostenibilidad y visión de largo plazo.
- Los costos de inversión y operacionales considerados en las diferentes evaluaciones deben ser realistas, y basados en experiencia práctica en países similares. De esta forma se considera que la experiencia de países centroamericanos como Costa Rica o El Salvador puede ser comparable con la realidad de República Dominicana.
- El valor asignado a la gestión de residuos (pago por el servicio de eliminación de residuos o compra de residuos) será muy sensible a la legislación local, y a los estándares de gestión de residuos existentes en el país.

Es importante destacar que las condiciones de borde para las evaluaciones económicas deben estar determinadas por la realidad local en la gestión de residuos. Al desconocerse algunos datos clave como los costos involucrados en las cadenas de suministro de los materiales de desecho, es necesario hacer algunos supuestos que solamente la práctica futura podrá confirmar o variar según sea el caso.

De esta forma, para las evaluaciones económicas que se realizan en los puntos siguientes, se tomarán en consideración rangos de costos estadísticos para países en desarrollo, en particular países latinoamericanos.

### 12.1. Componentes para la Evaluación Económica de Proyectos de Co-procesamiento

El siguiente diagrama muestra los componentes de la evaluación económica del co-procesamiento, para la etapa correspondiente al mercado de los residuos y el funcionamiento de la cadena de suministros respectiva.

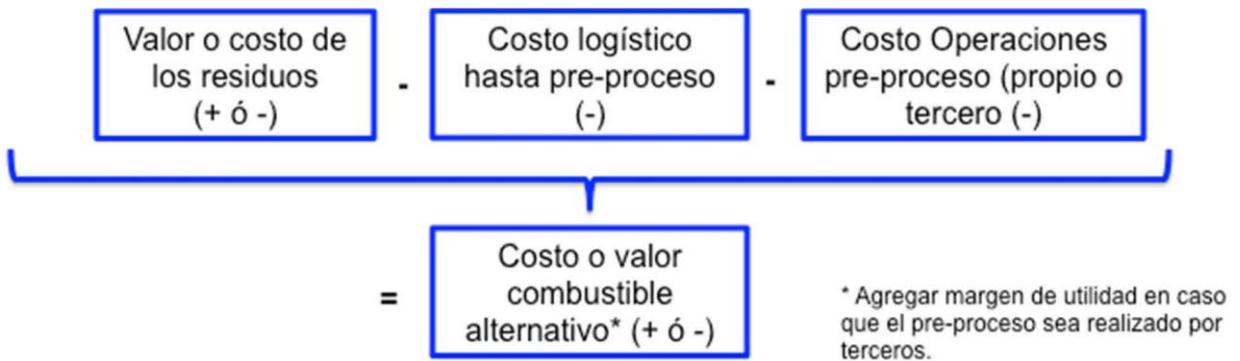


Figura 19: Diagrama de evaluación económica de la componente Mercado y Cadena de Suministro de los residuos destinados a co-procesamiento.

Fuente: Elaboración del Autor

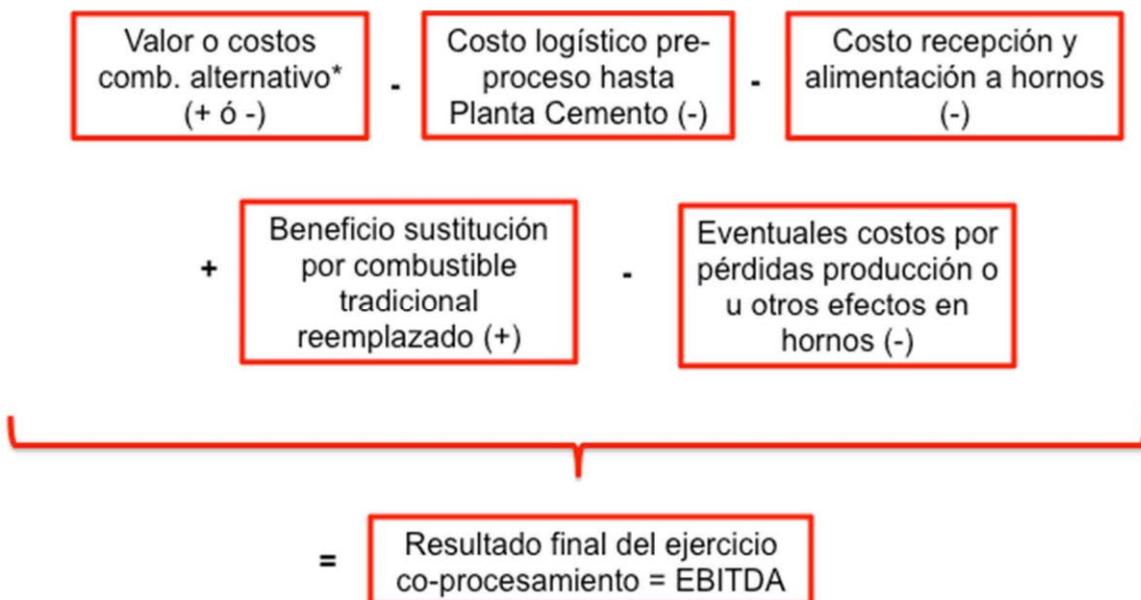


Figura 20: Diagrama de evaluación económica de la componente Planta Cementera. Fuente: Elaboración del Autor

En las figuras 19 y 20 se identifican los siguientes componentes fundamentales para la evaluación económica y definición de los modelos de negocio factibles para el Co-procesamiento:

**Valor o costo de los residuos:** Corresponde a la tarifa pagada por el generados de los residuos para cumplir con su responsabilidad de una correcta gestión de los mismos. Corresponde generalmente a precios de mercado por el servicio de retiro y disposición final de los residuos, que en muchas oportunidades es pagado directamente al recolector. Existen casos en que este valor es negativo, es decir que el residuo es "comprado" por terceros al generador, con el objetivo de comercializarlo o reutilizarlo.

**Costo logístico hasta pre-proceso:** Corresponde al costo de transporte en que incurre el recolector de los residuos, considerando su margen de utilidad, para retirar los residuos desde el generados y trasladarlos hasta el punto donde estos residuos serán acopiados y pre-tratados.

**Costo operaciones pre-proceso:** Corresponde a los costos en que incurre el responsable por la transformación física de los residuos con el objetivo de convertirlos en un combustible alternativo. Estas operaciones generalmente corresponden a clasificación, tamizado, triturado y mezcla de residuos, generando un producto denominado combustible alternativo. Los costos de pre-proceso deben incluir, entre otros, los costos de análisis de laboratorio que sean necesarios para garantizar una segura gestión de los materiales. También incluyen el margen de utilidad de la instalación.

**Costo o valor del combustible alternativo:** Corresponde a la carga económica que finalmente tiene el material ya preparado. Esta carga puede ser positiva (beneficio) o negativa (costo) dependiendo de la naturaleza del material y de los costos de tratamiento involucrado. Este costo o valor es el que teóricamente se ofertará a la planta cementera para su utilización como combustible alternativo.

**Costo logístico pre-proceso hasta planta de cemento:** Corresponde al costo de transporte del combustible alternativo ya formulado, desde la planta de pretratamiento hasta el horno cementero, incluyendo el margen de utilidad del transportista.

**Costo de recepción y alimentación a hornos:** Corresponde a los costos en que incurre la planta cementera durante sus operaciones de recepción, almacenamiento y alimentación del combustible alternativo a los hornos.

**Beneficio por sustitución por combustible tradicional reemplazado:** Corresponde al ahorro generado por la sustitución energética (o de materias primas) que aporta el combustible alternativo. Cada unidad de energía aportada por el combustible alternativo es una unidad de energía que se deja de “comprar” de combustible tradicional.

**Eventuales costos por pérdidas de producción u otros efectos en hornos:** Dependiendo de la naturaleza y calidad del combustible alternativo, y de las restricciones operacionales del proceso, ciertos materiales pueden provocar efectos de pérdida de producción u otros efectos que deben ser cuantificados en el cálculo de los beneficios. Cabe hacer notar que, en un proceso productivo controlado adecuadamente, donde los límites de calidad para los combustibles alternativos estén claramente definidos, estos efecto no deben presentarse.

**Resultado final del ejercicio de co-procesamiento:** El resultado final de este cálculo corresponde a la utilidad (o pérdida) total que implica la cadena de valor del co-procesamiento, y por su composición es equivalente al aporte del co-procesamiento al EBITDA del negocio principal.

## 12.2. Evaluación económica para los diferentes combustibles alternativos identificados con potencial en República Dominicana

A continuación, y para cada uno de los materiales de desecho identificados con potencial en República Dominicana, se resumen los resultados de una evaluación económica basada en supuestos obtenidos desde la experiencia internacional.

Se indica además la sensibilidad de la evaluación ante la variación de los dos parámetros fundamentales del negocio, que corresponden al costo del combustible tradicional reemplazado, y al valor o costo de los residuos, haciéndose la comparación con la realidad de estos mismos materiales en países desarrollados (Europa) y países similares en América Latina.

Para la evaluación se supone una actividad de co-procesamiento que utiliza en cada caso 40.000 ton anuales del combustible alternativo, indicando también la tasa de sustitución térmica alcanzada en cada caso para un horno tipo.

### Supuestos para costos en la cadena de suministros :

En la tabla 3 se observa, para cada uno de los materiales identificados, los costos de transporte, pre-tratamiento, recepción y alimentación a hornos que se utilizan en la

USD/ton	Llanta Triturada	Plástico	RDF	Líquidos	Biomasa	Lodos
Costo logístico desde Generador hasta pre-proceso	0*	-20	0**	0	0	0***
Costo pre-procesamiento	-25	-35	-40	0	0	-10
Costo logístico Pre-tratamiento hasta Planta cementera	-10	-20	-10	-10	-20	-10
Costo de recepción y alimentación a hornos	-5	-5	-5	-5	-5	-5

\* Se asume que el traslado a centros de acopio lo realiza generador el

\*\* Se asume que el pre-procesamiento se realiza en el mismo vertedero

\*\* Se asume que el pre-procesamiento se realiza en la planta de tratamiento de aguas

evaluación económica en cada caso.

Como se indicó, estos costos corresponden a la experiencia promedio para países latinoamericanos, y deberán en su momento ser establecidos específicamente para el caso de República Dominicana.

Tabla 5: Supuestos sobre costos en cadena de suministros

### Supuestos para la evaluación económica:

**Supuestos para costos del combustible tradicional:** Según los antecedentes disponibles a la fecha, el rango actual de costo del combustible tradicional (petcoke, carbón) es de 95 a 140 USD/ton. Las simulaciones de evaluación económica se harán para 3 escenarios distintos, asumiendo costos del combustible tradicional de 100, 120 y 140 USD/ton.

**Supuestos para costo o valor de los residuos:** Para el caso del costo de disposición actual de los residuos, se tomarán diferentes rangos, siempre dentro de los valores esperables u observados en países con características similares. Los rangos definidos son diferentes para cada material de desecho.

**Supuestos valores de Inversión:** Se asumen los siguientes costos de inversión en cada caso, siempre simulando un volumen de 40.000 ton/año de cada material.

Miles USD	Llanta Triturada	Plástico	RDF	Líquidos	Biomasa	Lodos
Inversión Pre-proceso	2.500	5.000	8.000	-	-	5.000
Inversión Recepción / Alimentación	3.500	3.500	3.500	4.500	2.500	2.500
Inversión Total	6.000	8.500	11.500	4.500	2.500	7.500

Tabla 6: Supuestos Inversiones

De esta forma, para cada uno de los materiales en estudio se elaborará una matriz, mostrando los resultados de la evaluación económica, y su sensibilidad a los parámetros recién definidos, indicando también, para cada caso, los períodos de retorno esperados para las inversiones necesarias.

En el Anexo 1 se entrega el detalle de la evaluación económica en cada caso.

### 12.3. Resumen Evaluación Económica

Llantas Trituradas

40.000 toneladas anuales

Horno de 2.000 Ton cli/día

Tasa Sustitución Térmica: 44%

Utilidad Anual (EBITDA en Miles USD)

Costo disp residuo / Costo petcoke (USD/ton)	100	120	140
-10	1.375	2.050	2.725
0	1.775	2.450	3.125
10	2.175	2.850	3.525

Payback estático de las inversiones (Años)

Costo disp residuo / Costo petcoke (USD/ton)	100	120	140
-10	4,4	2,9	2,2
0	3,4	2,4	1,9

10	2,8	2,1	1,7
----	-----	-----	-----

Para el caso de las llantas trituradas, se concluye que el negocio es atractivo para todo el rango considerado de precios del combustible tradicional, y eventuales costos o beneficios del residuo. Si el precio de los combustibles tradicionales baja el umbral de los 100 USD/ton, la forma de hacer sostenible la actividad de coprocesamiento de llantas será necesariamente la gestión en base a un costo del residuo nulo o bien que el generador pague por la disposición.

**Países de referencia:** Costa Rica, México y El Salvador son países de características similares a República Dominicana, en los cuales la gestión de llantas usadas ha sido exitosa en base a un trabajo público-privado con las autoridades municipales, en los que la autoridad y la empresa cementera realizan campañas de concientización y ponen a disposición de la comunidad centros de acopio de las llantas. La empresa interesada en el co-procesamiento retira de esos centros de acopio las llantas usadas, y las tritura a su costo.

En el caso de Europa, el sistema funciona de manera diferente gracias a los mecanismos de financiamiento dados por el concepto de responsabilidad extendida del productor, y el pago de un sobreprecio en la compra de las llantas. Este sobreprecio va destinado al tratamiento posterior de la llanta usada, actividad que desarrollan empresas especializadas por encargo de los municipios.

Para un 48% de sustitución térmica, el impacto en reducción de emisiones brutas de CO<sub>2</sub> para un horno de 2.000 ton cli / día es de aprox 35.000 ton anuales.

Plástico

40.000 toneladas anuales

Horno de 2.000 Ton cli/día

Tasa Sustitución Térmica: 48%

Utilidad Anual (EBITDA en Miles USD)

Costo disp residuo / Costo petcoke (USD/ton)	100	120	140
-10	25	750	1.475
0	425	1.150	1.875
10	825	1.550	2.275

Payback estático de las inversiones (Años)

Costo disp residuo / Costo petcoke (USD/ton)	100	120	140
-10	340	11,3	5,8
0	20	7,4	4,5

10	10,3	5,5	3,7
----	------	-----	-----

Los plásticos no peligrosos se disponen generalmente en vertederos, y el precio por disposición final es muy bajo en países en desarrollo.

Se observa que el co-procesamiento de plásticos será atractivo en términos económicos solamente para aquellos casos en que el costo del combustible tradicional sea considerable (mayor a 120 USD/ton), y en la medida en que sea factible conseguir el residuo de plástico por lo menos a costo cero.

**Países de referencia:** Costa Rica es un país en que se co-procesa una gran cantidad de plásticos, principalmente de origen industrial. En este caso el negocio del co-procesamiento es rentable gracias a una pequeña tarifa que se cobra por el servicio de eliminación del residuo, mientras el combustible tradicional (petcoke) tiene un costo del orden de los 120 USD/ton.

En el caso de Europa la cadena de suministro se comporta de una forma completamente diferente, ya que el costo de disposición final o eliminación de los residuos plásticos no reciclables es alto, alcanzando niveles de 60 a 100 Euros/ton. Ese costo inicial de gestión de residuos financia completamente la cadena de suministro, que para el caso de este material implica una de las principales fuentes de combustible alternativo.

Para un 48% de sustitución térmica, el impacto en reducción de emisiones brutas de CO2 para un horno de 2.000 ton cli / día es de aprox 15.000 ton anuales.

RDF

40.000 toneladas anuales

Horno de 2.000 Ton cli/día

Tasa Sustitución Térmica: 25%

Utilidad Anual (EBITDA en Miles USD)

Costo disp residuo / Costo petcoke (USD/ton)	100	120	140
-10	- 725	- 350	25
0	- 325	50	425
10	55	450	825

Payback estático de las inversiones (Años)

Costo disp residuo / Costo petcoke (USD/ton)	100	120	140
-10			460
0		230	27,1
10	153,3	25,6	13,9

Se observa que, bajo las condiciones y estándares actuales de las gestiones de residuos municipales, muy difícilmente se podrá implementar una cadena de suministro para el co-procesamiento que entregue resultados financieros atractivos. El bajo costo de disposición actual (3-4 USD/ton en República Dominicana) y los importantes costos de clasificación y tratamiento, sumados a las características energéticas del combustible alternativo resultante, que podrían considerarse moderadas, hacen que el co-procesamiento de residuos municipales clasificados requiera de modificaciones estructurales en la gestión general de residuos.

**Países de referencia:** En América Latina no se ha logrado aún desarrollar el negocio del co-procesamiento de residuos municipales en forma sostenible, esto debido a las mismas barreras observadas en República Dominicana, que como ya se mencionó, corresponden al bajo estándar y costo actual para la gestión de esos residuos. Existen experiencias piloto en países como México y Brasil que vale la pena tomar en cuenta para el diseño de un programa que apunte hacia el desarrollo de esta actividad.

Al igual que para el caso de los plásticos, en Europa la cadena de suministro se comporta de una forma completamente diferente, ya que el costo de disposición final o eliminación de los residuos municipales es alto, alcanzando niveles promedio de 80 Euros/ton. Ese costo inicial de gestión de residuos financia completamente la cadena de suministro, que para el caso de este material implica una de las principales fuentes de combustible alternativo.

Para un 25% de sustitución térmica, el impacto en reducción de emisiones brutas de CO2 para un horno de 2.000 ton cli / día es de aprox 29.000 ton anuales.

Líquidos - Aceites usados

40.000 toneladas anuales

Horno de 2.000 Ton cli/día

Tasa Sustitución Térmica: 59%

Utilidad Anual (EBITDA en Miles USD)

Costo disp residuo / Costo petcoke (USD/ton)	100	120	140
-100	-100	800	1.700
-50	1.900	2.800	3.700
0	3.900	4.800	5.700

Payback estático de las inversiones (Años)

Costo disp residuo / Costo petcoke (USD/ton)	100	120	140
-100		5,6	2,6
-50	2,4	1,6	1,2

0	1,2	0,9	0,8
---	-----	-----	-----

Como se mencionó anteriormente, los residuos líquidos de alto poder calorífico son materiales de oportunidad en el corto plazo, ya que, hacia el mediano o largo plazo, la experiencia indica que estos residuos tienden a ser utilizados en otros procesos de valorización que los hace adquirir un precio de mercado contra el que el co-procesamiento no puede competir.

Según las simulaciones efectuadas, se concluye que el co-procesamiento de aceites usados y otros líquidos de alto poder calorífico es atractivo siempre y cuando el precio de mercado del material no supere los 50 USD/ton. Solamente en casos en que el combustible tradicional (petcoke) alcanza niveles de 140 USD/ton, podría ser atractivo gestionar aceites hasta un costo de unos 100 USD/ton.

**Países de referencia:** En los países de América Latina, el desarrollo del coprocesamiento se ha caracterizado en una primera etapa por un intensivo consumo de aceites usados y solventes como combustible alternativo. Estos materiales suelen estar disponibles, incluso a costo cero, cuando su aprovechamiento en otros usos no ha sido desarrollado. La experiencia indica que, al cabo de unos años, los aprovechamientos en otros procesos industriales o la refinación del aceite usado para producción de nuevo aceite o producción de combustibles tipo IFO, hacen que estos materiales no estén disponibles.

En Europa los aceites usados no son utilizados para el co-procesamiento, siendo los solventes agotados los que aún tienen alguna presencia en las actividades de co-procesamiento en la industria cementera.

Para un 59% de sustitución térmica, el impacto en reducción de emisiones brutas de CO2 para un horno de 2.000 ton cli / día es de aprox 26.000 ton anuales.

Biomasa

40.000 toneladas anuales

Horno de 2.000 Ton cli/día

Tasa Sustitución Térmica: 28%

Utilidad Anual (EBITDA en Miles USD)

Costo disp residuo / Costo petcoke (USD/ton)	100	120	140
-30	75	350	775
-10	725	1.150	1.575
0	1.125	1.550	1.975

Payback estático de las inversiones (Años)

Costo disp residuo / Costo petcoke (USD/ton)	100	120	140
--	-----	-----	-----

-30		7,1	3,2
-10	3,4	2,2	1,6
0	2,2	1,6	1,3

Los residuos de biomasa serán atractivos en la medida que existan interesantes volúmenes disponibles en las cercanías de las plantas cementeras, y siempre y cuando estos materiales no alcancen un precio de mercado que supere los 10-15 USD/ton.

**Países de referencia:** En América Latina se co-procesan interesantes volúmenes de biomasa, principalmente correspondiente a cascarilla de arroz. Destacan en este aspecto países como Ecuador y Costa Rica, donde estos materiales no cuentan con usos alternativos a escala industrial, y están en general disponibles para las plantas cementeras.

El efecto esperado para la biomasa es similar al de los líquidos con poder calorífico. La experiencia de Europa por ejemplo indica que hacia el largo plazo estos materiales tienden a desaparecer. La industria cementera europea prácticamente no co-procesan biomasa en la actualidad, a excepción de los lodos de tratamiento de aguas residuales, que se tratan por separado.

Para un 28% de sustitución térmica, el impacto en reducción de emisiones brutas de CO2 para un horno de 2.000 ton cli / día es de aprox 66.000 ton anuales.

Lodos secos de Planta de Tratamiento Aguas

40.000 toneladas anuales

Horno de 2.000 Ton cli/día

Tasa Sustitución Térmica: 16%

Utilidad Anual (EBITDA en Miles USD)

Costo disp residuo / Costo petcoke (USD/ton)	100	120	140
-10	-150	100	350
0	250	500	750
10	650	900	1.150

Payback estático de las inversiones (Años)

Costo disp residuo / Costo petcoke (USD/ton)	100	120	140
-10		75,0	21,4
0	30,0	15,0	10,0
10	11,5	8,3	6,5

El co-procesamiento de lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales enfrenta el desafío del control de costos a través de la cadena de suministro, donde los procesos de secado de este material son los más relevantes.

En general, las plantas de tratamiento de aguas residuales en América Latina no contemplan una etapa de secado de los lodos resultantes, lo que encarece las actividades necesarias de pre-tratamiento. Es por esta razón, que en la actualidad no existen experiencias de co-procesamiento de este material en la región latinoamericana.

En Europa en cambio, el co-procesamiento de lodos (sewage sludge en inglés) es una actividad normal y muy rentable, gracias a que el tratamiento de aguas tiene incorporado el concepto de secado, y gracias también a que las regulaciones ambientales obligan a una adecuada disposición final, siendo la preferida el co-procesamiento en hornos cementeros, los que reciben un pago por el servicio de eliminación.

Para un 16% de sustitución térmica, el impacto en reducción de emisiones brutas de CO2 para un horno de 2.000 ton cli / día es de aprox 35.000 ton anuales.

#### 12.4. Resumen Comparación Modelos en Países de Referencia

En las Tablas 7, 8, 9 y 10 se utilizan países de América Latina (México, Chile, Costa Rica) como referencia para la posible evolución de las actividades en torno a co-procesamiento, y también se indican, en términos generales, los mismos conceptos aplicados a Europa. Este análisis se concentra en las corrientes llantas usadas, plásticos, RDF y lodos.

LLantas	Chile	Costa Rica	México	Europa
Modelo	En base a un concepto de “responsabilidad extendida del productor”, son las grandes distribuidoras de llantas las que recolectan el residuo y lo transportan a la planta cementera, donde se reciben a costo cero.	La empresa cementera negocia con clientes individuales, lo que se combina con contratos con grandes distribuidores que cuentan con sistemas de recolección en origen.	Se han establecido convenios exitosos con municipios, que hacen la gestión de sensibilización de los generadores, y disponen sitios de acopio, donde la cementera acude con trituradoras móviles.	En base a un concepto de responsabilidad extendida del productor, y a la imposición de tasas para el tratamiento, es el generador el que paga un sobre-costos por la llanta. Ese sobre costo se destina a financiar la cadena de suministro, incluyendo el triturado.
Logros	En la única planta cementera que utiliza llantas como combustibles se han logrado gestionar hasta 20.000 ton/año	Se han logrado volúmenes interesantes de hasta 20.000 ton/año a nivel país	Un alto grado de cooperación público-privada, con volúmenes que superan las 80.000 ton/año	Altas tasas de gestión de llantas usadas, superiores a 100.000 ton/año por país

<b>% sustitución</b>	Se ha logrado una tasa de sustitución sostenida de entre 10 y 15 %	La llanta es responsable de un 10% de sustitución energética	Plantas reportan % de sustitución de 15 a 20 % con llantas.	Plantas utilizan llantas por sobre un 20 a 30 % de sustitución.
<b>Ahorros logrados</b>	Los ahorros estimados corresponden a USD 1,5/ton cli	Ahorros estimados en USD 1/ton Cli.	Ahorros estimados de 1,5 a 2 ,0 USD/ton cli.	Ahorros que alcanzan hasta los USD 5/ton cli.

Tabla 7: Comparación con países de referencia: Llantas

<b>Plásticos</b>	<b>Chile</b>	<b>Costa Rica</b>	<b>México</b>	<b>Europa</b>
<b>Modelo</b>	Relación directa entre la empresa de co-procesamiento que es propiedad de la cementera, con los generadores industriales.	Relación directa entre la empresa de co-procesamiento que es propiedad de la cementera, con los generadores industriales.	Relación directa entre la empresa de co-procesamiento que es propiedad de la cementera, con los generadores industriales.	Gracias a los altos costos de disposición, ha surgido la industria de la recolección y el pre-tratamiento, que es un intermediario entre el mercado y la planta cementera.
<b>Logros</b>	Captación de buena parte del mercado de los plásticos industriales, con unas 5.000 ton/año	Captación de buena parte del mercado de los plásticos industriales, con unas 5.000 ton/año	Captación de buena parte del mercado de los plásticos industriales, con unas 50.000 ton/año	Altas tasas de recuperación de plásticos, y un mercado formal
<b>% sustitución</b>	Con esta corriente se han logrado sustituciones de hasta 10%	Con esta corriente se han logrado sustituciones de hasta 10%	Con esta corriente se han logrado sustituciones de hasta 20%	Superior al 50% en algunos casos
<b>Ahorros logrados</b>	Gracias a las tarifas de eliminación por co-procesamiento, y la sustitución, ahorros de hasta 3 USD/ton cli.	Gracias a las tarifas de eliminación por co-procesamiento, y la sustitución, ahorros de hasta 3 USD/ton cli.	Gracias a las tarifas de eliminación por co-procesamiento, y la sustitución, ahorros de hasta 3 USD/ton cli.	Superior a los USD 5/ton cli.

Tabla 8: Comparación con países de referencia: Plásticos

<b>RDF</b>	<b>Chile</b>	<b>Costa Rica</b>	<b>México</b>	<b>Europa</b>
<b>Modelo</b>	El modelo aún no se encuentra implementado, habiéndose desarrollado solamente experiencias piloto para demostración de factibilidad técnica. Las bajas tasas de disposición de residuos municipales (inferiores a USD 10/ton) no han hecho factible el desarrollo de este negocio. Se está a la espera de las alianzas público-privadas que permitan enfrentar esta situación. Este efecto se repite en diferentes países de América Latina.	El modelo aún no se encuentra implementado, habiéndose desarrollado solamente experiencias piloto para demostración de factibilidad técnica. Las bajas tasas de disposición de residuos municipales (inferiores a USD 10/ton) no han hecho factible el desarrollo de este negocio. Se está a la espera de las alianzas públicoprivadas que permitan enfrentar esta situación. Este efecto se repite en diferentes países de América Latina.	El modelo aún no se encuentra implementado, habiéndose desarrollado solamente experiencias piloto para demostración de factibilidad técnica. Las bajas tasas de disposición de residuos municipales (inferiores a USD 10/ton) no han hecho factible el desarrollo de este negocio. Se está a la espera de las alianzas público-privadas que permitan enfrentar esta situación. Este efecto se repite en diferentes países de América Latina.	Gracias a los altos precios por la disposición y eliminación de residuos municipales, y a las restricciones para enviar a rellenos sanitarios residuos valorizables, la industria de producción de RDF a partir de residuos municipales es muy activa, y se justifica por tarifas alternativas (rellenos en algunos casos o incineración) que van hasta los 80 a 100 EUR/ton. Esto justifica la aparición de empresas especializadas en la producción de RDF a partir de residuos municipales seleccionados, que se mezclan con plásticos y textiles de origen industrial.
<b>Logros</b>	No aplica	No aplica	No aplica	Altas tasas de valorización de materiales, con volúmenes de hasta 300.000 ton/año por ejemplo en España.
<b>% sustitución</b>	No aplica	No aplica	No aplica	Superior al 50% en algunos casos
<b>Ahorros logrados</b>	No aplica	No aplica	No aplica	5 a 10 USD/ton cli., lo que convierte a estas iniciativas en un muy buen negocio.

Tabla 9: Comparación con países de referencia: RDF

<b>Lodos</b>	<b>Chile</b>	<b>Costa Rica</b>	<b>México</b>	<b>Europa</b>
<b>Modelo</b>	No se encuentra desarrollado en países de América Latina	No se encuentra desarrollado en países de América Latina	No se encuentra desarrollado Desarrollo proy. piloto en el mediano plazo (3-4 años)	Contrato directo entre las plantas de tratamiento y la industria cementera. Las plantas entregan lodo seco (<10% H2O)
<b>Logros</b>	No aplica	No aplica	No aplica	Industria cementera como principal destino de los lodos
<b>% sustitución</b>	No aplica	No aplica	No aplica	Los lodos ofrecen bajo poder calorífico. Sustitución <10%
<b>Ahorros logrados</b>	No aplica	No aplica	No aplica	Gracias al disposal fee, se logran ahorros de 3 a 5 USD/ton cli.

Tabla 10: Comparación con países de referencia: Lodos Plantas Tratamiento

## 13. Modelos Económicos posibles de Implementar

Tomando en cuenta la realidad de República Dominicana, y la experiencia acumulada en el desarrollo del co-procesamiento en diferentes países de América Latina, para los diferentes materiales analizados se proponen los modelos económicos específicos para la selección, recolección, separación, transporte, tratamiento y utilización en el co-procesamiento.

### 13.1. Llantas Usadas

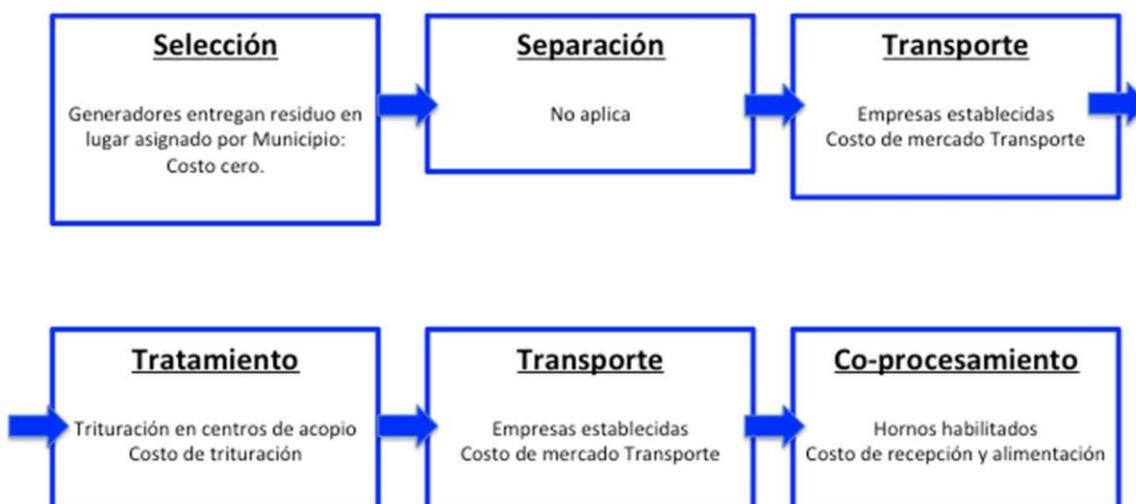
En el corto y mediano plazo, y tal como se describió para el caso de México, el modelo que ha mostrado ser exitoso corresponde al de la Cooperación Público Privada entre la Industria y Autoridades locales, principalmente municipios.

En este modelo es la empresa privada la que realiza las inversiones en equipamiento e infraestructura de pre-tratamiento, recepción y alimentación a hornos, mientras las autoridades municipales facilitan espacios públicos para la implementación de centros de acopio de llantas, y utilizan sus mecanismos de acercamiento a la población para desarrollar campañas de sensibilización que tiendan a un crecimiento sostenido en las tasas de recolección de llantas usadas.

Las actividades de transporte deben estar en manos de terceros, en particular empresas especializadas y habilitadas para el efecto.

Hacia el largo plazo, y en base a mecanismos como una ley de responsabilidad extendida del productor, por ejemplo, este modelo podría variar, desarrollando los incentivos económicos para que otros actores puedan ser parte de la cadena, creando de esta forma una “industria de la producción de llanta triturada” tal como existe actualmente en Estados Unidos, por ejemplo.

**Modelo Económico Llantas** (Los costos son los establecidos en la Tabla 3)



## 13.2. Plásticos

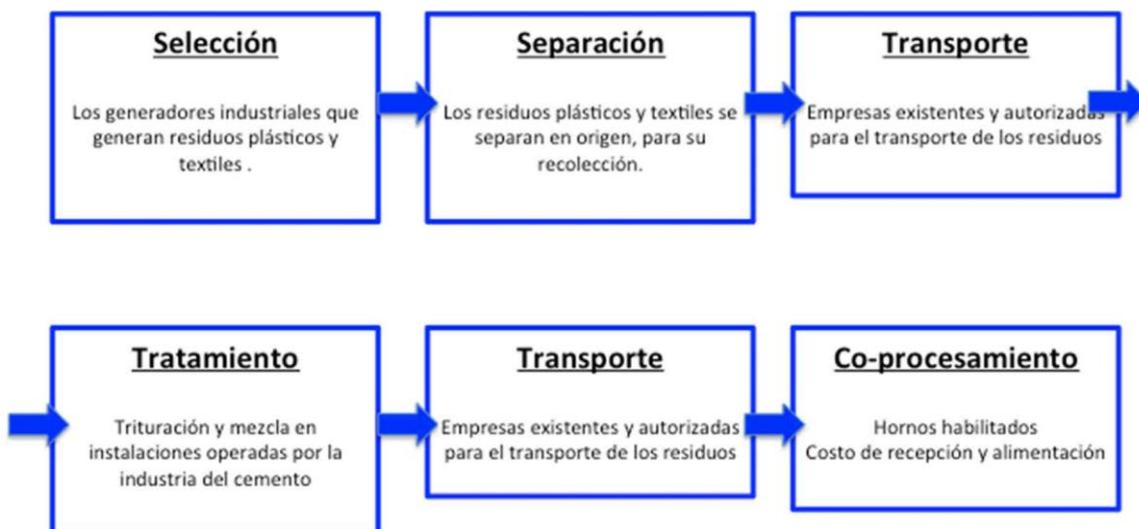
Esta categoría de material parece más atractiva desde la producción industrial. En la medida que aumenten los estándares ambientales de la producción y gestión de residuos, se generarán las condiciones para prestar el servicio de eliminación de estos materiales. Por su naturaleza, los residuos textiles de las zonas francas pueden tratarse de esta misma forma.

El modelo económico más atractivo en este caso es el de la creación de una unidad de negocio al interior de cada empresa cementera que pretenda desarrollar sus actividades de co-procesamiento, que se haga cargo del desarrollo del mercado, de la relación con los generadores, del pre-tratamiento y posterior co-procesamiento de los materiales.

Las actividades de transporte deben estar en manos de empresas especializadas y habilitadas para el efecto.

En el ámbito de la cooperación público-privada, las autoridades nacionales y municipales debieran interactuar con la industria cementera, para generar los incentivos que tiendan a una gestión sostenible de plásticos (y textiles). Estos incentivos podrán ser de tipo motivacional (campañas de sensibilización) o legal, actualizando los marcos regulatorios y fortaleciendo la fiscalización.

**Modelo Económico Plásticos** (Los costos son los establecidos en la Tabla 5)



### 13.3. Residuos Municipales

La articulación de un proyecto que pretenda desarrollar a escala industrial el co-procesamiento de residuos municipales clasificados necesitará necesariamente de mecanismos de cooperación público-privada entre la autoridad y la industria, incluyendo a las empresas que gestionan los vertederos o rellenos sanitarios.

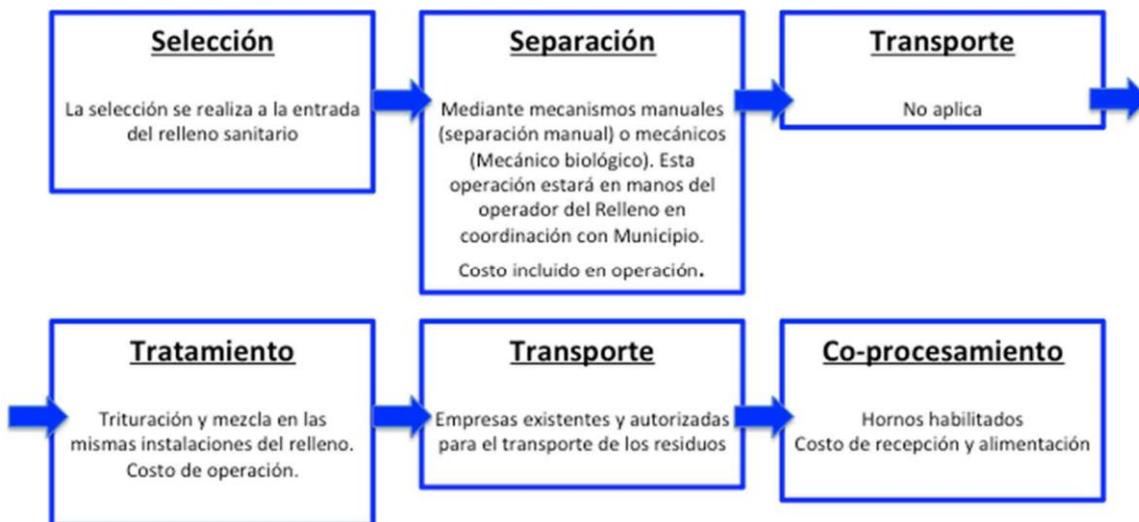
Se requerirán definiciones de alto nivel en cuanto a los tipos de tratamiento que se desean priorizar para los residuos municipales, estableciendo los incentivos necesarios para que la lógica económica de la actividad sea factible.

El factor más relevante en este caso será sin lugar a dudas el establecimiento de las tarifas por la gestión de residuos municipales, que sean compatibles con una gestión racional.

La administración de la actividad deberá estar en manos de un estamento tripartito, conformado por la autoridad, los gestores de residuos y la industria cementera que desarrollará el co-procesamiento.

Será fundamental en la definición de un modelo de negocio, la construcción de capacidades en los diferentes actores, tanto técnicas como de gestión. El buen entendimiento de los beneficios asociados a una correcta gestión de los residuos municipales, su impacto en el estándar de vida de la población, y los efectos sobre cambio climático, favorecerán el alineamiento y la búsqueda de las mejores soluciones locales.

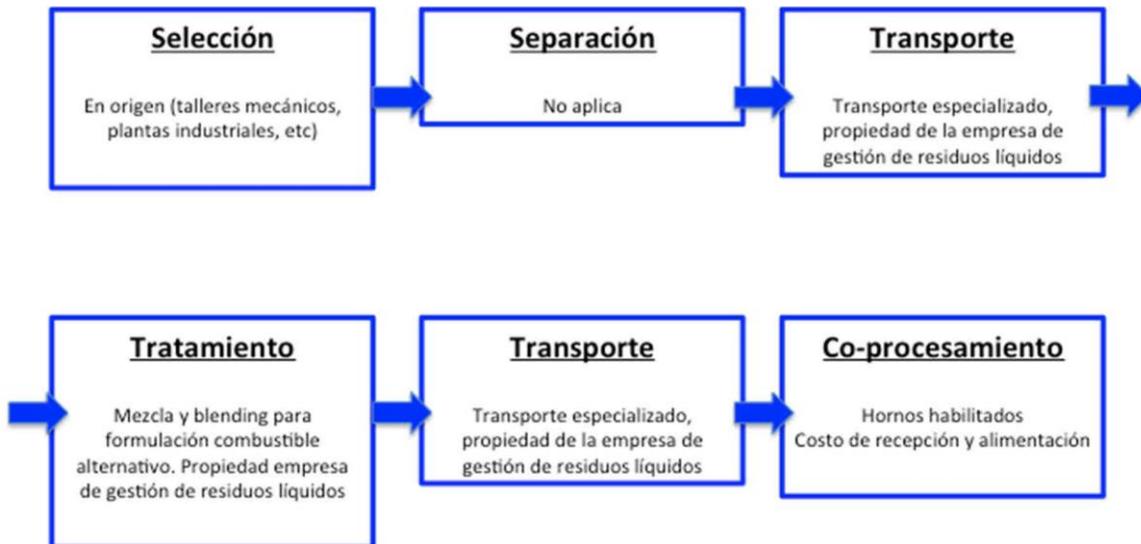
**Modelo Económico RDF** (Los costos son los establecidos en la Tabla 5)



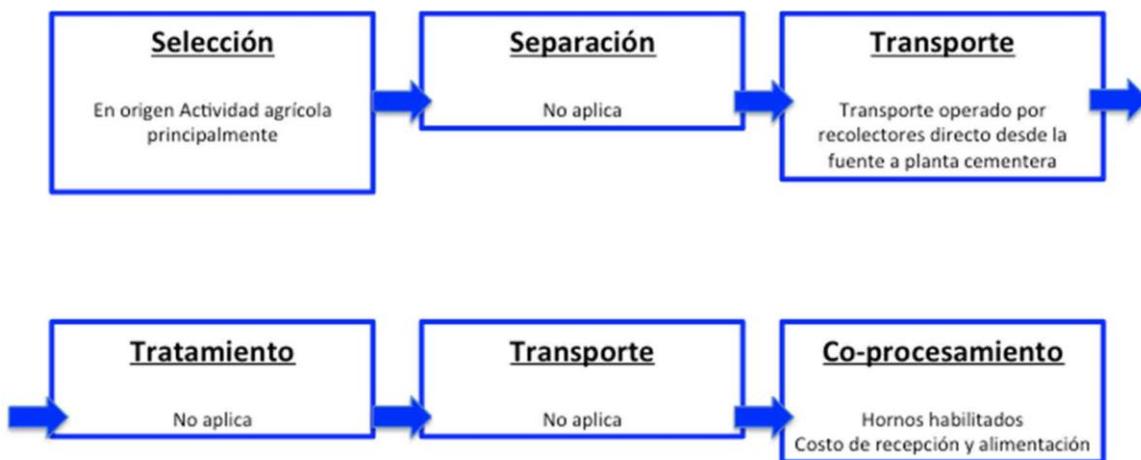
### 13.4. Aceites Usados y Biomasa

Como se indicó anteriormente, corresponde a un negocio de oportunidad, y de gestión directa entre el generador o recolector de estos residuos, con la Planta Cementera.

**Modelo Económico aceite usado** (Los costos son los establecidos en la Tabla 5)



**Modelo Económico Biomasa** (Los costos son los establecidos en la Tabla 5)

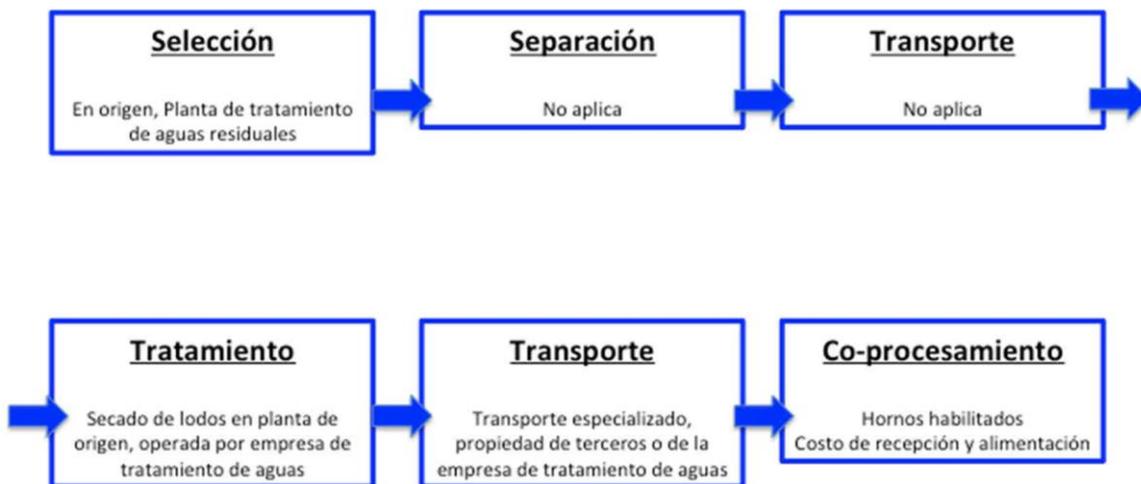


### 13.5. Lodos de Plantas de Tratamiento

En este caso, y dado el grado de desarrollo de la infraestructura de tratamiento de aguas residuales, la conformación de alianzas entre las empresas que realizan el tratamiento, y la industria cementera parece la forma más adecuada de hacerse cargo de este desafío. El rol de la autoridad ambiental en este caso será el de establecer los criterios ambientales para la gestión de dichos lodos, indicando los usos potenciales y restricciones asociadas, lo que necesariamente deberá materializarse en los cuerpos legales que correspondan.

En síntesis, y dada la estructura actual del mercado de los residuos en República Dominicana, se considera que la Industria Cementera debe tomar un rol protagónico en la construcción de los modelos de negocio para el co-procesamiento, en alianza con la autoridad para corrientes específicas como las llantas, residuos municipales y lodos de tratamiento de aguas residuales.

**Modelo Económico Lodos** (Los costos son los establecidos en la Tabla 5)



## 14. Aspectos Técnico- Económicos Modelo de Desarrollo Sector Privado

Las actividades en torno a la cadena de valor del co-procesamiento son estructuradas sobre la base de las capacidades técnicas y financieras del sistema general de gestión de residuos en un país determinado. De esta forma, dependiendo de la realidad local, el sector privado podrá asumir diferentes responsabilidades y grados de gestión en la cadena.

Para el caso de República Dominicana se desconocen por el momento los costos relativos a la cadena de suministro de los materiales, por lo que se han asumido algunos supuestos basados en la experiencia internacional, en particular de América Latina (Ver Tabla 5).

Por otra parte, y por el grado de madurez de la gestión de residuos a nivel país, las corrientes de desecho que aparecen como más atractivas para el desarrollo del co-procesamiento en República Dominicana, son aquellas que se desarrollan en base a modelos económicos específicos, que son los mencionados en el punto 13 anterior.

De esta forma, la evolución técnico-económica del sector privado en actividades relativas al co-procesamiento estará determinada por las inversiones necesarias, los costos en la cadena de suministros (aún por determinar) y los beneficios respecto de la sustitución de combustibles tradicionales, cuya evaluación base se observa en el punto 12.3 del presente reporte.

Con la información disponible, los modelos técnico-económicos que se observan como factibles son los siguientes:

**Llantas:** Inversión por parte de la industria cementera en capacidad de trituración e instalaciones para recepción y alimentación de llantas trituradas.

**Plásticos:** Inversiones en capacidad de pre-tratamiento (trituración y mezcla), además de instalaciones para recepción y alimentación a los hornos.

**RDF:** Inversiones público-privadas en selección, separación y pre-tratamiento de residuos municipales, además de instalaciones para recepción y alimentación a los hornos.

**Líquidos:** Aprovechamiento de la capacidad existente (empresas especializadas), e inversión en instalaciones para recepción y alimentación a los hornos.

**Biomasa:** Desarrollo de recolectores e inversión en instalaciones para recepción y alimentación a los hornos.

Los resultados financieros en base a la información disponible son los que se observan en 12.3.

## **15. Arquitectura para Implementar el Co-procesamiento en República Dominicana**

Tomando como base la realidad actual de la gestión de residuos en República Dominicana, el interés de la autoridad por avanzar en mecanismos que permitan una mejor gestión de residuos y que favorezcan la implementación de proyectos con impactos globales positivos en torno a cambio climático, y la presencia de importantes empresas cementeras en el país, se recomienda la siguiente arquitectura general para

enfrentar la actividad de co-procesamiento de las principales corrientes de combustibles alternativos identificados.

Para el caso de las llantas, RDF y lodos de plantas de tratamiento, la arquitectura más eficiente parece ser la de la cooperación público-privada, sustentada en la creación de una empresa gestora que cuente con una estructura de responsabilidad compartida entre la autoridad ambiental del país, el municipio involucrado en cada caso, y la empresa cementera. Esta estructura estará orientada a facilitar el flujo de materiales desde su generación en condiciones económicas adecuadas para el co-procesamiento (principal responsabilidad de la autoridad), y a garantizar procesos de pre-tratamiento y posterior co-procesamiento de los residuos en condiciones de seguridad y cumplimiento de estándares ambientales (principal responsabilidad de la cementera).

Esta figura puede ser implementada en base a proyectos específicos de Asociación Público-Privada (APPs) entre el municipio, la autoridad ambiental y la empresa, o incluso ser formalizadas como empresa de capitales mixtos en caso de que la normativa legal local lo permita.

Debido a las condiciones económicas imperantes en la gestión de residuos en República Dominicana, caracterizadas por bajos costos en la disposición de residuos, se estima que la participación de terceros en el pre-tratamiento es muy poco factible, debido a los escasos márgenes que el negocio ofrece (Ver punto 12.3 del presente Reporte). La participación de terceros en la cadena de valor estará determinada por las empresas de transporte de residuos y combustibles que hagan parte del negocio, como prestadores del servicio especializado de transporte.

La experiencia internacional indica que las APPs son una buena alternativa para iniciar la actividad del co-procesamiento, siendo la corriente llantas la que se muestra con mayor factibilidad de rápida implementación, sobre la base de una articulación de centros de acopio proporcionados por la autoridad y capacidad de trituración en la que invertirá la industria. Configuraciones más complejas, pero que siguen la misma lógica, deberán ser estructuradas para el caso de los residuos municipales (producción de RDF) y de los lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales.

## **16. Conclusiones y Recomendaciones**

Utilizando la información disponible, se concluye que República Dominicana presenta atractivas condiciones para el desarrollo del co-procesamiento, basado en los siguientes criterios:

- La actividad económica del país implica una interesante y desafiante generación de residuos, los cuales tienen la oportunidad de ser correctamente gestionados.

- La Industria cementera en República Dominicana cuenta con tecnología adecuada para el co-procesamiento, y en el caso de compañías internacionales, también cuenta con experiencia corporativa para el desarrollo de los proyectos de co-procesamiento.
- A nivel gobierno, se evidencia un claro interés en mejorar el estándar en la gestión general de residuos, y de suscribir compromisos internacionales a este respecto.

Sin embargo, se evidencian también algunas barreras que será necesario vencer para un desarrollo sostenible de las actividades de co-procesamiento, dentro de las que destacan:

- Bajo estándar actual de la gestión general de residuos, principalmente marcado por bajos precios de disposición de los materiales de desecho.
- Marcos regulatorios no actualizados, que no promueven el aprovechamiento o valorización de los residuos.
- Información no disponible de las cadenas de suministro, especialmente respecto de la capacidad y costos de esta (transporte y otros).

El análisis efectuado indica que existen interesantes oportunidades para desarrollar el co-procesamiento en la industria cementera dominicana, iniciando por aquellos materiales de desecho que presentan las condiciones más atractivas. Estos materiales corresponden a las llantas usadas y plásticos principalmente de origen industrial, junto a los cuales podrán considerarse los residuos textiles provenientes de zonas francas, en la medida que éstos puedan cuantificarse.

En una segunda etapa de desarrollo parece muy interesante explorar los mecanismos de cooperación que permitan desarrollar el co-procesamiento de residuos municipales clasificados, cuya condición económica actual (bajas tarifas de disposición en vertederos) dificulta una gestión exitosa.

Los mecanismos de cooperación público-privada jugarán sin lugar a dudas un papel fundamental en la construcción de un marco legal, institucional y de relaciones que permita fortalecer las bases sobre las cuales se sustentará un sistema general de gestión de residuos que contemple al co-procesamiento como pilar estratégico.

Estos mismos mecanismos de cooperación público-privada se identifican también como fundamentales para la construcción de modelos de negocio basados en una arquitectura de gestión mixta entre la autoridad ambiental, los municipios y las empresas productoras de cemento.

En el Anexo 2 se entregan antecedentes de la historia de cooperación público-privada que permitió a Chile avanzar en esa dirección.

## 17. Recomendaciones

- Formalizar un grupo de trabajo con representación de la autoridad nacional, municipal (de aquellos municipios con plantas cementeras cercanas) y de la industria del cemento, para construir en conjunto un plan estratégico tendiente a la sostenibilidad del co-procesamiento de residuos en la industria del cemento. Este grupo de trabajo puede formar parte del proyecto de cooperación liderado por GIZ.
- Dentro del contexto del grupo de trabajo mencionado, favorecer el conocimiento de experiencias exitosas en torno al co-procesamiento en países de América Latina (Se recomienda Costa Rica, Chile, México).
- Desarrollar un programa de Construcción de Capacidades, orientado a la capacitación de funcionarios públicos, ejecutivos y empleados de las empresas productoras de cemento, y principales grupos de interés, en torno a las oportunidades y desafíos que impone el co-procesamiento.
- Iniciar al más breve plazo posible los procesos de revisión y actualización de los marcos regulatorios sobre gestión de residuos, con énfasis en los conceptos de jerarquía en la gestión de residuos y de responsabilidad extendida del productor.
- Desarrollo de un proceso de creación del marco regulatorio para el co-procesamiento, basado en las Guías Técnicas sobre co-procesamiento recientemente adoptadas por el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) a través de la Convención de Basilea.
- Profundización en el estudio de mercado y análisis de las cadenas de suministro de los materiales de desecho de interés para el co-procesamiento. En particular, se recomienda un relevamiento en terreno, con visitas a los centros de generación de residuos. En cuanto a las cadenas de suministro, se recomienda un análisis detallado de los tipos de transporte para residuos (peligrosos y no peligrosos) disponibles en el país, y sus estructuras de costo.
- Explorar las oportunidades que ofrece el mercado de los residuos peligrosos y el de las destrucciones fiscales (destrucción de productos caducados o fuera de especificación), como alternativa para el co-procesamiento.
- Para materiales de desecho como residuos municipales y lodos de planta de tratamiento de aguas residuales, se recomienda el diseño e implementación de proyectos piloto que tengan como objetivo explorar las diferentes tecnologías de clasificación y pre-tratamiento para el caso de los residuos municipales, y de secado y alimentación a los hornos para el caso de los lodos de plantas de tratamiento. Estos pilotos deberán estar localizados idealmente en comunidades

cercanas a las plantas cementeras, y tener un tamaño adecuado a los propósitos de experimentación.

- Articulación de proyecto piloto en torno al co-procesamiento de llantas, consistente en la identificación de una planta cementera candidata, campaña de difusión comunitaria, implementación de un centro de acopio, implementación de capacidad de trituración e inversión inicial en co-procesamiento.
- Articulación de proyecto piloto en torno al co-procesamiento de residuos municipales clasificados, consistente en la identificación de una planta cementera candidata, implementación de un sistema manual de separación en vertedero, implementación de capacidad de trituración e inversión inicial en co-procesamiento.
- Articulación de proyecto piloto en torno al co-procesamiento de lodos de planta de tratamiento, consistente en la identificación de una planta de tratamiento eficiente, implementación de un sistema de secado de lodos, identificación de una planta cementera candidata e inversión inicial en co-procesamiento.

# ANEXO

## Definiciones

**Calcinación:** Eliminación o pérdida, inducida por calor, de compuestos volátiles diferentes del agua, unidos químicamente. En la fabricación de cemento se trata de la descomposición térmica de la calcita (carbonato de calcio) y otros minerales carbonatados, que genera un óxido metálico (principalmente CaO) y dióxido de carbono.

**Cemento:** Material inorgánico finamente triturado que, al mezclarse con agua, forma una pasta que fragua y se endurece mediante procesos y reacciones de hidratación y que, después de endurecerse, retiene su dureza y su estabilidad bajo el agua.

**Cemento hidráulico:** Tipo de cemento que fragua y se endurece por interacción química con el agua y que tiene la capacidad de hacerlo bajo el agua.

**Cemento Portland:** Cemento hidráulico producido por pulverización de clínker de cemento Portland y que normalmente contiene sulfato de calcio.

**Clínker de cemento Portland:** Material hidráulico cuya masa está formada, como mínimo, por dos terceras partes de silicatos de calcio ((CaO)<sub>3</sub> SiO<sub>2</sub> y (CaO)<sub>2</sub> SiO<sub>2</sub>) y el resto contiene óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), óxido de hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y otros óxidos.

**Clinkerización:** Formación termoquímica de minerales de clínker, especialmente aquellas reacciones que se producen por encima de 1.300°C; también, zona del horno donde ocurre este proceso. Se conoce también como sinterización o calcinación.

**Combustibles alternativos:** Desechos con valor en energía renovable que se utilizan en un horno de cemento y sustituyen una parte de los combustibles fósiles convencionales como el carbón. Otros términos utilizados son combustibles secundarios, de sustitución o derivados de desechos.

**Combustibles tradicionales (fósiles):** Combustibles carbonados no renovables, incluyendo el carbón y el fuelóleo, utilizados tradicionalmente en la fabricación del cemento.

**Co-procesamiento:** Uso de materiales de desecho adecuados en los procesos de fabricación con el propósito de recuperar energía y recursos y reducir en consecuencia el uso de combustibles y materias primas convencionales mediante su sustitución.

**Desechos:** Sustancias u objetos eliminados, que se pretende eliminar o que se debe eliminar en virtud de lo estipulado en la legislación nacional.

**Desechos peligrosos:** Desechos que pertenecen a cualquier categoría contenida en el anexo I del Convenio de Basilea (“Categorías de desechos que hay que controlar”), a menos que no posean ninguna de las características recogidas en el anexo III del Convenio (“Listado de características peligrosas”): explosivos; líquidos inflamables; sólidos inflamables; sustancias o desechos susceptibles de combustión espontánea; sustancias o desechos que, en contacto con el agua, emiten gases inflamables; oxidantes; peróxidos orgánicos; venenos (agudos); sustancias infecciosas; corrosivos; liberación de gases tóxicos en contacto con el aire o el agua; sustancias tóxicas (con efectos retardados o crónicos);

**Fabricación de clinker por vía seca:** Tecnología del proceso de fabricación de cemento. En la fabricación por vía seca, las materias primas entran al horno de cemento en estado seco después de haber sido molidas hasta obtener un polvo fino denominado harina cruda. La fabricación por vía seca consume menos energía que la fabricación por vía húmeda, en la que se añade agua a las materias primas durante la molienda para obtener la lechada.

**Gestión ambientalmente racional:** Adopción de todas las medidas posibles para asegurar que los desechos peligrosos y otros desechos sean gestionados de manera que se proteja la salud humana y ambiental de cualquier efecto adverso que pueda derivarse de tales desechos.

**Horno rotatorio:** Horno que consiste en un tubo rotatorio de acero ligeramente inclinado y cubierto con ladrillos refractantes. El horno se alimenta con materias primas por el extremo superior y se calienta al fuego, principalmente por la parte inferior, que es también por donde sale el producto (clínker).

**Jerarquía de (gestión de) desechos:** Listado de estrategias de gestión de desechos ordenadas por preferencia, y en la que la opción más deseable es la prevención de producción de desechos, y la menos deseable la eliminación. En algunas corrientes de desechos específicas puede ser necesario prescindir de la jerarquía por razones de viabilidad técnica o económica o de protección ambiental.

**Materias primas alternativas:** Material de desecho que contiene minerales utilizables como calcio, sílice, aluminio y hierro, utilizable en el horno para sustituir materias primas como la arcilla, la pizarra y la piedra caliza. También se denominan materias primas secundarias o de sustitución.

**Mezcla cruda / crudo / alimentación:** Materia prima de alimentación de la línea de horno, convenientemente triturada, molida, distribuida y homogeneizada cuidadosamente.

**Petcoke:** El coque de petróleo (en inglés, petroleum coke, abreviado como pet coke) es un sólido carbonoso derivado de las unidades de coquización en una refinería de petróleo o de otros procesos de craqueo. Otros coques tradicionalmente han sido derivados del carbón

**Poder (valor) calorífico:** Calor producido por unidad de masa en la combustión completa de una sustancia determinada. El poder calorífico se utiliza para expresar el poder energético de los combustibles, y normalmente se expresa en megajulios por kilogramo (MJ/kg).

**Poder (valor) calorífico inferior (PCI):** El poder calorífico superior menos el calor latente de vaporización del vapor de agua formado por la combustión del hidrógeno en el combustible. También recibe el nombre de poder calorífico neto.

**Poder (valor) calorífico superior (PCS):** Cantidad máxima de energía que se puede obtener por combustión de un combustible, incluida la energía liberada cuando se condensa el vapor producido durante la combustión.

**Precalcinador:** Equipo de la línea de horno, normalmente combinado con un precalentador, en el que se consigue una calcinación de parcial a casi total de minerales carbonatados antes del propio horno, y que utiliza una fuente independiente de calor. El precalcinador reduce el consumo de combustible del horno y permite que éste sea más corto, ya que no tiene que realizar la función de calcinación completa.

**Precalentador:** Equipo para calentar la mezcla cruda antes de que alcance el horno seco. En los hornos secos modernos el precalentador suele estar combinado con un precalcinador. Los precalentadores utilizan los gases de escape calientes del horno como fuente de calor.

**Preprocesamiento o Pretratamiento:** Los residuos que no tengan características uniformes procedentes de diferentes corrientes de residuos deben prepararse antes de ser utilizados en una planta de cemento. El proceso de preparación, o pre-procesamiento, es necesario para producir una corriente de desechos que satisfaga las especificaciones técnicas y administrativas de la producción de cemento y así garantizar que se cumplan las normas ambientales.

**Recuperación:** Toda operación en la que los desechos resultan útiles para sustituir otros materiales que, de otro modo, serían necesarios para desempeñar una función determinada, o desechos que se preparan para desempeñar dicha función, en la planta o en la economía a mayor escala.

## Evaluación Económica Proyectos

Precio Combustible Tradicional (petcoke / carbón) (USD/Ton)	<140					
	Llanta Triturada	Plástico	RDF	Líquidos	Biomasa	Lodos
Poder Calorífico Comb. Tradicional (GJ/ton)	32	32	32	32	32	32
Costo Combustible Tradicional (USD/Ton)	@140	@140	@140	@140	@140	@140
Costo Combustible Tradicional (USD/GJ)	@4,38	@4,38	@4,38	@4,38	@4,38	@4,38
Poder Calorífico Comb. Alternativo (GJ/ton)	27	29	15	36	17	10
Costo Disposición Residuo (compra, cobro) (USD/ton)	0	10	10	0	0	10
Costo Logístico generador pre proceso (USD/ton)	0	@20	0	0	0	0
Costo Pre procesamiento (USD/ton)	@25	@35	@40	0	0	@10
Costo comb. Alternativo (USD/ton)	@25	@45	@30	0	0	0
Costo Comb. Alternativo (USD/GJ)	@0,93	@1,55	@2,00	0,00	0,00	0,00
Costo Logístico pre proceso planta cementera (USD/ton)	@10	@20	@10	@10	@20	@10
Costo de recepción Alimentación (USD/ton)	@5	@5	@5	@5	@5	@5
Costo final Comb. Alternativo en horno (USD/ton)	@40	@70	@45	@15	@25	@15
Costo final Comb. Alternativo en horno (USD/GJ)	@1,48	@2,41	@3,00	@0,42	@1,47	@1,50
Beneficio por Sustitución térmica (USD/ton comb. Alternativo)	118,1	126,9	65,6	157,5	74,4	43,8
Utilidad (+) Pérdida (-) (USD/ton comb. Alternativo)	78,1	56,9	20,6	142,5	49,4	28,8
Utilidad (+) Pérdida (-) (USD/año) para 40.000 ton/año	3.125.000	2.750.000	825.000	5.700.000	1.975.000	1.150.000
Inversión Pre proceso (USD) para 40.000 ton/año	2.500.000	5.000.000	8.000.000	8.000.000	5.000.000	5.000.000
Inversión Recepción Alimentación (USD) para 40.000 ton/año	3.500.000	3.500.000	3.500.000	4.500.000	2.500.000	2.500.000
Inversión Total	6.000.000	8.500.000	11.500.000	12.500.000	7.500.000	7.500.000
Payback Estático (años)	1,9	3,7	13,9	0,8	1,3	6,5
TSR Para un horno de 2000 ton/cli/día y de 3.4500 MJ/ton Cli	44%	48%	25%	59%	28%	16%

**Precio Combustible Tradicional (petcoke/'ca rbon)'(USD/Ton) <120**

	Llanta Triturada	Plástico	RDF	Líquidos	Biomasa	Lodos
Poder&Calorífico&Comb.&Tradicional&(GJ/ton)	32	32	32	32	32	32
Costo&Combustible&Tradicional&(USD/Ton)	@120	@120	@120	@120	@120	@120
Costo&Combustible&Tradicional&(USD/GJ)	@3,75	@3,75	@3,75	@3,75	@3,75	@3,75
Poder&Calorífico&Comb.&Alternativo&(GJ/ton)	27	29	15	36	17	10
Costo&Disposición&Residuo&(@&compra,&+&cobro)&(USD/ton)	10	10	10	0	0	10
Costo&Logístico&generador&@&pre@proceso&(USD/ton)	0	@20	0	0	0	0
Costo&Pre@procesamiento&(USD/ton)	@25	@35	@40	0	0	@10
Costo&comb.&Alternativo&(USD/ton)	@15	@45	@30	0	0	0
Costo&Comb.&Alternativo&(USD/GJ)	@0,56	@1,55	@2,00	0,00	0,00	0,00
Costo&Logístico&pre@proceso&@&planta&cementera&(USD/ton)	@10	@20	@10	@10	@20	@10
Costo&de&recepción&/&Alimentación&(USD/ton)	@5	@5	@5	@5	@5	@5
Costo&final&Comb.&Alternativo&en&horno&(USD/ton)	@30	@70	@45	@15	@25	@15
Costo&final&Comb.&Alternativo&en&horno&(USD/GJ)	@1,11	@2,41	@3,00	@0,42	@1,47	@1,50
Beneficio&por&Sustitución&térmica&(USD/ton&comb.&Alternativo)	101,3	108,8	56,3	135,0	63,8	37,5
Utilidad&(+)&/&Pérdida&(@)&(USD/ton&com b.&Alternativo)	71,3	38,8	11,3	120,0	38,8	22,5
Utilidad&(+)&/&Pérdida&(@)&(USD/año)&para&40.000&ton/año	850.000	550.000	450.000	1.800.000	1.550.000	900.000
Inversión&Pre@proceso&(USD)&para&40.000&ton/año	2.500.000	5.000.000	8.000.000	8.000.000	5.000.000	5.000.000
Inversión&Recepción&/&Alimentación&(USD)&40.000&ton/año	3.500.000	3.500.000	3.500.000	4.500.000	2.500.000	2.500.000
Inversión&Total	6.000.000	8.500.000	11.500.000	12.500.000	7.500.000	7.500.000
Payback&Estático&(años)	2,1	5,5	25,6	0,9	1,6	8,3
TSR&Para&un&horno&de&2.000&ton&cl i/día&y&de&3.4500&MJ/ton&Cl	44%	48%	25%	59%	28%	16%







Deutsche Gesellschaft für  
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Oficinas registradas  
Bonn y Eschborn

Friedrich-Ebert-Allee 36 + 40  
53113 Bonn, Alemania  
T +49 228 44 60-0  
F +49 228 44 60-17 66

Dag-Hammarskjöld-Weg 1-5  
65760 Eschborn, Alemania  
T +49 61 96 79-0  
F +49 61 96 79-11 15

E [info@giz.de](mailto:info@giz.de)  
I [www.giz.de](http://www.giz.de)