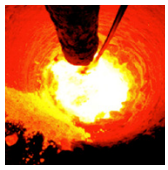
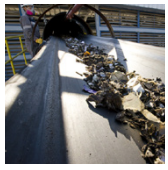




Potencial para la valorización energética de residuos urbanos en México, a través del coprocesamiento en hornos cementeros

Programa Aprovechamiento Energético
de Residuos Urbanos en México

MÉXICO
GOBIERNO DE LA REPÚBLICA

SENER
SECRETARÍA DE ENERGÍA

SEMARNAT
SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS NATURALES

cooperación
alemana
DEUTSCHE ZUSAMMENARBEIT

giz Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Programa Aprovechamiento Energético de Residuos Urbanos:	Av. Insurgentes Sur 813, oficina 1301 Col. Nápoles, CP 03810 Ciudad de México, México
Ejecutado por:	GIZ México Dirección General de Energías Limpias SENER Dirección General de Fomento Ambiental, Urbano y Turístico SEMARNAT
Por encargo de:	Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ) de Alemania
Autor:	Andrés Jensen Velasco
Diseño y coordinación editorial:	Leticia Llamas De la Torre, México
Fotografías:	Portada Holcim© Contraportada Holcim© Alexandra Giese – Shutterstock, (última de izquierda a derecha y de arriba a abajo)
Fecha de publicación:	Octubre, 2016

Las opiniones expresadas en este documento no necesariamente representan la opinión de SENER, SEMARNAT y la GIZ. Se autoriza la reproducción parcial o total, siempre y cuando sea sin fines de lucro y se cite a la fuente de referencia.

Potencial para la valorización energética de residuos urbanos en México a través del coprocesamiento en hornos cementeros

ENRES

Programa Aprovechamiento Energético de Residuos Urbanos en México

La presente publicación fue elaborada como parte del Programa Aprovechamiento Energético de Residuos Urbanos (EnRes). Su objetivo es introducir, como una opción tecnológica, el aprovechamiento energético en la gestión de residuos urbanos y lodos provenientes de plantas de tratamiento de agua residual en México.

El programa es desarrollado en conjunto con la Secretaría de Energía (SENER) –Dirección General de Energías Limpias– y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) –Dirección General Ambiental, Urbano y Turístico–, siendo ejecutado por la Cooperación Alemana para el Desarrollo (GIZ) a través del encargo del Ministerio Federal Alemán de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ).

El contenido muestra un diagnóstico sobre la factibilidad de introducir el coprocesamiento como opción para aprovechar energéticamente los residuos sólidos urbanos y los lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales en México. El documento introduce los actores involucrados en esta industria, el panorama nacional, el potencial de sustitución de combustibles fósiles y los beneficios ambientales y económicos asociados a esta práctica; así como los desafíos legales y de política pública a tener en cuenta para aprovechar este potencial en el país.

CONTENIDO

SIGLAS Y SÍMBOLOS 5

RESUMEN EJECUTIVO 7

1. CONTEXTO EN MÉXICO 11

2. PRINCIPALES EMPRESAS CEMENTERAS 15
- Cemex 15
- LafargeHolcim (ex Holcim México) (ex Grupo Apasco) 15
- Cooperativa Cruz Azul 15
- GCC Grupo Cemento Chihuahua 15
- Cementos Fortaleza 16
- Cementos Moctezuma 16

3. MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS URBANOS EN MÉXICO 19
- 3.1. Aspectos generales 19
- 3.2. Marco regulatorio 20

4. COPROCESAMIENTO EN HORNOS CEMENTEROS 23
- 4.1. Generalidades 23
- 4.2. Fundamentos para una actividad de coprocesamiento sostenible 25
  - 4.2.1. Mercado de los residuos y estructura de la cadena de suministros 25
  - 4.2.2. Capacidad técnica en plantas de cemento y aspectos económicos 25
  - 4.2.3. Marcos regulatorios y partes interesadas 26

5. COPROCESAMIENTO DE RSU 29
- 5.1. Generalidades 29
- 5.2. Potencial de la valorización energética de RSU por coprocesamiento en la industria cementera mexicana 34
  - 5.2.1. NAMA Sector Cemento 34
  - 5.2.2. Proyecciones NAMA Cemento 36
- 5.3. Potencial teórico en México 37
- 5.4. Desafíos para alcanzar el potencial 40
  - 5.4.1. Operaciones 40
  - 5.4.2. Desarrollo de capacidades 43
  - 5.4.3. Desarrollo y actualización de marcos regulatorios 44
- 5.5. Barreras identificadas 45
- 5.6. Recomendaciones 45

6. COPROCESAMIENTO DE LLANTAS USADAS 47
- 6.1. Generalidades 47
- 6.2. Potencial para coprocesamiento de llantas usadas en México 50
- 6.3. Recomendaciones 51

7. COPROCESAMIENTO DE LODOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) 53
- 7.1. Generalidades 53
- 7.2. Desafíos técnicos 55
- 7.3. Disponibilidad de lodos en México 55
- 7.4. Potencial para coprocesamiento de lodos de planta de tratamiento 55
- 7.5. Recomendaciones 59

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 61
- 8.1. Conclusiones 61
- 8.2. Recomendaciones 63

REFERENCIAS GENERALES 64

TABLAS

TABLA 1 Tipos de combustibles empleados en la industria cementera en México ... 11
TABLA 2 Producción de Cemento en México durante 2012 ... 12
TABLA 3 Plantas de producción de cemento en México ... 16
TABLA 4 Principios para el coprocesamiento ... 24
TABLA 5 Simulación de utilidad de operación del proyecto FIRSU bajo supuestos conservadores de poder calorífico, costos combustible tradicional, costos por disposición de residuos, costos logísticos y costos operativos ... 31
TABLA 6 Simulación de utilidad de operación del proyecto FIRSU bajo supuestos de incremento en el costo del combustible tradicional, manteniendo valores de poder calorífico, costos por disposición de residuos, costos logísticos y costos operativos ... 32
TABLA 7 Simulación de utilidad de operación del proyecto FIRSU bajo supuestos de incremento en el costo (tarifas) por disposición de residuos, manteniendo valores de poder calorífico, costo de combustible tradicional, costos logísticos y costos operativos ... 33
TABLA 8 Sustitución de coprocesamiento en Europa durante 2012 ... 38
TABLA 9 Potencial tasa de sustitución y volumen de RSU en función de niveles de ingreso por servicio de coprocesamiento y costo combustible tradicional. (Criterio: rentabilidad justifica inversiones) ... 39
TABLA 10 Simulación utilidad operación coprocesamiento lodos PTAR secos. Supuesto: Nivel actual costo combustible tradicional e ingresos por servicios de gestión por 20 USD/t de lodo ... 57
TABLA 11 Simulación utilidad operación coprocesamiento lodos PTAR secos. Supuesto: Costo combustible tradicional 140 USD/t, sin ingresos por concepto de gestión de residuos ... 58
TABLA 12 Potencial tasa de sustitución y volumen Lodos PTAR en función de niveles de ingreso por servicio de coprocesamiento y costo combustible ... 59

GRÁFICOS

GRÁFICO 1 Participación de Mercado (2012) ... 13
GRÁFICO 2 Distribución geográfica de plantas cementeras en México ... 17
GRÁFICO 3 Generación de residuos sólidos urbanos por región, 2011 ... 19
GRÁFICO 4 Jerarquía gestión de residuos ... 23
GRÁFICO 5 Ámbitos de acción para sostenibilidad del coprocesamiento ... 27
GRÁFICO 6 Relación volumen total RSU v/s potencial coprocesamiento ... 37
GRÁFICO 7 Esquema de opciones para pretratamiento de RSU ... 41
GRÁFICO 8 Configuración típica y nivel de inversión para separación y pretratamiento RSU (hasta 40,000 t/año) ... 41
GRÁFICO 9 Configuración típica y nivel de inversión para recepción y alimentación a hornos (hasta 40,000 t/año) ... 42
GRÁFICO 10 Puntos de alimentación combustible alterno a horno cementero BAT ... 42
GRÁFICO 11 Proceso de construcción de capacidades para coprocesamiento ... 43
GRÁFICO 12 Secuencia cooperación público-privada para gestión sostenible de llantas usadas – México 2008 ... 48
GRÁFICO 13 Cartel promoción campaña recolección llantas usadas, México 2008 ... 48
GRÁFICO 14 Impacto campaña de recolección de llantas usadas – México 2008 ... 49
GRÁFICO 15 Trituradora móvil de llantas México 2008 ... 50
GRÁFICO 16 Lodos de las PTAR ... 53
GRÁFICO 17 Secado de lodos con proceso térmico ... 54
GRÁFICO 18 Secado de lodos con proceso solar ... 54

SIGLAS Y SÍMBOLOS

AMEXA	Asociación Mexicana de Empresas Ambientales
BAT	Mejores Tecnologías Disponibles (*Best Available Techniques*)
CANACEM	Cámara Nacional del Cemento
CEMEX	Cementos Mexicanos
CH_4	Metano
CO_2	Dióxido de Carbono
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
FIRSU	Fracción Inorgánica de Residuos Sólidos Urbanos
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GIZ	Cooperación Alemana al Desarrollo Sustentable (*Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit*)
GTZ	Agencia Alemana de Cooperación Técnica (*Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit*)
kcal	Kilocaloría
kg	Kilogramo
LGEEPA	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente
LGPGIR	Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos
mm	Milímetro
Mtep	Millones de toneladas equivalentes de petróleo
NAMA	Acciones Nacionales Apropiadas de Mitigación (*Nationally Appropriate Mitigation Actions*)
NOM	Norma Oficial Mexicana
ONG	Organización No Gubernamental
PIB	Producto Interno Bruto
PNUMA	Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente
PTAR	Planta de tratamiento de Aguas Residuales
RDF	Combustible Derivado de Residuos (*Refuse Derived Fuel*)
REP	Responsabilidad Extendida del Productor
RSU	Residuo Sólido Urbano

SEDESOL	Secretaría de Desarrollo Social
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SIMEPRODE	Sistema Integral para el Manejo Ecológico y Procesamiento de Desechos
SRF	Combustibles sólidos recuperados (*Solid Recovered Fuels*)
t	Tonelada
USD	Dólares de Estados Unidos de América

RESUMEN EJECUTIVO

La industria cementera mexicana ha sido pionera en América Latina en el coprocesamiento de residuos como fuente alternativa de combustibles y materias primas para su proceso productivo. Desde fines de la década de los noventa se ha desarrollado una capacidad relevante para el pre y coprocesamiento de residuos de diverso tipo, destacando los residuos de origen industrial, las llantas usadas y algunos residuos líquidos como aceites y solventes usados (en las primeras etapas de desarrollo). Actualmente la industria cementera mexicana presenta niveles de coprocesamiento cercanos al 13% en términos de sustitución térmica promedio, con las empresas Cemex y Holcim (ahora LafargeHolcim), como los claros líderes.

Existe una corriente de residuos que no ha sido parte de este crecimiento del coprocesamiento en hornos cementeros, y que implica uno de los mayores desafíos para el país en cuanto a gestión general de residuos. Estos son los residuos sólidos urbanos.

Los residuos sólidos urbanos se gestionan principalmente mediante su disposición en rellenos sanitarios, muchas veces sin un control adecuado. Iniciativas de valorización para este tipo de materiales se limitan a la actividad de recicladores informales (pepenadores) o iniciativas aisladas por parte de la autoridad ambiental o ciertos gobiernos de estados específicos. Conceptos modernos en la gestión de residuos urbanos, como la Responsabilidad Extendida del Productor (REP), no tienen un mayor desarrollo en la actualidad.

Estimaciones de la SEMARNAT (2012) indican que la generación de residuos sólidos urbanos implica volúmenes de 37,6 millones de toneladas anuales, de las cuales menos de 60% se deposita en rellenos sanitarios controlados. Las tasas de reciclaje, por otra parte, no superan el 10% en el nivel nacional.

Estos volúmenes de generación de residuos sólidos urbanos, y su gestión actual, hacen atractivo un análisis del uso potencial de estos desechos como combustible alterno en la industria del cemento. La experiencia en países desarrollados (Europa principalmente) indica que esta actividad presenta grandes beneficios tanto públicos como privados, en la medida que se cumplan las condiciones adecuadas para su desarrollo.

Si se toma como base la experiencia internacional, y se considera el hecho de que la industria cementera mexicana cuenta con instalaciones modernas que ofrecen las mejores tecnologías disponibles, se puede estimar que el volumen potencial de residuos sólidos urbanos que podría gestionarse a través de su coprocesamiento alcanza los 3,1 millones de toneladas anuales, correspondientes a un 8.2% del total generado. Este volumen se basa en un reemplazo de energía térmica en la industria del cemento (sustitución de combustibles fósiles como coque de petróleo o carbón), equivalente a un 30% del total.

Este potencial teórico tiene asociada una serie de beneficios paralelos, dentro de los que destacan una gestión de residuos sostenible, y un impacto relevante en las emisiones de gases de efecto invernadero, con una reducción total teórica de 3,2 millones de toneladas de CO_2 anualmente.

Para lograr alcanzar este potencial se requiere la materialización de una serie de condiciones económicas, técnicas y regulatorias, dentro de las que destaca la necesidad de inyección de recursos en la cadena de valor en la gestión de residuos (por ejemplo, a través de fórmulas como la Responsabilidad Extendida del Productor), optimización operacional y logística, y actualización de marcos regulatorios, tanto en el campo de la gestión de residuos como de la producción de cemento.

También es muy importante considerar algunas externalidades que definen la factibilidad de las actividades de coprocesamiento, y que complementan los conceptos anteriores. La más importante es la que tiene relación con el costo de los combustibles fósiles tradicionales. A mayor costo de estos, mayor será el incentivo de la industria para invertir en reemplazo de combustibles y en desarrollo de capacidades de procesamiento de combustibles alternos.

Si se considera la fluctuación histórica en el costo de los combustibles fósiles tradicionales, y el desarrollo de políticas públicas e iniciativas privadas que permitan dotar de recursos a la cadena de valor, se estima que para el mediano y largo plazo, el volumen de residuos sólidos urbanos a gestionar por coprocesamiento debiera estar en el rango de 500,000 a 2,000,000 de toneladas anuales. El potencial teórico de 3,100,000 toneladas anuales solamente se considera factible en el largo plazo, una vez que las condiciones regulatorias y de desarrollo alcancen los niveles que existen, por ejemplo, en los países europeos.

En México destaca la iniciativa de la empresa Cemex en torno a su proyecto de aprovechamiento de la Fracción Inorgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FIRSU), que consiste básicamente en el preprocesamiento y coprocesamiento de residuos sólidos urbanos. Este proyecto permitirá ganar una valiosa experiencia para la industria y la autoridad involucrada.

Otras corrientes de residuos masivos que se presentan como atractivas son las llantas usadas y los lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales.

En el caso de las llantas usadas, la industria cementera mexicana posee una importante experiencia, y el potencial parece muy atractivo, en la medida que los aspectos regulatorios con respecto a las obligaciones de los generadores de llantas usadas se actualicen y modernicen. Se estima que la tecnología disponible en México permite alcanzar niveles teóricos máximos de un 40% de sustitución de combustibles tradicionales por llantas usadas, lo que permitiría gestionar volúmenes del orden de las 1,1 millones de toneladas anualmente. En este caso particular, los desafíos logísticos y de preprocesamiento son los aspectos operacionales más relevantes.

En lo que se refiere a los lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales, es importante destacar que México está aumentando sostenidamente la capacidad de tratamiento de aguas, con el consiguiente aumento en la generación de lodos. La experiencia internacional indica que estos lodos son factibles de gestionar por coprocesamiento en los hornos cementeros, con resultados positivos. En Europa, por ejemplo, la industria cementera es el principal destino de estos materiales en la actualidad.

Se estima que los hornos cementeros presentes en México son capaces de coprocesar hasta 3,5 millones de toneladas de lodos anualmente, reemplazando hasta un 24% de los combustibles tradicionales. Alcanzar este potencial requerirá el desarrollo de la capacidad técnica necesaria para el preprocesamiento (secado) de estos lodos, así como el desarrollo de marcos regulatorios que permitan inyectar los recursos económicos que hagan rentable la actividad.

La experiencia internacional en el coprocesamiento de residuos sólidos urbanos, llantas usadas y lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales indica que el mercado del coprocesamiento se optimizará con base en criterios de rentabilidad. Esto quiere decir que el costo de los combustibles tradicionales, los costos/beneficios en la cadena de valor de cada uno de estos materiales, y la oportunidad de gestionar otros materiales de desecho provenientes por ejemplo de fuentes industriales, harán que finalmente cada planta cementera optimice su actividad tomando en consideración criterios técnico-económicos, los que en el nivel nacional implicarán que solamente parte del potencial de cada uno de los materiales analizados se gestionará a través de la tecnología de coprocesamiento en hornos cementeros.

CONTEXTO EN MÉXICO

1

Después de Brasil, México es el segundo mercado de cemento más grande de América Latina, y es el decimotercero mayor del mundo. Seis grupos cementeros están presentes en el país con un total de 34 plantas de cemento, entre los cuales se encuentra la única empresa cementera no europea que forma parte del grupo de las 5 empresas más grandes del mundo: Cemex. Todas las empresas concentran la mayor parte de sus operaciones en el centro del país, a excepción de Grupo Cementos Chihuahua, cuyas operaciones se concentran en la región norte.

México es uno de los 10 mayores productores de petróleo en el nivel mundial, y en la actualidad el principal de América Latina, a pesar de que su producción ha venido declinando de manera sustancial (22%) desde su máximo en el año 2004.

Las principales fuentes de energía primaria en México son el petróleo en un 54% seguido por el gas natural cuya participación es del 30%. La tendencia en cuanto a fuentes de energía primaria es hacia una mayor utilización de gas natural en el sector de generación eléctrica. No obstante, la disponibilidad de gas natural estará sujeta a la oferta de gas proveniente de Estados Unidos de América o de gas natural licuado de otros países. El país también consume otros combustibles en menores cantidades, entre los que se destaca el carbón (5.4%) y la biomasa (4.4%); de los cuales 75% se usa para fines domésticos, 13% se destina a la generación de electricidad, y 12% se destina al uso industrial.

El consumo de energía del sector cementero en México se ubica en alrededor de 2.2 Mtep,[1] es decir, cerca del 1.2% de la energía total consumida en el país o 1.9% de aquella consumida por usuarios finales de energía.

La industria cementera en México emplea combustibles fósiles tradicionales (principalmente correspondiente a coque de petróleo de producción nacional y también importado), combustibles alternos de origen fósil provenientes de residuos industriales y biomasa (aserrines, cascarilla de arroz, restos vegetales, etcétera), tal y como se muestra en la **TABLA 1** para el periodo de 2010 a 2011, observándose una tendencia creciente hacia un mayor uso de combustibles alternos, principalmente de origen industrial.

La matriz de combustibles para los años indicados se estima de la siguiente forma:

TABLA 1 Tipos de combustibles empleados en la industria cementera en México

Tipo de combustible	2010	2011
Combustible tradicional	90.0%	86.0%
Combustibles alternos fósiles (elaborados con base en residuos)	8.5%	12.0%
Biomasa	0.9%	1.6%

FUENTE: elaboración Propia con base en información de la industria cementera.

[1] Mtep: Millones de toneladas equivalentes de petróleo, que corresponde a la cantidad teórica de este combustible que se requeriría para satisfacer la demanda total de energía de la industria cementera mexicana en este caso.

La industria cementera consume alrededor del 6.5% del carbón que se usa en el país, y un equivalente al 2.3% de petróleo que se utiliza a nivel de usuario final. Asimismo, consume 3% de la biomasa y de los desechos que se emplean en el país en lo que toca al usuario final. Si estas cifras se trasladan al nivel del total de energía suministrada al país para satisfacer la demanda de los usuarios finales, estas cifras alcanzarían 1.2% de carbón primario y 1.8% de petróleo.

Por otro lado, si se consideran las cifras de los años 2010 y 2011, el sector es responsable de alrededor de un 5% (22 millones de toneladas de CO_2/año) del total de emisiones de CO_2 del país (de 420 a 430 millones de toneladas de CO_2/año).

De lo anterior se desprende que el sector cementero tiene una importancia considerablemente mayor en términos de emisiones de CO_2 y de consumo de energía que en términos de su contribución al Producto Interno Bruto (PIB) o a la generación de empleo directo.

De hecho, el sector es considerado como uno de los más importantes dentro del marco de las estrategias de reducción de emisiones de CO_2 emprendidas por México, siendo objetivo del reciente impuesto al carbono y del diseño de una Acción Nacional Apropiada de Mitigación (NAMA), impulsada por la Cámara Nacional del Cemento (CANACEM).

México cuenta con una capacidad instalada de producción de cemento de 58,8 millones de toneladas anuales y una producción anual de 36,2 millones de toneladas de cemento, lo que equivale a un factor de utilización relativamente bajo: 61.5%. Adicionalmente, es importante destacar que el país se vio más afectado por la última crisis financiera internacional que otros países de la región latinoamericana, puesto que su economía depende fuertemente de la estadounidense. La **TABLA 2** muestra una comparación entre la producción real y la capacidad instalada para 2012 de cada una de las empresas presentes en México.

TABLA 2 **Producción de Cemento en México durante 2012**

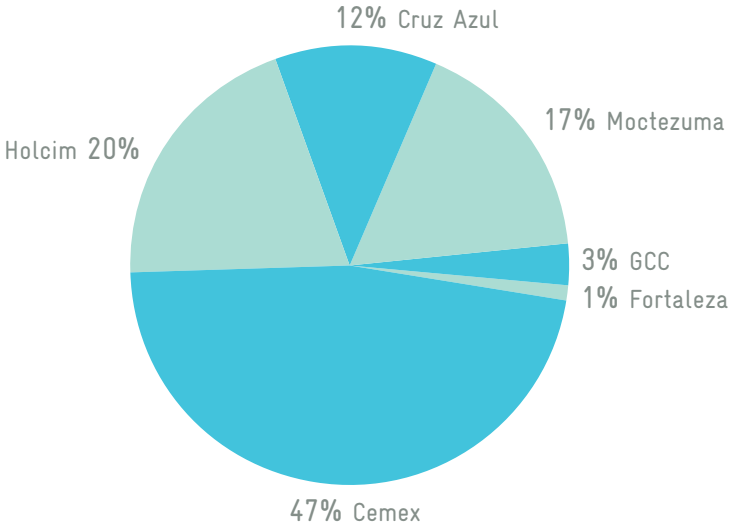
Cementera	Producción (toneladas)	Capacidad (toneladas)
Cemex	17,000,000	29,300,000
Holcim	7,200,000	12,200,000
Cruz Azul	4,200,000	7,000,000
Chihuahua	1,100,000	1,900,000
Moctezuma	6,200,000	6,600,000
Fortaleza	500,000	1,800,000
Total	36,200,000	58,800,000

FUENTE: CANACEM.

Cemex es el mayor productor de cemento en el país, con aproximadamente un 47% del mercado, seguido por Holcim[2] con un 20%. Esto significa que dos productores poseen aproximadamente el 67% del mercado, es decir, dos tercios de este. Por el momento, Fortaleza se considera como un productor de cemento pequeño. Sin embargo, en vista de la reciente entrada como accionista del grupo económico controlado por Carlos Slim, se espera que la cuota de mercado de esta empresa aumente en el futuro cercano. El **GRÁFICO 1** muestra la participación de mercado estimada para el año 2012.

[2] Desde el 15 de julio de 2015, la empresa Holcim se fusionó a nivel internacional con la empresa Lafarge, naciendo la empresa LafargeHolcim.

GRÁFICO 1 **Participación de Mercado (2012)**



FUENTE: elaboración propia.

El 84% de la producción cementera del país está en manos de empresas multinacionales. Además de Holcim y Cemex, Moctezuma también puede ser considerada como una empresa multinacional, a pesar de que sus accionistas, Cementos Molins de España y Buzzi Unicem Italia son empresas mucho más pequeñas que las dos primeras. Dado que Lafarge ya no ejerce control sobre Fortaleza, esta empresa se considera nacional. Por otra parte, Grupo Cementos Chihuahua, GCC, al tener una mayor presencia en Estados Unidos que en México, se considera como una empresa transnacional. Por lo tanto, el mercado mexicano está dominado por empresas multinacionales, quienes captan un 84% del mercado.

Cemex

Cemex fue fundada en 1906 cuando se construyó la primera planta (Cementos Hidalgo) en el norte de México. La empresa comienza a cotizar en la Bolsa Mexicana de Valores en 1976, y tras la adquisición de Cementos Guadalajara se convierte en el principal productor de cemento del país. Su proceso de expansión en México continuó con la adquisición de Cementos Anáhuac en 1987 y Cementos Tolteca en 1989. Alimentada por el fuerte crecimiento que experimentó en México, la empresa incursionó en el mercado internacional mediante la adquisición en 1992 de Valenciana y Sanson, las dos plantas cementeras más grandes de España. Hoy en día, además de contar con las 15 plantas cementeras que posee en México, Cemex también cuenta con 323 plantas de concreto premezclado, 13 canteras de agregados, 80 terminales terrestres y 7 marítimas.

LafargeHolcim (ex Holcim México) (ex Grupo Apasco)

Grupo Apasco comenzó a operar en 1928 cuando un grupo de inversionistas mexicanos fundó la Compañía de Cemento Portland Apasco. En 1964 Holcim adquirió el 69% del grupo Apasco y Apasco, a su vez adquirió a Cementos Veracruz en 1970. Holcim adquirió las acciones restantes y ahora posee el 100% de lo que hoy se denomina Holcim México. Desde el 15 de julio de 2015, la empresa Holcim se fusionó a nivel internacional con la empresa Lafarge, con lo que nace la empresa LafargeHolcim.

Cooperativa Cruz Azul

La Cooperativa Cruz Azul, cuyo origen se remonta al año 1909, es una de las empresas cementeras más antiguas en México. A pesar de haber experimentado numerosos cambios, la empresa continúa empleando a más de 4000 personas. No solo es Cruz Azul la cooperativa más grande de México, sino que es también una de las más grandes de América Latina.

GCC Grupo Cemento Chihuahua

GCC fue fundada en 1941, y hoy en día cuenta con tres plantas en el norte del país. En 2001 la empresa incursionó en el mercado de EUA y actualmente es dueña de plantas cementeras en Tijeras (Nuevo México), Rapid City (Dakota del Sur) y Pueblo (Colorado).

Cementos Fortaleza

Cementos Fortaleza surge a raíz de la adquisición por parte del Grupo Elementia del 53% de las acciones de las instalaciones de producción de Lafarge (Vito y Tula). A estas dos plantas se le suma la planta El Palmar, que entró en operación recientemente y que está ubicada próxima a las otras dos plantas. Elementia es un grupo industrial del cual Carlos Slim es un accionista importante.

Cementos Moctezuma

En 1943 un grupo de inversionistas mexicanos se unió para construir la primera planta en Jiutepec, Morelos. Además de contar hoy en día con 4 plantas cementeras, posee 57 de concreto premezclado además de centros de distribución en 29 regiones de México. Sus principales accionistas son la empresa italiana Buzzi (33.5%) y el grupo español, Cementos Molins (33.5%).

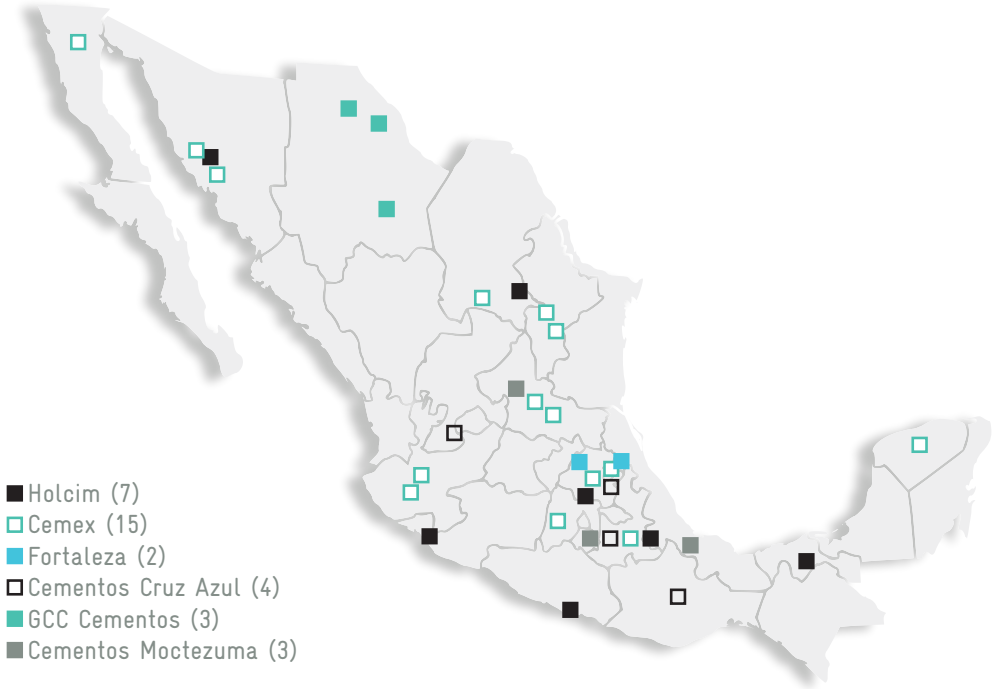
La **TABLA 3** y el **GRÁFICO 2** resumen las plantas de producción de cementos en México.

TABLA 3 Plantas de producción de cemento en México

Cementera	Plantas productivas	Distribución geográfica
Cemex	15	Hidalgo, Estado de México, Ciudad de México, Hermosillo, Sonora, Baja California, Jalisco, Yucatán, Nuevo León, San Luis Potosí, Puebla y Coahuila
Holcim	7	Guerrero, Estado de México, Ciudad de México, Tabasco, Veracruz, Coahuila, Colima y Sonora
Cruz Azul	4	Estado de México, Ciudad de México, Oaxaca, Puebla y Aguascalientes
Chihuahua	3	Chihuahua y Guanajuato
Moctezuma	3	San Luis Potosí, Morelos y Veracruz
Fortaleza	2	Hidalgo

FUENTE: Elaboración propia.

GRÁFICO 2 **Distribución geográfica de plantas cementeras en México**



FUENTE: CANACEM.

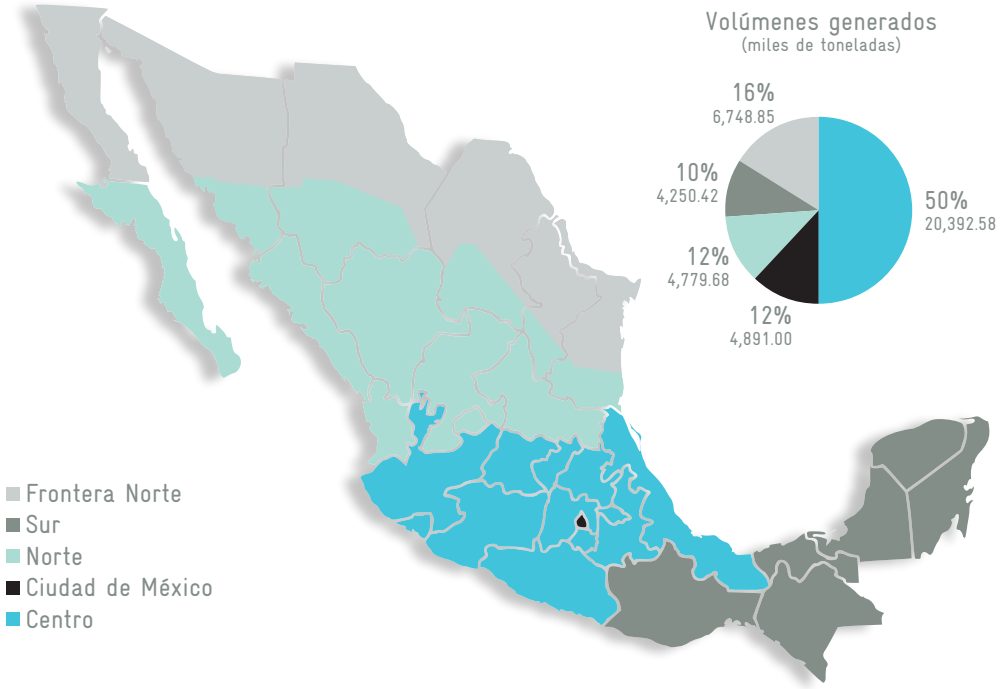
3.1. Aspectos generales

Según estadísticas del 2012 de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT, en México se generan 115,068 toneladas diarias de residuos sólidos urbanos (RSU), equivalentes a 42 millones de toneladas anuales. La generación per cápita promedio es de 1.3 kilos diarios de RSU.

El manejo de los RSU en México es todavía considerado como básico para algunas zonas geográficas del país. De las 32 entidades federativas, sólo en 13 se realizan actividades de recolección selectiva de RSU, mientras que de la cantidad de RSU que es enviada a disposición final (78%), el 60% es depositado en 238 rellenos sanitarios y 50 sitios controlados, el 16% en tiraderos a cielo abierto y el 2% restante se desconoce dónde se deposita, según datos del 2015 de SEMARNAT. El **GRÁFICO 3** muestra un ejemplo de la generación de los residuos sólidos urbano por región en México.

El reciclaje en México muestra cifras muy incipientes, que alcanzan el 10% de la generación total de RSU y son el resultado de transacciones tradicionales de residuos con valor comercial evidente (vidrio, papel, cartón o metal).

GRÁFICO 3 Generación de residuos sólidos urbanos por región, 2011



FUENTE: SEDESOL, Dirección General de Equipamiento e Infraestructura en Zonas Urbano-Marginadas, 2012, México.

3.2. Marco regulatorio

La Secretaría de Energía (SENER), en su documento para discusión "Aprovechamiento de los residuos sólidos en México", identifica una serie de aspectos regulatorios a ser considerados en la evaluación de oportunidades de aprovechamiento energético de residuos urbanos.

Si bien el coprocesamiento de residuos sólidos urbanos en hornos cementeros no está identificado en dicho documento como tecnología de aprovechamiento energético, se considera que los marcos regulatorios identificados son aplicables.

El artículo 115 constitucional confiere a los municipios la responsabilidad de administrar y otorgar a la población la dotación y operación de servicios públicos. Por lo anterior, la limpieza de las ciudades, así como el manejo de los residuos sólidos constituyen grandes preocupaciones para las autoridades responsables de la prestación de estos servicios en todos los centros urbanos, sin importar el tamaño de su población y la extensión de su territorio.

El desarrollo de proyectos de aprovechamiento energético de los residuos, como por ejemplo a partir de biogás, o el aprovechamiento directo con base en su poder calorífico, obedece a ordenamientos y disposiciones jurídicas en materia ambiental, social, territorial y las requeridas para la generación de energía. Dado este contexto, se identifican ciertos marcos regulatorios aplicables para el aprovechamiento energético de los residuos sólidos urbanos:

- **La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) y su Reglamento:** ley reglamentaria de las disposiciones constitucionales en lo relativo a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como a la protección del ambiente en el territorio nacional y en las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción; sus disposiciones son de orden público e interés social y tienen por objeto propiciar el desarrollo sustentable. Asimismo, dictamina que la Federación, los estados, Distrito Federal y los municipios deben preservar y restaurar el equilibrio ecológico y proteger el ambiente. Siendo facultades de la Federación (artículo 5°), la formulación y conducción de la política ambiental nacional, así como la regulación y el control de las actividades que son consideradas como altamente riesgosas.

- **La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos y su Reglamento:** ley reglamentaria de las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que se refieren a la protección al ambiente en materia de prevención y gestión integral de residuos en el territorio nacional. Sus disposiciones son de orden público e interés social y tienen por objeto garantizar el derecho de toda persona al medio ambiente adecuado y propiciar el desarrollo sustentable a través de la prevención de la generación, la valorización y la gestión integral de los residuos peligrosos, de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, así como prevenir la contaminación de sitios con estos residuos y llevar a cabo su remediación.

- **La Ley General de Cambio Climático:** tiene como objetivo garantizar el derecho a un medio ambiente sano y establecer la concurrencia de facultades en la elaboración y aplicación de políticas públicas para la adaptación al cambio climático y la mitigación de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero, entre otros.

- **La Ley General de Salud:** identifica las disposiciones relacionadas al servicio público de limpia en donde se promueve y apoya el saneamiento básico y se establecen normas y medidas tendientes a la protección de la salud humana para aumentar su calidad de vida. Entendida en un sentido amplio, la salud no es solo la ausencia de enfermedad sino un estado de completo bienestar físico y mental, en un contexto ecológico y social propicio para su sustento y desarrollo. La salud es un elemento que tiene como principio la justicia y la igualdad sociales y es un derecho esencial de todos.

- **La Ley de Aguas Nacionales:** ley reglamentaria del artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en materia de aguas nacionales, de observancia general en todo el territorio nacional, cuyas disposiciones son de orden público e interés social y tiene por objeto regular la explotación, uso o aprovechamiento de dichas aguas, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr su desarrollo integral sustentable.

Se deben contemplar también, en cada caso, las Leyes de Ordenamiento Territorial de Asentamientos Humanos de los Estados y las Leyes Estatales de Protección al Ambiente.

En cuanto a los instrumentos normativos para el sector energético, se identifica una serie de cuerpos legales enfocados principalmente en la generación de energía eléctrica, destacando la Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables, la Ley para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía, Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica y Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos.

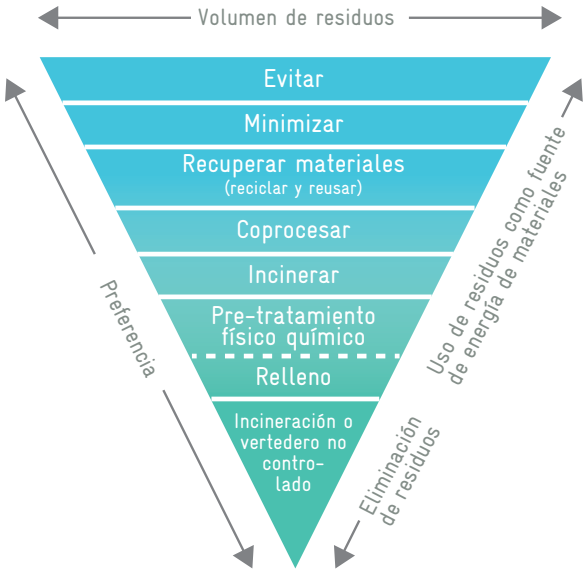
4.1. Generalidades

El coprocesamiento, definido por el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), a través del Convenio 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,"[3] 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 retos ambientales que los gobiernos enfrentan en la actualidad. Una cultura basada en la disposición final de residuos en tiraderos a cielo abierto 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, cuyo éxito requiere de la existencia de una oferta de gestión de residuos que permita avanzar hacia soluciones sostenibles de valorización, aprovechamiento, reciclaje y reutilización.

El coprocesamiento debe cumplir ciertos principios para una actividad sostenible, basados en el cumplimiento de la jerarquía en la gestión de residuos, el comportamiento ambiental, calidad del producto (cemento y concreto), y el respeto por las circunstancias locales (**GRÁFICO 4** y **TABLA 4**).

GRÁFICO 4 **Jerarquía gestión de residuos**



FUENTE: Guía para el Co-Procesamiento de Residuos en la Producción de Cemento Cooperación Público-Privada GTZ-Holcim, 2006.

[3] Convenio de Basilea - Directrices técnicas sobre el coprocesamiento ambientalmente racional de los desechos peligrosos en hornos de cemento – Noviembre 2011.

TABLA 4 **Principios para el coprocesamiento**

PRINCIPIO I	EL COPROCESAMIENTO RESPETA LA JERARQUÍA DE RESIDUOS: • El coprocesamiento no entorpece los esfuerzos por minimizar los residuos y no se usarán residuos en los hornos rotatorios de cemento si se dispone de mejores maneras de recuperación ambiental y económicamente. • El coprocesamiento debe considerarse como una parte integral de la gestión de residuos moderna, ya que la gestión de residuos proporciona una opción de recuperación de recursos saludable para el ambiente. • El coprocesamiento cumple con los convenios ambientales internacionales; por ejemplo, el Convenio de Basilea y Estocolmo.
PRINCIPIO II	DEBEN EVITARSE LAS EMISIONES ADICIONALES Y EL IMPACTO NEGATIVO EN LA SALUD DEL SER HUMANO: • Prevenir o mantener a un mínimo absoluto los efectos negativos de la contaminación en el ambiente, así como los riesgos para la salud del ser humano. • Con base en las estadísticas, las emisiones atmosféricas no deben ser mayores que las de la producción de cemento con combustible tradicional.
PRINCIPIO III	LA CALIDAD DEL PRODUCTO DE CEMENTO PERMANECE SIN MODIFICACIÓN: • El producto (clinker, cemento, concreto) no debe ser adulterado como si fuera un sitio de disposición final para metales pesados. • El producto no debe tener ningún impacto negativo en el ambiente, como se demuestra con pruebas de lixiviación. • La calidad del cemento permitirá la recuperación de final de ciclo.
PRINCIPIO IV	LAS COMPAÑÍAS COMPROMETIDAS CON EL COPROCESAMIENTO DEBEN ESTAR CAPACITADAS: • Tener buenos registros de cumplimiento ambientales y de seguridad y proporcionar información relevante para el público y las autoridades adecuadas. • Tener personal, procesos y sistemas en el lugar que demuestren el compromiso con la protección ambiental, la salud y la seguridad. • Asegurarse de que todos los requisitos cumplen con las leyes, reglas y reglamentos aplicables. • Ser capaces de controlar los insumos y parámetros de procesos que se requieren para el coprocesamiento eficaz de residuos. • Asegurar buenas relaciones con el público y otros participantes en proyectos de gestión de residuos locales, nacionales e internacionales.
PRINCIPIO V	LA IMPLEMENTACIÓN DEL COPROCESAMIENTO TIENE QUE CONSIDERAR CIRCUNSTANCIAS NACIONALES: • Los requisitos y necesidades específicos del país deben reflejarse en los reglamentos y procedimientos. • Una implementación gradual tiene en cuenta la formación de la capacidad requerida y el establecimiento de acuerdos institucionales. • La introducción del coprocesamiento va junto con otros procesos de cambio en el sector de gestión de residuos de un país.

FUENTE: Guía para el Co-Procesamiento de Residuos en la Producción de Cemento Cooperación Público-Privada GTZ-Holcim, 2006.

El coprocesamiento 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.

4.2. Fundamentos para una actividad de coprocesamiento sostenible

Existen tres grandes ámbitos de acción a nivel país y para las empresas involucradas en el coprocesamiento, que determinan su factibilidad, potencialidad y sostenibilidad. Estos ámbitos se describen a continuación.

4.2.1. 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 coprocesamiento, 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, etcétera. 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 sólidos urbanos.

Los tipos de materiales de desecho disponible, y su calidad asociada, determinarán el potencial teórico de coprocesamiento. Mientras más nobles los materiales en términos de poder calorífico, con un menor contenido de elementos perjudiciales para el proceso productivo de los hornos cementeros, y comportamiento ambiental de los mismos, mejores serán las perspectivas del potencial de coprocesamiento en una planta determinada.

En lo que se refiere a las cadenas de suministro, tanto para el caso de los residuos urbanos como para los industriales (que en México corresponden a la categoría de manejo especial), 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 gestión y disposición de residuos, disponibilidad de transporte especializado, alternativas de clasificación y pretratamiento de los residuos, transporte adecuado hacia las plantas de cemento, etcétera).

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

4.2.2. Capacidad técnica en plantas de cemento y aspectos económicos

Para realizar un adecuado coprocesamiento, 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 gestión óptima de residuos. En este sentido, aquellos hornos cementeros que cuenten con tecnologías modernas como proceso seco, la precalcinación y 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 combustibles y materias primas alternativas al proceso. El tipo y calidad de los combustibles tradicionales utilizados (coque de petróleo, carbón, gas natural) también es relevante para la estimación de los potenciales de coprocesamiento en un horno determinado.

En cuanto a los combustibles tradicionales en particular, es de suma importancia su costo para las plantas cementeras. El costo de la energía tradicional será el elemento limitante para el coprocesamiento, ya que cualquier actividad de utilización de combustibles alternos competirá en costo con la energía tradicional. Solamente en el caso de tener ahorros (costos inferiores) en comparación con el combustible tradicional (combustible alterno más barato que el tradicional, incluyendo costos financieros por inversión en infraestructura) el coprocesamiento será sostenible.

El costo de la energía tradicional está determinado principalmente por el precio del combustible fósil tradicional (coque de petróleo o carbón) disponible para cada una de las plantas existentes en el país.

A mediados del 2015 el costo del combustible fósil tradicional utilizado en México (coque de petróleo) puesto en planta se ubicaba en el rango:

90-110 USD/t

Este rango corresponde a un nivel históricamente bajo de precios, y puede explicarse por la tendencia a la baja de los hidrocarburos y por las diferentes opciones de abastecimiento, donde aquellas empresas con poder de negociación internacional pueden acceder a menores precios (compras centralizadas corporativas). También depende, en menor medida, de aspectos logísticos en el territorio nacional, determinados por la ubicación de cada una de las plantas cementeras.

Si bien corresponde a un costo bajo considerando las fluctuaciones históricas, las condiciones actuales del combustible tradicional son todavía atractivas para ciertas opciones de coprocesamiento. Una disminución sistemática en el precio de los combustibles fósiles necesariamente irá haciendo cada vez menos atractivo el coprocesamiento. 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 alternos asociados.

Es importante destacar también que las características de los combustibles alternos, y de cada proceso productivo en particular, implicarán la necesidad de evaluaciones técnicas de los eventuales costos ocultos que el coprocesamiento pueda implicar al proceso, como pérdidas de producción y mayor consumo térmico en el proceso de producción de clínker principalmente.

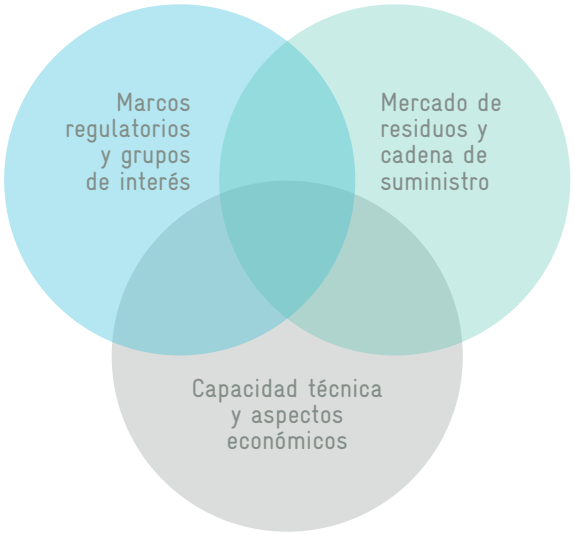
4.2.3. Marcos regulatorios y partes interesadas

La sola disponibilidad de residuos en el país y la existencia de plantas cementeras dispuestas a desarrollar el coprocesamiento, no son suficientes para una actividad sostenible. La existencia de marcos regulatorios adecuados basados en la experiencia internacional en estas materias, y de partes interesadas (autoridades, comunidades, etcétera) correctamente capacitados y/o informados según sea el caso, es un elemento vital en el camino del coprocesamiento (**GRÁFICO 5**).

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

En lo que se refiere a marcos regulatorios, el Convenio de Basilea en 2011 sentó las bases para la generación de una estructura legal adecuada para el coprocesamiento. Las Guías Técnicas de Basilea son una herramienta fundamental para la estructuración de un marco regulatorio que permita garantizar un desarrollo armónico del coprocesamiento con los estándares ambientales y de seguridad de los países en desarrollo. Este marco regulatorio específico para el coprocesamiento debe, sin embargo, complementarse con la estructura legal general de gestión de residuos del país, que garantice que el concepto de “el que contamina paga” se aplique en México, 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.

GRÁFICO 5 **Ámbitos de acción para sostenibilidad del coprocesamiento**



FUENTE: elaboración propia.

5.1. Generalidades

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 en las condiciones actuales está marcado por tarifas de ingreso a rellenos sanitarios extremadamente bajas o incluso inexistentes, que dificultan la factibilidad económica de cualquier desarrollo en torno a la gestión de estos residuos.

Esta lógica económica de la gestión de residuos sólidos urbanos también se traduce en un escaso avance con respecto a la clasificación de residuos en origen y recolección segregada de los mismos. Los residuos que llegan a los rellenos sanitarios o tiraderos a cielo abierto corresponden en general a una mezcla de fracciones orgánicas e inorgánicas de los materiales que los componen.

Las variables fundamentales para determinar la factibilidad económica del coprocesamiento de cualquier tipo de residuo, y en particular de residuos urbanos clasificados, son las siguientes:

a) **Costo de combustibles tradicionales:** El costo (actual y proyectado) de los combustibles fósiles tradicionales, como el coque de petróleo, carbón o gas, será el punto de partida para cualquier análisis de factibilidad para el coprocesamiento en el caso de sustitución de combustibles. Corresponde al costo por unidad de energía térmica que será sustituido y por lo tanto ahorrado en la medida que se utilicen combustibles alternos. La comparación en este caso se realiza considerando el costo "en la punta del quemador", incluyendo todos los costos de compra, transporte, almacenamiento, preparación y alimentación al horno.
b) **Costo logístico en el manejo de residuos:** Los materiales que serán acondicionados para su coprocesamiento deberán ser transportados desde su punto de generación hasta las instalaciones de pretratamiento. Estos costos serán directamente proporcionales a las distancias de transporte.
c) **Costo/ingresos manejo de residuos:** Corresponde al pago por el hecho de recibir los residuos. Este pago corresponderá a un costo en el caso de compra de los residuos, o a un ingreso positivo en caso de ser remunerado por el servicio de manejo de residuos que la actividad de coprocesamiento presta al generador o responsable de los residuos. Es normal encontrar que este valor corresponde a un costo cuando se trata de materiales altamente energéticos y homogéneos (no requieren preprocesamiento en general) en su calidad, como aceites usados, solventes o algunos tipos de biomasa. Para el caso de residuos peligrosos que requieren preproceso, llantas que requieren ser trituradas, o residuos urbanos que requieren ser seleccionados y preacondicionados, las experiencias exitosas indican que es necesario un ingreso por concepto de servicio de manejode residuos.
d) **Costos de preprocesamiento:** Para un coprocesamiento eficiente en los hornos cementeros se requiere que los combustibles alternos cumplan con condiciones de calidad, incluyendo homogeneidad. Para esto es necesario, en general, someter a los residuos a procesos de selección, triturado y mezcla, conocidos en su conjunto como actividades de preprocesamiento. La inversión en instalaciones y equipos, y los costos operacionales dependerán de los tipos y volúmenes de materiales a preprocesar.
e) **Costos de logística para el combustible alterno:** Una vez preprocesado, el combustible alterno debe transportarse a las plantas cementeras para su coprocesamiento, lo que implica un costo logístico que será directamente proporcional a las distancias de transporte involucradas.
f) **Costo de recepción y alimentación a hornos:** Corresponde al costo de operación de las instalaciones y equipos que permiten recibir, almacenar, transportar (cintas transportadoras, elevadores, etcétera) y alimentar los combustibles alternos al horno cementero.

g) **Aspectos técnicos y de calidad:** El coprocesamiento de residuos sólidos urbanos impone una serie de desafíos técnicos y de calidad para la operación de los hornos cementeros que realizan coprocesamiento:
   - **Poder calorífico:** La eficiencia en las labores de selección y separación será fundamental para proveer un combustible alterno con un poder calorífico suficiente para entregar energía al proceso de producción de clínker en niveles adecuados.
   - **Humedad:** Un parámetro importante de calidad del combustible alterno será su humedad (contenido de agua), la que naturalmente viene asociada al origen de los residuos urbanos. Excesos de humedad por sobre el 20% podrán provocar dificultades operacionales, principalmente en lo relacionado con el consumo térmico del horno cementero, y a su eficiencia productiva (potenciales pérdidas de producción).
   - **Granulometría:** El tamaño de partícula del combustible alterno condicionará la eficiencia en su utilización como combustible, y determinará también el punto de alimentación a los hornos.
   - **Contenido de ceniza:** El contenido de cenizas de los combustibles es un elemento a tomar en cuenta cuando se proyectan altas tasas de sustitución. Las cenizas, dependiendo de su composición, pueden presentar impactos posteriores en la calidad del clínker, por lo que su control y adecuada caracterización son fundamentales.
   - **Contenido de cloro:** Un parámetro fundamental de calidad es el contenido de cloro en los combustibles alternos. El cloro corresponde a un elemento que generalmente provoca problemas operacionales como la obstrucción de ductos o ciclones como consecuencia de la precipitación de sales. Hornos que cuenten con Bypass de cloro[4] presentarán más flexibilidad en este aspecto. Los residuos sólidos urbanos se caracterizan por presentar, en general, un nivel promedio de contenido de cloro que está en el límite de la aceptabilidad para altas tasas de sustitución (0.7-0.9%), por lo que una adecuada separación de materiales ricos en cloro durante la etapa de pretratamiento es clave para una posterior sostenibilidad en el consumo del combustible alterno.

En el caso de México, los esfuerzos de clasificación, separación y valorización se materializan tanto en la etapa de recolección (recicladores en camiones) como en los mismos sitios de disposición final, basados en la actividad de "pepenadores" que desarrollan su actividad en condiciones precarias de salud, seguridad y formalización laboral, en un ambiente eminentemente informal.

Esta realidad en el manejo de residuos sólidos urbanos en México se traduce en que, en general, la industria cementera no ha desarrollado una gran capacidad para el coprocesamiento de estos materiales. Las inversiones para recepción, almacenamiento y puntos de alimentación a los hornos, difícilmente cumplirán con los requisitos establecidos por las políticas financieras corporativas de las empresas involucradas.

Destaca en este sentido la iniciativa de la empresa Cemex, que con base en experiencias piloto ha impulsado la gestión de coprocesamiento de residuos sólidos urbanos a través de su proyecto FIRSU. Dicho proyecto se basa en la selección de materiales coprocesables desde estaciones de transferencia, su acondicionamiento, transporte y alimentación a los hornos cementeros.

Durante el transcurso de la presente consultoría no fue posible acceder a información técnica ni económica sobre el proyecto FIRSU de Cemex, pero con base en la experiencia se puede estimar que su rentabilidad es prácticamente nula en la actualidad si se considera el nivel de tarifas que normalmente se pagan por la gestión de residuos sólidos en México. Probablemente los costos de operación y logísticos involucrados no son factibles de ser compensados eficientemente con la sustitución energética alcanzada en los hornos considerando los actuales niveles de costo del combustible fósil tradicional (coque de petróleo). Solamente el pago de tarifas elevadas (significativamente mayores a las normales) por parte de la autoridad podría justificar una rentabilidad económica positiva. Estas tarifas elevadas podrían eventualmente justificarse por la crisis actual en la gestión de residuos del Distrito Federal.

[4] Bypass de cloro: Elemento que permite extraer polvos con exceso de cloro del sistema, aliviando así la carga en exceso de este material en el horno cementero. Los polvos extraídos se utilizan generalmente en la etapa de molienda del cemento.

Haciendo los supuestos que se detallan, en la **TABLA 5** se puede observar en forma simplificada el efecto recién descrito :

TABLA 5 **Simulación de utilidad de operación del proyecto FIRSU bajo supuestos conservadores de poder calorífico, costos combustible tradicional, costos por disposición de residuos, costos logísticos y costos operativos**

	RSU tratados	Comentario
Poder calorífico combinación tradicional (GJ/t)	32	Valor típico petcoke
Costo combustible tradicional (USD/t)	-100	Valor promedio actual en México
Costo combustible tradicional (USD/GJ)	-3,13	Valor por unidad de energía
Poder calorífico combinación alternativo (GJ/t)	15	Valor típico RSU tratado
Costo disposición residuo (-compra, +cobro) (USD/t)	20	Se asume que la empresa recibe un pago por el servicio de tratamiento (valor asumido corresponde al obtenido informalmente, el que no se considera sostenible a mayor escala, dadas las condiciones regulatorias actuales en México)
Costo logístico generador - preproceso (USD/t)	0	Se asume que el sitio de pretratamiento es el mismo que el de disposición (relleno)
Costo selección y preprocesameinto (USD/t)	-45	Valor promedio buena práctica en América Latina (referencia Holcim). Incluye costo financiero de la inversión
Costo comb. alternativo (USD/t)	-25	Costo final combustible alternativo
Costo comb. alternativo (USD/GJ)	-1.67	Equivalente por unidad de energía
Costo logístico preproceso - planta cementera (USD/t)	-15	Se asume un costo promedio de transporte, suponiendo distancias no mayores a 100 km
Costo de recepción/alimentación (USD/t)	-5	Costo de operación en Planta Cementera hasta alimentación del combustible alternativo al horno
Costo final combinación alternativo en horno (USD/t)	-45	Costo final del combustible alternativo en el punto de inyección al horno.
Costo final combinación alternativo en horno (USD/GJ)	-3.0	Equivalente por unidad de energía
Beneficio por sustitución térmica (USD/t combinación alternativo)	46,875	Ahorro en consumo de petcoke por concepto de utilización combustible alternativo
Utilidad (+) / Pérdida (-) (Usd/T Comb. Alternativo)	**1.9**	

FUENTE: elaboración propia.

Es interesante observar la sensibilidad de este ejercicio ante cambios en las condiciones de elementos como: costo poder calorífico, pago por servicio de disposición, costos de operación en selección y pretratamiento y costos de transporte. Ante cambios menores en estos parámetros, el resultado final puede variar en forma relevante.

Por ejemplo, bajo los mismos supuestos de pago por el servicio de tratamiento de residuos y de costos operacionales y logísticos, pero ante un cambio en el costo del combustible tradicional de 100 a 120 USD por tonelada, el resultado del mismo ejercicio resulta ser positivo (**TABLA 6**):

TABLA 6 **Simulación de utilidad de operación del proyecto FIRSU bajo supuestos de incremento en el costo del combustible tradicional, manteniendo valores de poder calorífico, costos por disposición de residuos, costos logísticos y costos operativos**

	RSU tratados	Comentario
Poder calorífico combinación tradicional (GJ/t)	32	Valor típico petcoke
Costo combustible tradicional (USD/t)	-120	Valor promedio actual en México
Costo combustible tradicional (USD/GJ)	-3,75	Valor por unidad de energía
Poder calorífico combinación alternativo (GJ/t)	15	Valor típico RSU tratado
Costo disposición residuo (-compra, +cobro) (USD/t)	20	Se asume que la empresa recibe un pago por el servicio de tratamiento (valor asumido corresponde al obtenido informalmente, el que no se considera sostenible a mayor escala, dadas las condiciones regulatorias actuales en México)
Costo logístico generador - preproceso (USD/t)	0	Se asume que el sitio de pretratamiento es el mismo que el de disposición (relleno)
Costo selección y preprocesameinto (USD/t)	-45	Valor promedio buena práctica en América Latina (referencia Holcim). Incluye costo financiero de la inversión
Costo comb. alternativo (USD/t)	-25	Costo final combustible alternativo
Costo comb. alternativo (USD/GJ)	-1.67	Equivalente por unidad de energía
Costo logístico preproceso - planta cementera (USD/t)	-15	Se asume un costo promedio de transporte, suponiendo distancias no mayores a 100 km
Costo de recepción/alimentación (USD/t)	-5	Costo de operación en Planta Cementera hasta alimentación del combustible alternativo al horno
Costo final combinación alternativo en horno (USD/t)	-45	Costo final del combustible alternativo en el punto de inyección al horno.
Costo final combinación alternativo en horno (USD/GJ)	-3.0	Equivalente por unidad de energía
Beneficio por sustitución térmica (USD/t combinación alternativo)	56.25	Ahorro en consumo de petcoke por concepto de utilización combustible alternativo
Utilidad (+) / pérdida (-) (USD/t Comb. alternativo)	**11.3**	

FUENTE: elaboración propia.

Asimismo, si se mantienen los costos constantes, pero se modifica el pago por el servicio de tratamiento de residuos (costo que puede ser asumido en base a mecanismos como la responsabilidad extendida del productor por ejemplo), es posible observar que aumentos en este pago implicarán beneficios cada vez más atractivos para el proyecto, mientras que pagos menores o nulos (que corresponde al caso actual en la mayor parte de los países latinoamericanos), harán que la actividad no presente factibilidad económica (**TABLA 7**).

TABLA 7 **Simulación de utilidad de operación del proyecto FIRSU bajo supuestos de incremento en el costo (tarifas) por disposición de residuos, manteniendo valores de poder calorífico, costo de combustible tradicional, costos logísticos y costos operativos**

	RSU tratados	Comentario
Poder calorífico combinación tradicional (GJ/t)	32	Valor típico petcoke
Costo combustible tradicional (USD/t)	-100	Valor promedio actual en México
Costo combustible tradicional (USD/GJ)	-3,13	Valor por unidad de energía
Poder calorífico combinación alternativo (GJ/t)	15	Valor típico RSU tratado
Costo disposición residuo (-compra, +cobro) (USD/t)	100	Se asume que la empresa recibe un pago por el servicio de tratamiento (valor asumido corresponde al obtenido informalmente, el que no se considera sostenible a mayor escala, dadas las condiciones regulatorias actuales en México)
Costo logístico generador - preproceso (USD/t)	0	Se asume que el sitio de pretratamiento es el mismo que el de disposición (relleno)
Costo selección y preprocesameinto (USD/t)	-45	Valor promedio buena práctica en América Latina (referencia Holcim). Incluye costo financiero de la inversión
Costo comb. alternativo (USD/t)	55	Costo final combustible alternativo
Costo comb. alternativo (USD/GJ)	3.67	Equivalente por unidad de energía
Costo logístico preproceso - planta cementera (USD/t)	-15	Se asume un costo promedio de transporte, suponiendo distancias no mayores a 100 km
Costo de recepción/alimentación (USD/t)	-5	Costo de operación en Planta Cementera hasta alimentación del combustible alternativo al horno
Costo final combinación alternativo en horno (USD/t)	35	Costo final del combustible alternativo en el punto de inyección al horno.
Costo final combinación alternativo en horno (USD/GJ)	2.3	Equivalente por unidad de energía
Beneficio por sustitución térmica (USD/t combinación alternativo)	46,875	Ahorro en consumo de petcoke por concepto de utilización combustible alternativo
Utilidad (+) / pérdida (-) (USD/t Comb. alternativo)	**81.9**	

FUENTE: elaboración propia.

Tan solo para efectos ilustrativos, esta simulación puede ser sometida a las condiciones existentes en países europeos, donde el ítem "Costo Disposición del Residuo" alcanza niveles cercanos a los 100 USD por tonelada, resultando evidentemente que la gestión de coprocesamiento en este caso se vuelve altamente atractiva. Lo que sucede en la práctica en Europa es que esos 100 USD por tonelada iniciales en la cadena, financian además la utilidad de intermediarios.

Por último, la optimización de costos operativos y logísticos también será relevante, sobre todo en aquellos casos en que se logren economías de escala gracias al procesamiento de grandes volúmenes.

Sin perjuicio del análisis anterior, el proyecto FIRSU, que desde 2012 se ha materializado en Mérida, Ensenada, Zapotiltic, Guadalajara, Monterrey, Atotonilco, Huichapan y Tepeaca, corresponde probablemente a la principal iniciativa en torno a la sostenibilidad de la industria cementera mexicana, en la cual Cemex ha tomado un claro liderazgo. La dimensión estratégica del proyecto FIRSU (en el sentido de preparar a las plantas cementeras para escenarios futuros de escasez de combustibles fósiles por alto costo u oferta limitada), y el impacto en aspectos ambientales como la huella de carbono y la correcta gestión de residuos, convierten a esta iniciativa en un claro foco de interés para la gestión de sostenibilidad de la industria cementera mexicana. Es importante destacar que este proyecto es, en la actualidad, el único de su clase en América Latina y ciertamente sus conclusiones, en la medida que estén disponibles para la industria y autoridades, serán de gran utilidad para el desarrollo de este tipo de proyectos en la región.

Los principales desafíos para una gestión de coprocesamiento sostenible para residuos sólidos urbanos clasificados en México pueden resumirse de la siguiente forma:

- Inyección de recursos económicos en la cadena de valor de los residuos.
- Capacidad de segregación en origen, permitiendo optimizar las actividades de pretratamiento de los residuos.
- Costo o precio por disposición final en rellenos sanitarios (para residuos valorizables por ejemplo).
- Disponibilidad de tecnologías de clasificación y pretratamiento (inversiones y costos operativos).
- Optimización logística.
- Capacidad de recepción, almacenamiento y alimentación a los hornos.
- Capacidad técnica de los hornos cementeros.

5.2. Potencial de la valorización energética de RSU por coprocesamiento en la industria cementera mexicana

5.2.1. NAMA Sector Cemento

Entre los años 2011 y 2012, la industria cementera mexicana, por medio de la CANACEM, ha diseñado una NAMA para el sector cemento, que se basa principalmente en el aprovechamiento energético de residuos sólidos urbanos y en la gestión del contenido de clínker en el cemento (factor clínker).

El convenio respectivo entre la SEMARNAT y la CANACEM fue suscrito y formalizado en el mes de julio de 2012.

La CANACEM no ha estado disponible para compartir antecedentes relativos a esta iniciativa en el contexto del presente estudio, por lo que la información recabada corresponde solamente a aquellos antecedentes facilitados por la SEMARNAT.

La NAMA se denomina "Sustitución de combustibles primarios por combustible alterno de RSU", y tiene como objetivo la reducción de emisiones GEI y metano, mediante la sustitución de combustibles derivados del petróleo en los hornos cementeros, por combustibles alternos, de menor factor de emisión y evitando su metanización durante disposición en rellenos sanitarios.[5]

[5] CANACEM, al argumentar la disminución de emisiones de metano en rellenos sanitarios, está asumiendo (aunque no explícitamente) que la fracción inorgánica de los residuos sólidos también está compuesta por alguna proporción de material orgánico.

En cuanto a la utilización de la fracción inorgánica de los residuos sólidos urbanos (FIRSU), esta iniciativa se basa en la reducción de emisiones debido a dos factores principales:

- Uso de combustibles alternos con menor factor de emisión que los derivados del petróleo, disminuyendo emisiones brutas y netas de CO_2.
- Reducción de generación de gas metano por fermentación biológica, al evitar disponer de materiales fermentables en la FIRSU, tales como pedacería de maderas, textiles naturales, papel y cartón, entre otros. Esta reducción se considera teórica, ya que supone que no existen sistemas de captación y aprovechamiento de dicho gas metano.

Las actividades propuestas por la NAMA para alcanzar los objetivos se pueden agrupar de la siguiente forma:

- Selección y separación de residuos sólidos urbanos en rellenos sanitarios y centros de transferencia en el nivel nacional.
- Pretratamiento y alimentación en plantas cementeras en el nivel nacional.
- Potencial ubicación en municipios aledaños a las 33 plantas de cemento consideradas para este proyecto, dentro del territorio nacional.

Los cobeneficios que se plantean como parte de esta NAMA se basan en la eliminación de parte de los residuos enviados a disposición, con beneficios en:

- El fomento a la existencia de más áreas naturales y de esparcimiento social
- La reducción de generación de vectores de infección y enfermedad
- La reducción de gasto social y privado en salud
- La mitigación de contaminación de agua (por lixiviados, entre otros), suelo y aire, causada por la disposición incontrolada de residuos
- La conservación de recursos naturales no renovables, derivados del petróleo

Esta NAMA, tal como ha sido planteada, contempla tanto la disminución de emisiones directas en los hornos cementeros como la disminución de emisiones de metano en rellenos sanitarios.

Según establece la CANACEM en su justificación de la NAMA, existe el problema de la alta generación de residuos sólidos urbanos (RSU) de cerca de 1 kg/día/habitante, como se ha hecho constar en documentos de la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), entre otros. Se tiene además la complejidad del manejo de la FIRSU (una vez que se extraen las fracciones reciclables: aluminio, vidrio, PET, metales y cartón), así como lo fermentable (restos de alimentos, parques y jardines), queda la fracción inorgánica del RSU (FIRSU), la cual no tiene una forma de reciclaje y en la actualidad se destina a confinamiento, con excepción de pequeños volúmenes que se coprocesan en hornos cementeros). Lo anterior muestra que la FIRSU es una alternativa atractiva por los beneficios ambientales y el aprovechamiento inteligente de recursos no renovables (combustibles primarios), así como por su disponibilidad en cantidad y cercanía a las plantas cementeras que pueden coprocesarla.

Los planes de aprovisionamiento consideran las fuentes de generación en centros urbanos cercanos a las plantas cementeras, plantas de separación para utilizar únicamente los materiales adecuados desde el punto de vista técnico y de calidad del cemento, sistemas de triturado y dosificado, así como instalaciones de almacenamiento.

También establece la CANACEM que se cuenta con acuerdos formales con varios municipios y centros de separación de residuos. Se recalca que no hay otra tecnología o industria que compita por la FIRSU en la actualidad, por lo que su aprovisionamiento es seguro.

5.2.2. Proyecciones NAMA Cemento

La iniciativa NAMA antes mencionada se basa en el compromiso de la Industria para incrementar el uso de residuos históricamente utilizados como combustible alterno (residuos sólidos en general, residuos líquidos industriales, llantas) en un 8% para el año 2020, el cual estará compuesto por un incremento del 3% en el uso de llantas, y de 5% en el usos de residuos sólidos urbanos; mientras que para 2030, la industria buscará aumentar el uso de estos materiales en un 21%, el cual estará compuesto por un 6% de llantas y un 15% de residuos sólidos urbanos.

Esta NAMA también propone alcanzar una relación de clínker/cemento (factor clínker) de 72% para el año 2020, y de 68% para el año 2030.

De acuerdo con las proyecciones y compromisos adquiridos a través del proyecto NAMA, y considerando la integración de acciones de mitigación para el uso de combustibles alternos y para la optimización de factor clínker, la SEMARNAT y la CANACEM estimaron que será posible lograr una disminución de emisiones de gases de efecto invernadero del orden del 9% con respecto del valor proyectado para la línea de base para el año 2020, y una reducción del 15% respecto al valor proyectado para la línea de base para el año 2030.

En cuanto a potenciales máximos alcanzables en el coprocesamiento de la fracción inorgánica de residuos sólidos urbanos (FIRSU), la industria, a través de la CANACEM, estableció y compartió con la SEMARNAT los siguientes supuestos y proyecciones para la proyección de las metas y cálculos de los beneficios potenciales respectivos:

Plantas participantes:	33
Producción total de Clínker:	35,806,500 t/año
Consumo térmico promedio:	830 kcal/kg clínker
Sustitución térmica alcanzable:	30%
Inversión total necesaria:	135 Millones USD plantas separación
	269 Millones USD Trituración y Alimentación
	404 Millones USD (TOTAL)
Disminución de emisiones CO_2:	3,206,017 t CO_2e/año

Del total del potencial de disminución de emisiones de CO2e, 45% corresponde a disminución de emisiones brutas en hornos cementeros, y 55% corresponde a CH4 (metano) evitado en la degradación natural de los mismos materiales en relleno sanitario.

La CANACEM, en el diseño de la NAMA, establece que para su materialización es necesaria la obtención de financiamiento externo, sujeto a las condiciones de rentabilidad de la actividad.

Adicionalmente, se hace necesario reforzar el concepto de factibilidad legal y financiera, las que dependerán de la evolución de los marcos regulatorios, y de cómo estos favorecerán la inyección de recursos a la cadena de valor de los residuos.

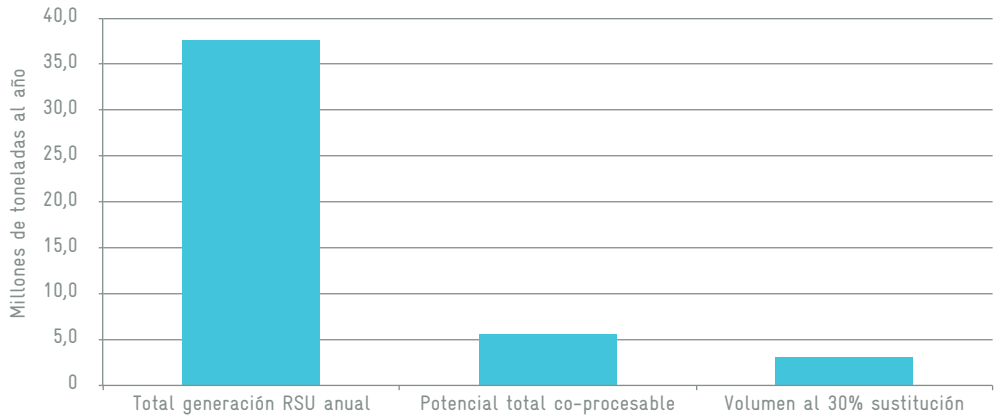
5.3. Potencial teórico en México

Según lo establecido en la **TABLA 2**, la capacidad instalada en México corresponde a 58,800,000 toneladas de cemento por año, correspondientes a una capacidad de poco más de 44,000,000 toneladas de clínker por año (asumiendo un factor clínker[6] promedio de 75%), que demandan un consumo térmico promedio de 830 kcal/kg clínker (según se establece en la NAMA CANACEM).

Al considerar una tasa de sustitución alcanzable de un 30% mediante la utilización de combustibles alternos elaborados sobre la base de residuos sólidos urbanos, y asumiendo un poder calorífico de 3,500 kcal/kg (que corresponde a un valor característico de los RSU tratados), el potencial volumen de residuo urbano seleccionado como combustible alterno alcanza a 3,130,000 toneladas por año, equivalentes al 8.3% del total de RSU generados en México según las cifras estimadas por SEMARNAT.

Si se considera que la fracción coprocesable en los residuos sólidos urbanos (luego de actividades de separación para reciclaje), corresponde en promedio al 15% del volumen total, equivalente a 5,634,000 t/año, se puede concluir que la generación de residuos urbanos en México no será en ningún caso una limitante para satisfacer la demanda potencial del coprocesamiento. En el **GRÁFICO 6** puede visualizarse esta conclusión.

GRÁFICO 6 **Relación volumen total RSU v/s potencial coprocesamiento**



FUENTE: elaboración propia.

En la medida que se intensifiquen los programas de separación en origen y de reciclaje, la fracción coprocesable decrecerá en términos de fracción del total de residuos gestionados, pero al mismo tiempo la disponibilidad aumentará (mayor proporción de residuos gestionados) y la calidad de los materiales se verá favorecida. La experiencia europea indica que en promedio un 30% de los materiales destinados a separación y posterior reciclaje se destina finalmente a coprocesamiento u otros tipos de valorización energética (incineración con recuperación de energía por ejemplo)[7], lo que coincide en términos generales con el 15% del total de generación de RSU considerado anteriormente.

La experiencia internacional indica además que es posible alcanzar altas tasas de sustitución (superiores al 40% en Europa) en plantas cementeras mediante la utilización de combustibles alternos elaborados sobre la base de residuos urbanos.

[6] Factor clínker: Relación de contenido de clínker en el cemento, en unidades de %. El Factor Clínker disminuye en la medida que se utilicen adiciones minerales durante la etapa de molienda de cemento, como puzolanas naturales, escorias siderúrgicas, cenizas volantes, etcétera.

[7] Experiencia acumulada Reclay Group – Alemania.

Con el objetivo de poner en contexto las estimaciones asumidas, en la **TABLA 8** se muestran las tasas de sustitución alcanzadas en diferentes países europeos con igual tipo de combustible alterno elaborado sobre la base de la fracción inorgánica de residuos, también conocidos como RDF (*Refuse Derived Fuels*), o SRF (*Solid Recovered Fuel*).

TABLA 8 **Sustitución de coprocesamiento en Europa durante 2012**

País	Porcentaje promedio de sustitución
Austria	63%
Alemania	62%
República Checa	54%
Polonia	40%
Reino Unido	40%
Francia	29%
España	15%
Promedio de Europa	28%

FUENTE: WtERT 2014 (Department of Environmental and Energy Process Engineering Montan Universita et Leobe)

Se observa que niveles de sustitución energética superiores al 30% son alcanzables, incluso en forma sostenible, pero estos se observan en países que cuentan con marcos regulatorios estrictos y sistemas de gestión de residuos maduros, donde la gestión de residuos urbanos con base en rellenos sanitarios ya es una práctica del pasado.

Por esta razón se considera que un 30% de sustitución es un nivel alcanzable, siendo en todo caso poco probable lograrlo en el nivel nacional en México en el corto o mediano plazo. Es probable que con las condiciones actuales de marcos regulatorios, costo de combustible tradicional y condiciones técnico-económicas de la gestión de residuos en México, solamente algunas plantas cementeras específicas alcancen estos niveles en un horizonte de 10 a 15 años, logrando un potencial estimado, en todo el país, del orden del 5 al 10% de sustitución como máximo. Plantas que cuenten con tecnologías de última generación, por ejemplo tecnología de Hot-Disk, podrán optar incluso a niveles de sustitución superiores en el futuro.

Un aumento en el costo de combustibles tradicionales (sostenido en el tiempo) y la generación de condiciones que favorezcan una gestión de residuos orientada a la valorización, tendrán impactos directos en el potencial alcanzable y en los resultados concretos en cuanto al coprocesamiento de RSU seleccionados y acondicionados. Resulta complejo establecer proyecciones específicas en este sentido, pero tomando en cuenta las simulaciones de las **TABLAS 5**, **6** y **7**, y efectuando diversas simulaciones adicionales, se puede proyectar que con un aumento mayor al 40% en el costo del combustible tradicional (respecto a los niveles actuales) combinado con un mejoramiento en las condiciones comerciales del servicio de tratamiento y valorización de residuos que implique una tarifa superior a los 40 USD/t, se generarían las condiciones que permitirían teóricamente alcanzar, en forma sostenible, el potencial de 30% de sustitución en el nivel nacional establecido en la NAMA propuesta por la CANACEM.

La **TABLA 9** muestra, en forma general, las condiciones que debieran cumplirse en cuanto a los niveles de ingreso por servicio de coprocesamiento y costo de combustible tradicional,[8] para proyectar un aumento sostenible en las tasas de sustitución en el nivel nacional. También se muestran los volúmenes de RSU factibles de ser gestionados a través del coprocesamiento en hornos cementeros:

TABLA 9 **Potencial tasa de sustitución y volumen de RSU en función de niveles de ingreso por servicio de coprocesamiento y costo combustible tradicional. (Criterio: rentabilidad justifica inversiones)**

A: Ingresos por servicio de gestión de residuos (USD/t)
B: Costo de combustible fósil tradicional puesto en planta cementera (USD/t)

Tasas de sustitución alcanzables como promedio nacional (%)												
A/B	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
0	0	0	0	0	0	0	0	5	10	15	20	25
10	0	0	0	0	0	5	10	15	20	25	30	30
20	0	0	0	5	10	15	20	25	30	30	30	30
30	0	0	5	10	15	20	25	30	30	30	30	30
40	0	5	10	15	20	25	30	30	30	30	30	30
50	5	10	15	20	25	30	30	30	30	30	30	30
60	10	15	20	25	30	30	30	30	30	30	30	30

Volumen RSU alcanzables como total nacional (kilotoneladas)												
A/B	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
0	-	-	-	-	-	-	-	517	1033	1550	2067	2583
10	-	-	-	-	-	517	1033	1550	2067	2583	3100	3100
20	-	-	-	517	1033	1550	2067	2583	3100	3100	3100	3100
30	-	-	517	1033	1550	2067	2583	3100	3100	3100	3100	3100
40	-	517	1033	1550	2067	2583	3100	3100	3100	3100	3100	3100
50	517	1033	1550	2067	2583	3100	3100	3100	3100	3100	3100	3100
60	1033	1550	2067	2583	3100	3100	3100	3100	3100	3100	31000	3100

FUENTE: elaboración propia.

[8] Para esta simulación se han mantenido constantes los costos logísticos, de preprocesamiento y de recepción/alimentación a los hornos, en niveles correspondientes a la experiencia internacional (FUENTE: Grupo Holcim 2010-2013).

El costo del combustible tradicional y de costo/ingreso por concepto del servicio de gestión de residuos corrresponden a las dos principales "externalidades" a la industria del coprocesamiento. Las variables correspondientes a costos de preprocesamiento, costos de recepción y alimentación a los hornos, y costos logísticos, que dependen fundamentalmente de la gestión en torno al coprocesamiento, se han mantenido constantes para este cálculo, utilizando para esto la experiencia acumulada en proyectos similares (Grupo Holcim principalmente). Como se indicó anteriormente, la optimización de estas variables también implicará oportunidades de crecimiento.

Un aspecto a destacar a favor de proyecciones de sustitución energética en torno al 30%, es el hecho de que la industria cementera mexicana cuenta, en general, con hornos BAT (*Best Available Technology*), que permiten un adecuado coprocesamiento de RSU clasificados. Lo anterior reforzado por una amplia experiencia en coprocesamiento, siendo México el país más avanzado en América Latina en este campo, con una tasa actual promedio de sustitución energética del 12 al 13% en el nivel nacional.

5.4. Desafíos para alcanzar el potencial

5.4.1. Operaciones

Desde el punto de vista del diseño de sistemas integrales de gestión de residuos orientados a la valorización energética por coprocesamiento en hornos cementeros, destacan los siguientes desafíos fundamentales:

- **Optimización de costos de separación y pretratamiento RSU:** Entre más pronto se proceda a la separación y clasificación a lo largo de la cadena de valor, más eficiente será el proceso. Es por esto que conceptos como separación en origen (hogares) y recolección diferenciada (también conocida como "segregada") son elementos clave en un sistema eficiente.
- **Optimización de costos logísticos:** La selección y diseño de instalaciones deberá tomar en cuenta aspectos como la cercanía a las plantas cementeras, reduciendo de esta forma los costos de transporte. Una planta cementera que pretenda utilizar volúmenes importantes de RSU acondicionados, deberá privilegiar la gestión en sus poblaciones aledañas.
- **Optimización de costos recepción, manejo y alimentación de hornos:** Instalaciones y operaciones flexibles, modulares y eficientes permitirán gestionar costos de inversión y de operación razonables. Cada etapa del proceso debe diseñarse considerando las características de los materiales a manejar, y las exigencias de calidad que imponga el proceso productivo de los hornos cementeros involucrados.

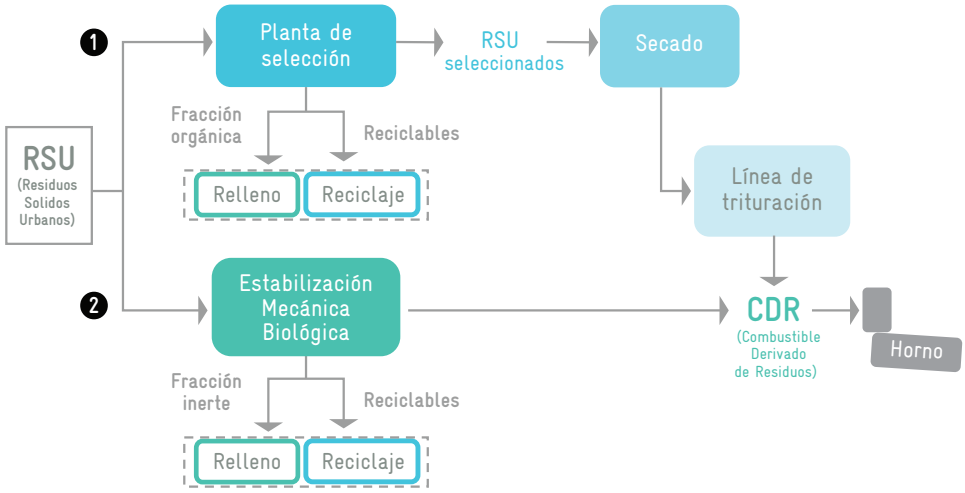
El **GRÁFICO 7** muestra las dos opciones de pretratamiento para RSU más desarrolladas en el nivel mundial. Se observa:

- Alternativa 1, de implementación de actividades orientadas a la selección y separación en una planta de separación (*Sorting Plant*), con posterior etapa de secado y trituración de los materiales que conformarán el combustible alterno RDF.
- Alternativa 2, implementación de tratamiento mecánico biológico, cuyo objetivo principal es la estabilización de la fracción orgánica para posteriormente separar las fracciones inertes y reciclables, resultando un remanente destinado a la producción de combustible alterno RDF.

El **GRÁFICO 8** por su parte, muestra una secuencia operacional típica de una planta de separación con operación manual y tecnificada, indicándose el rango típico de inversión necesaria para lograr producciones a escala industrial, de hasta 40,000 t por año.

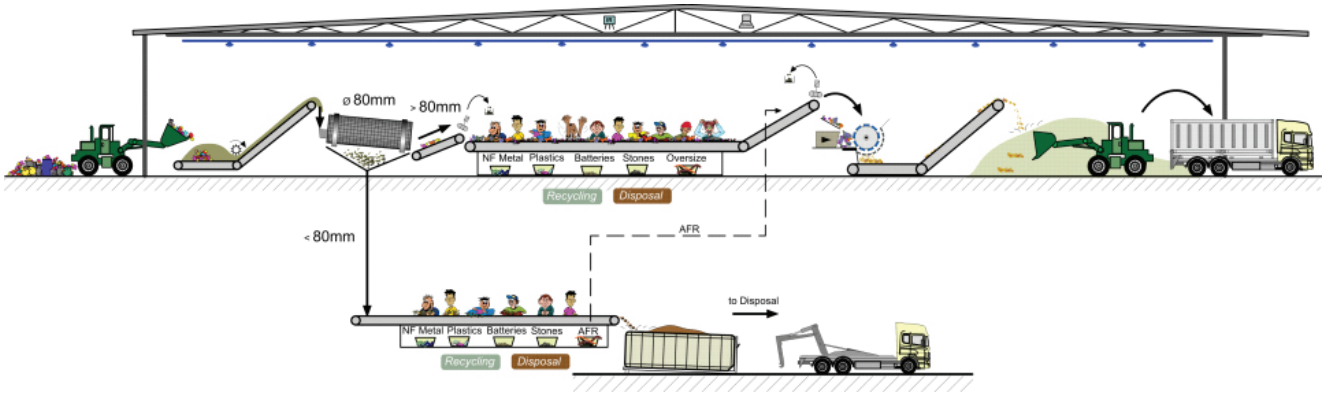
De igual forma, en los **GRÁFICOS 9** y **10** se muestra una instalación típica de recepción y alimentación del combustible alterno a un horno cementero, incluyendo puntos de inyección, con su rango de inversión típico.

GRÁFICO 7 **Esquema de opciones para pretratamiento de RSU**

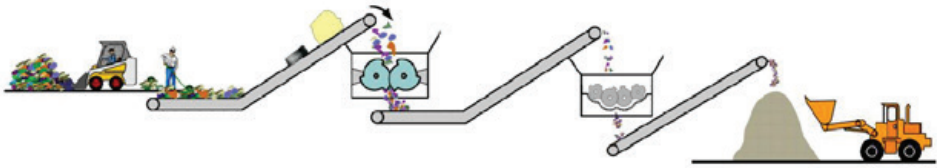


FUENTE: Holcim.

GRÁFICO 8 **Configuración típica y nivel de inversión para separación y pretratamiento RSU (hasta 40,000 t/año)**

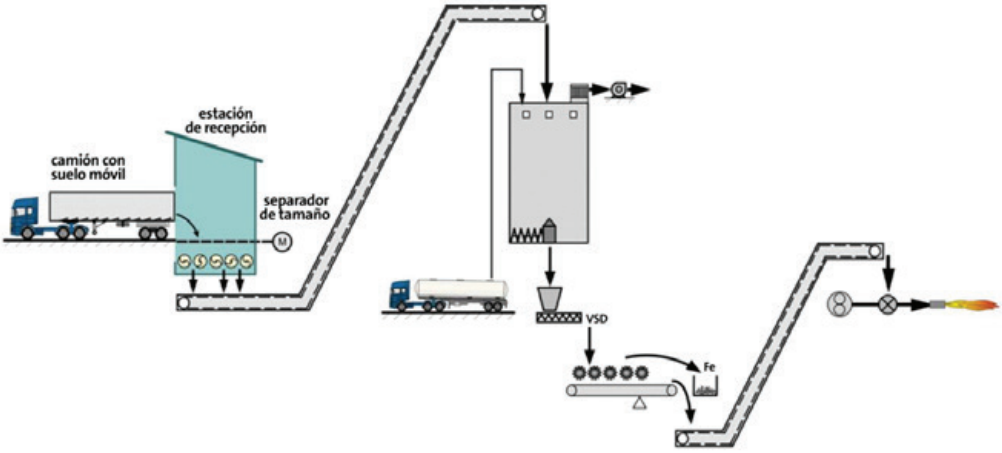


Rangos de inversión pre-proceso: 5-20 Mio USD

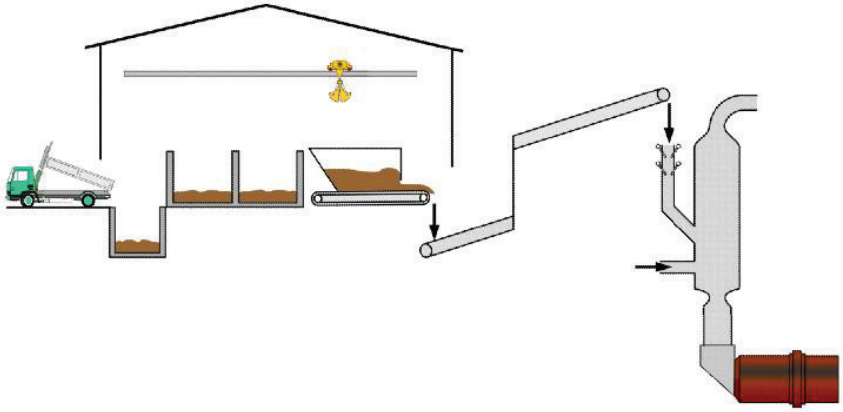


FUENTE: Holcim.

GRÁFICO 9 **Configuración típica y nivel de inversión para recepción y alimentación a hornos (hasta 40,000 t/año)**

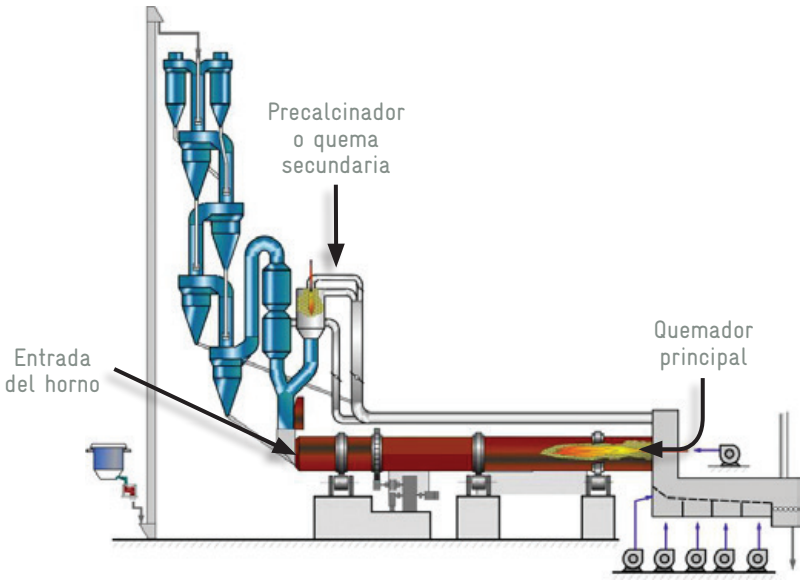


Rangos de inversión en hornos (alimentación): 2-5 Mio USD por instalación



FUENTE: Holcim.

GRÁFICO 10 **Puntos de alimentación combustible alterno a horno cementero BAT.**



FUENTE: Holcim.

5.4.2. Desarrollo de capacidades

El coprocesamiento, como cualquiera otra tecnología que involucre aspectos ambientales relevantes como la gestión de residuos y emisiones a la atmósfera, requiere para su consolidación que todas las partes interesadas involucradas logren una visión y entendimiento común de las oportunidades, beneficios y desafíos involucrados.

En este contexto, la experiencia en el desarrollo de capacidades indica que son necesarias diferentes etapas e instancias, siendo el concepto de colaboración público-privada y el desarrollo de marcos regulatorios adecuados los que aparecen como principales.

Como se indicó con anterioridad, México cuenta con la más larga experiencia en América Latina en lo que se refiere a coprocesamiento en hornos cementeros, pero sin embargo aún se observan visiones y entendimientos diferentes entre la industria, la autoridad y otras partes interesadas. El **GRÁFICO 11** muestra los pasos típicos para un proceso de construcción de capacidades, siendo los colores en cada caso, indicativos del estado de cada área en México, a juicio del Consultor. El color verde corresponde a aspectos satisfactoriamente desarrollados, el amarillo a aquellos en proceso de desarrollo, y el rojo a tareas pendientes.

Se observa que el mayor desafío se identifica en la capacidad de avanzar en temas regulatorios y estratégicos bajo un concepto de colaboración público-privada. Las diferentes entrevistas sostenidas durante el transcurso del presente estudio muestran a un sector cementero agrupado gremialmente en la CANACEM, que cuenta con una agenda de sostenibilidad propia, sin que esta sea trabajada permanentemente con la autoridad. Un ejemplo de esta realidad es la NAMA del sector cemento ya comentada, la que ha sido desarrollada principalmente en forma unilateral por la industria, sin que se observe un reconocimiento explícito por parte de la autoridad, más allá de las comunicaciones formales de rigor.

GRÁFICO 11 Proceso de construcción de capacidades para coprocesamiento

FUENTE: elaboración propia.

5.4.3. Desarrollo y actualización de marcos regulatorios

Como ya se ha indicado, para un desarrollo sostenible del coprocesamiento es necesaria la inyección de recursos en la Cadena de Valor de la gestión de residuos.

Las legislaciones modernas han consolidado conceptos como "El que contamina paga", o algunos más modernos como "De la cuna a la cuna", o la Economía Circular, Responsabilidad Compartida y Responsabilidad Extendida del Productor, todos los cuales persiguen el objetivo de cerrar, en forma eficiente y sostenible, los ciclos productivos y de generación de residuos a partir de una gestión integral en la que se favorezcan mecanismos para solventar económicamente los costos de la cadena de suministros o cadena de valor.

En este sentido, México lleva adelante un proceso de revisión y actualización de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), en la cual se recomienda considerar algunos de estos conceptos, y en particular el coprocesamiento como una alternativa para un manejo de residuos adecuado y eficiente.

Asociado a una ley moderna y eficiente para la gestión general de residuos, las regulaciones modernas tienden a desarrollar una normativa legal específica para las tecnologías disponibles. En este contexto, la NOM-040 del año 2002 establece algunos requisitos y criterios para el buen desempeño de hornos cementeros que realizan coprocesamiento, que se recomienda revisar y actualizar a la luz de la experiencia internacional acumulada en los últimos 10 años, donde las recomendaciones del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) a través del Convenio de Basilea reúnen el consenso de la comunidad internacional.

La actualización de los marcos normativos antes descritos deberá necesariamente ser complementada con la revisión y adaptación de otros cuerpos legales asociados como la NOM 083 (Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial), y la NOM 161 (Que establece los criterios para clasificar a los residuos de manejo especial y determinar cuáles están sujetos a plan de manejo; el listado de los mismos, el procedimiento para la inclusión o exclusión a dicho listado; así como los elementos y procedimientos para la formulación de los planes de manejo), entre otras.

Mención especial merece el concepto de la REP, que ha demostrado internacionalmente ser un mecanismo eficiente para la inyección de recursos a la cadena de valor en la gestión de residuos, y en la que el coprocesamiento en hornos cementeros desempeña un papel importante en la etapa de valorización energética de los residuos. Este concepto no se encuentra en el marco legislativo mexicano, pero se considera que su evaluación e implementación podría fomentar la valorización de residuos.

A pesar de que la REP es una política que acontece con mayor frecuencia en países desarrollados, también es posible encontrar ejemplos en América Latina. Al tomar como base el proyecto de ley de Responsabilidad Extendida del Productor que se discute actualmente en Chile, cuyo proceso de discusión se ha caracterizado por favorecer un permanente diálogo público-privado, donde los temores iniciales del sector productivo se han disipado de manera paulatina mediante una fuerte gestión participativa y colaborativa entre distintos sectores y partes interesadas (incluyendo los recicladores informales), mesas de diálogo y grupos de trabajo público-privados, se destacan los siguientes aspectos:

- La valorización energética y de materiales que logra el coprocesamiento es reconocida por el concepto REP.
- El coprocesamiento ofrece infraestructura, tecnología y experiencia ya existente en países que no cuentan con otro tipo de tecnologías para la gestión de residuos.
- El concepto REP facilitará la inyección de recursos económicos en la cadena de valor de los residuos, ya que son los productores los que deberán financiar la cadena de recolección, reciclaje y valorización.
- Tasas obligatorias de valorización reforzarán el mercado del coprocesamiento.
- Metas crecientes y graduales permitirán planificar inversiones y optimizar la gestión.

5.5. Barreras identificadas

Las barreras que se identifican actualmente en México responden a diferentes aspectos de la gestión, y se pueden agrupar así:

Regulatorias:

- Marcos regulatorios actuales promueven pero no fomentan, en forma directa, la valorización.
- Normativa antigua para comportamiento ambiental de hornos, que requiere actualización.

Sociales:

- Pepenadores (Conceptos de recuperación de residuos y reciclaje inclusivo y digno).
- Organizaciones No Gubernamentales ambientalistas que se oponen a tecnologías de tratamiento térmico como el coprocesamiento.

Gremiales:

- Asociación Gremial de la Industria Cementera (CANACEM), sería deseable una mayor participación en el trabajo de colaboración público-privado.
- Necesidad de contactos directos con empresas individuales.
- Rechazo o inquietudes/falta de información ante el concepto REP por parte de la industria privada.

5.6. Recomendaciones

Con el objetivo de maximizar las probabilidades de un desarrollo armónico y sostenible del coprocesamiento de residuos sólidos urbanos en México, se recomienda:

- Aproximación, como proyecto, a la industria cementera y de gestión de residuos desde una perspectiva de colaboración público-privada. Es recomendable que la autoridad responsable (SEMARNAT, SENER) sea el organismo que realice dicha convocatoria.
- Favorecer contactos directos con empresas individuales del sector cemento, en el nivel de Dirección General (CEOs), obteniendo visión de cada empresa en torno al coprocesamiento de RSU clasificados, y de esta forma identificar iniciativas que puedan transformarse en proyectos piloto (primera etapa) y desarrollos futuros a escala industrial.
- Gestionar la socialización con Proyecto FIRSU de Cemex, para conocer la experiencia, barreras y lecciones aprendidas. La experiencia ganada por Cemex en el desarrollo de este proyecto permitirá establecer bases sólidas para una aproximación del tema al resto de la industria.
- Buscar sinergias con la industria de gestión de residuos, a través de entidades tales como la Asociación Mexicana de Empresas Ambientales (AMEXA). Es fundamental el trabajo con toda la cadena de suministros, siendo las empresas gestoras de residuos un actor clave a atraer a la lógica del coprocesamiento mediante su adaptación a actividades de recolección segregada, clasificación e incluso preprocesamiento.
- Proyectos Piloto. El aprendizaje obtenido de experiencias piloto permitirá extrapolar conclusiones y lecciones aprendidas, a una escala industrial. Articular proyectos piloto con la industria, con el objetivo de validar aspectos técnicos y operacionales, así como para definir requisitos económicos mínimos que otorguen factibilidad a la actividad de coprocesamiento de RSU clasificados.
- Intentar dar seguimiento cercano (y eventual apoyo), al proyecto piloto de Holcim en Hermosillo, que surge como una de las iniciativas privadas más probables en el corto plazo.
- Buscar sinergias con modelos tipo SIMEPRODE. Una eficiente gestión municipal, centralizada e independiente a los ciclos políticos, dará sostenibilidad al sistema. SIMEPRODE ha demostrado ser eficiente.
- Marcos regulatorios. Establecer como pilar de gestión un programa de revisión y actualización de marcos regulatorios relativos al coprocesamiento, incluyendo la discusión de factibilidad para el fomento del concepto REP, y el proceso de revisión de la NOM 040 -ECOL-2002.
- Partes Interesadas. Un levantamiento exhaustivo de las partes interesadas, tanto locales (en cada caso) como para todo el país, permitirá socializar el coprocesamiento como una alternativa sostenible de gestión. En este sentido destacan los pepenadores como corriente de trabajo específica.
- Priorización de mejores tecnologías disponibles para el coprocesamiento, en caso de estar disponibles (Precalcinadores, Hot Disk[9], etcétera.)

[9] Hot Disk: Dispositivo complementario al horno cementero, que permite un coprocesamiento flexible de materiales de diversas características, y que ha demostrado altas eficiencias.

6.1. Generalidades

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

- Gestionar el costo del residuo (cuánto le cuesta hoy al generador deshacerse de las llantas usadas).
- Mejorar la cadena de distribución (desde el generador hasta la planta cementera).
- Incluir costos pretratamiento (principalmente trituración).
- Evaluar la Tecnología de hornos y su potencial.

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

a) **Establecimiento del concepto de Responsabilidad Extendida del Productor:** Mediante la REP, es el mismo productor o distribuidor de las llantas el que articula mecanismos para la recolección de llantas usadas por medio del 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 sobreprecio cubre la cadena de suministro de la llanta usada hasta el momento de su coprocesamiento en los hornos cementeros. Es común observar que sea la misma autoridad local (municipios, provincias, etcétera) 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.
El ejemplo de Chile en gestión de llantas se concentra en la experiencia de Cementos Melón SA, que, con base en un acuerdo de cooperación con la empresa GoodYear, en 2003 comenzó un exitoso programa de coprocesamiento fundamentado en la articulación de logística reversa en la cual GoodYear se hizo cargo de la recuperación de llantas desde distribuidores, simulando, de forma voluntaria, una gestión de responsabilidad extendida del productor. Gracias a esta experiencia, otros productores se unieron a la iniciativa, lo que dio origen a un "Acuerdo de Producción Limpia" de productores de llantas.

b) **Apoyo a la recolección y gestión de llantas usadas con base en subsidios:** En Estados Unidos, el principal mecanismo de fomento a una gestión sostenible de llantas usadas es el de los incentivos, por medio de 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 orden de los 50 USD/t 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 de manera fundamental 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 pretratamiento. De esta forma se optimiza la cadena, y se logran economías que, de no existir, harían poco factible la rentabilidad final de la operación. GRÁFICO 12.

GRÁFICO 12 **Secuencia cooperación público-privada para gestión sostenible de llantas usadas – México 2008**

FUENTE: Holcim.

Estos acuerdos de cooperación y acción conjunta entre actores públicos y privados generan también altos grados de confianza entre autoridades locales e industria, y favorecen 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. (**GRÁFICOS 13** y **14**).

GRÁFICO 13 **Cartel promoción campaña recolección llantas usadas, México 2008**

FUENTE: Holcim.

GRÁFICO 14 **Impacto campaña de recolección de llantas usadas – México 2008**

Ciudad limpia de llantas

A DONDE LLEVARLAS

Recolectan llantas para reciclar y preservar el medio ambiente

Reciclarán llantas viejas Apasco y el Ayuntamiento

ECOLOGÍA

Reciclarán 6 mil toneladas de llantas

Tendrá inversión de 2 millones 190 mil pesos; en 70 días triturarán más de 600 mil neumáticos, informó el gobernador

La meta: mil toneladas en tres semanas

Comienza recolección de llantas

La Semades abrió cuatro centros de acopio en la zona metropolitana

uno x uno

No tire sus llantas

La recolección de llantas también impedirá la reproducción del mosquito transmisor del dengue

FUENTE: Holcim.

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 (**GRÁFICO 15**). La experiencia indica que trituradoras móviles permiten una mayor flexibilidad y optimización de los costos logísticos, si bien esta actividad genera costos adicionales.

En términos generales, la trituración de la llanta estará orientada a la alimentación del material a través del precalcinador del horno cementero, por lo que el tamaño típico de trituración es de 50 mm o 2 pulgadas.

Para el caso de la trituración de llantas, los rangos normales de inversión están en el rango 1,0 a 1,5 Mio. USD (para 20,000 t/año), mientras que los costos operativos son del orden de los 20-30 USD/t, incluyendo aspectos de protección ambiental, salud y seguridad en el trabajo.

GRÁFICO 15 Trituradora móvil de llantas México 2008

FUENTE: Holcim.

6.2. Potencial para coprocesamiento de llantas usadas en México

Tanto el mercado interno de las llantas en México como el movimiento de llantas usadas desde Estados Unidos involucran grandes volúmenes que conllevan una disponibilidad teórica para la industria cementera. Solamente la venta de llantas nuevas en el mercado interno mexicano se estima por sobre los 35 millones de unidades al año, equivalentes a cerca de 530,000 t/año. Por otra parte, se estima que alrededor de 40 millones de llantas se desechan anualmente, de las cuales tan solo un 2% se reciclan o aprovechan[10].

De esta forma, será la capacidad técnica de los hornos y la articulación de sistemas logísticos eficientes y sostenibles los que determinen el potencial real para el coprocesamiento de llantas en el país.

La experiencia internacional indica que los niveles de sustitución con llantas usadas pueden llegar a máximos del 40% en hornos dotados con precalcinador, porcentaje que no sería factible cubrir con el mercado local en el supuesto que la totalidad de la industria cementera se enfoque al coprocesamiento de estos materiales. Si se asume que existe un máximo promedio de 40% de sustitución térmica[11], y se considera que el 60% de la producción de clínker en México se realiza en hornos de estas características (precalcinador),[12] el potencial teórico de coprocesamiento de llantas usadas es de 1,100,000 t/año.

En otras palabras, la teoría indica que la industria cementera mexicana podría asumir vía coprocesamiento el total de generación de llantas usadas de tamaño vehicular.

[10] Expansión, 2013, y Cámara de Diputados, 2013.
[11] Es factible estimar este potencial técnico, ya que la industria cementera mexicana cuenta con tecnología BAT (Best Available Technics), similar a la tecnología con que cuentan hornos en países desarrollados que muestran estos niveles máximos de sustitución (USA, Europa, etcétera).
[12] Estimación con base en promedios regionales América Latina.

6.3. Recomendaciones

Si se consideran las dinámicas económicas y de gestión observadas en México, y se toman en cuenta las experiencias exitosas disponibles, se recomienda potenciar el coprocesamiento de llantas usadas con base en las siguientes líneas de acción:

- Articulación de proyectos piloto de carácter local, con base en un concepto de cooperación público-privada entre municipios y plantas cementeras, en los que se promueva la recolección voluntaria de llantas usadas por parte de los usuarios, facilitando lugares de acopio centralizados. Estos lugares de acopio, administrados por los municipios, deben ser ubicados en lugares estratégicos que faciliten la llegada de llantas usadas, y al mismo tiempo ofrezcan ventajas logísticas para su transporte a las plantas cementeras.
  Bajo esta modalidad, las plantas cementeras se harán cargo de las operaciones de trituración de las llantas usadas en el lugar de acopio y su posterior transporte al horno cementero.
- Promoción del concepto de Responsabilidad Extendida del Productor para el caso de los productores e importadores de llantas en México, ya sea a través de marcos regulatorios o bien de acuerdos voluntarios que se conviertan en una herramienta de gestión ambiental de dichas empresas. Este concepto de responsabilidad extendida podrá facilitar la implementación de sistemas de logística inversa en las cadenas de suministros de llantas que permitan una recolección eficiente de llantas usadas maximizando eficiencia y disminuyendo costos logísticos.
  En la medida en que los marcos regulatorios incorporen el concepto de Responsabilidad Extendida del Productor, se promoverá la inyección de recursos en la cadena de suministros, llegando incluso a que los mismos consumidores (usuarios de llantas) deban pagar un sobreprecio marginal al momento de compra, que será destinado a cubrir los costos de recolección y pretratamiento que sean necesarios.

COPROCESAMIENTO DE LODOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR)

7

7.1. Generalidades

El coprocesamiento 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. El **GRÁFICO 16** visualiza los distintos estados que pueden tener los lodos de las PTAR, según su humedad.

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

- Disponibilidad de lodos secos (tecnología de tratamiento disponible)
- Costo alternativo de disposición (tarifa de rellenos especialmente diseñados)
- Capacidad técnica (de proceso) de los hornos cementeros para absorber grandes volúmenes.
- Costos logísticos (transporte)

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 de análisis de factibilidad de un eventual proyecto.

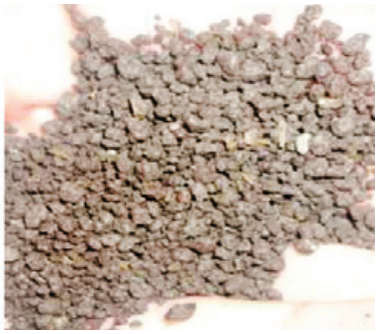
Si se asume que existe un correcto funcionamiento de las plantas de tratamiento de aguas domésticas, el principal desafío en cuanto a pretratamiento de este material es el secado, que por lo general no es incluido en las inversiones iniciales de dichas plantas de tratamiento. Por aspectos sanitarios 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 mono 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 por la combustión de los gases generados durante los procesos de fermentación anaeróbica de los mismos lodos (**GRÁFICO 17**). Otra opción es el secado utilizando energía solar (**GRÁFICO 18**).

GRÁFICO 16 Lodos de las PTAR

Lodos "crudos" como efluente tratamiento biológico (80-90% humedad)

Lodos como efluente tratamiento mecánico (65-75% humedad)



Lodos como efluente tratamiento secado (<10% humedad)

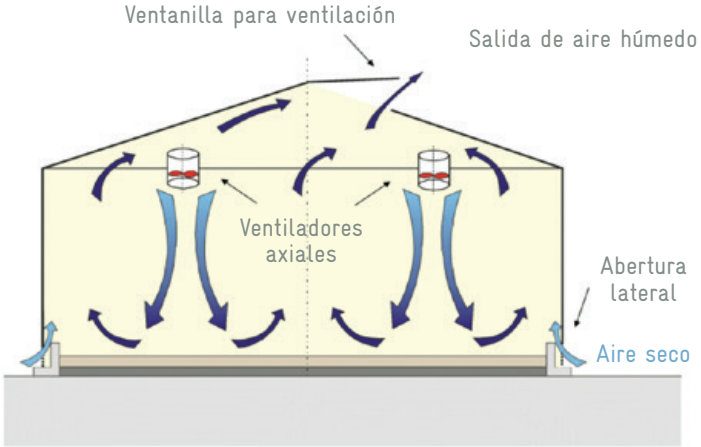
FUENTE: Holcim.

De acuerdo con la experiencia europea, los costos de inversión para el secado de lodos utilizando diferentes técnicas (térmico, mecánico, etcétera), suponiendo un volumen anual de 40,000 t, está en el rango de los 4-6 millones de dólares, con un costo operacional de unos 15 USD/t.

GRÁFICO 17 **Secado de lodos con proceso térmico**

FUENTE: Holcim.

GRÁFICO 18 **Secado de lodos con proceso solar**



FUENTE: Holcim.

7.2. Desafíos técnicos

Los principales desafíos técnicos para un coprocesamiento sostenible de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales son aquellos relacionados con la humedad de los lodos, y su contenido natural de cenizas.

- **Humedad:** Un parámetro importante de calidad del combustible alterno será su humedad (contenido de agua), la que naturalmente viene asociada a los diferentes tipos de tratamiento de las aguas residuales. Es usual encontrar que los lodos crudos presentan contenidos de humedad superiores al 70-80%, lo que no es compatible con el proceso de producción del horno cementero. Altos contenidos de humedad podrán provocar dificultades operacionales, principalmente en lo que respecta al consumo térmico del horno cementero, y a su eficiencia productiva (potenciales pérdidas de producción). Es por esta razón que el coprocesamiento de lodos requiere de procesos de secado previo que permitan obtener un material idealmente por debajo del 10% de humedad.
- **Contenido de ceniza:** El contenido de cenizas de los combustibles es un elemento a tomar en cuenta cuando se proyectan altas tasas de sustitución. Las cenizas, dependiendo de su composición, pueden presentar impactos posteriores en la calidad del clínker, por lo que su control y adecuada caracterización son fundamentales. En el caso de los lodos provenientes de diversas PTAR, las cenizas están presentes en gran cantidad (hasta 50%), pero debido a su origen, su calidad es bastante homogénea, predominando los silicatos (sílice), que es un material presente en la composición básica del clínker y posteriormente del cemento. El desafío está en encontrar los equilibrios que permitan ajustar la composición de la materia prima (harina) para un proceso productivo estable.

7.3. Disponibilidad de lodos en México

La tendencia en los países en desarrollo indica que proyectos de saneamiento urbano consistentes en nuevas plantas de tratamiento de aguas residuales son una prioridad. Estos proyectos, a diferencia de la costumbre en el pasado, consideran generalmente el aprovechamiento de lodos para la obtención de biogás y su utilización, siendo una fuente interesante de lodos con potencial uso en el coprocesamiento.

Según información recabada por GIZ, en México se registra la existencia de ocho plantas de estas características, y tres en construcción, algunas de las cuales corresponden a proyectos de gran tamaño, con una generación potencial de lodos de varios millones de toneladas anualmente. Destaca por ejemplo en la Ciudad de México la empresa Aguas Tratadas del Valle de México, SA de CV ("Compañía Proyecto"), la cual proveerá los servicios de tratamiento de agua a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) por 25 años. La planta contará con una capacidad nominal de 35,000 litros por segundo y estará diseñada para manejar picos de hasta 52,000 litros por segundo (en época de lluvias) y saneará las aguas residuales de la Ciudad de México y su zona metropolitana.

Además de estas plantas modernas, es posible encontrar en México cientos de pequeñas plantas de tratamiento de aguas residuales que utilizan tecnologías antiguas, las que de igual forma generan un volumen muy interesante de lodos que requieren de una gestión adecuada. En todas esta plantas, uno de los desafíos principales para el aprovechamiento de los lodos es contar con tecnologías eficientes de secado, hoy inexistentes en la gran mayoría de estas instalaciones.

7.4. Potencial para coprocesamiento de lodos de planta de tratamiento

Al igual que para el caso de los residuos sólidos urbanos, el potencial para el coprocesamiento de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales dependerá de factores técnico-económicos, siendo las externalidades como el costo del combustible tradicional y la disponibilidad de recursos para el pago del servicio por disposición de lodos, los más importantes. También tiene un papel fundamental el aspecto logístico, donde la cercanía de las plantas de tratamiento a las plantas cementeras será un factor de decisión importante en cada caso.

En el caso de los lodos también toman importancia algunos aspectos técnicos con impacto en la calidad del clínker/cemento/concreto/hormigón, como por ejemplo el contenido de cenizas de estos materiales (en particular sílice), que deberá considerarse en la estimación del potencial de cada horno en particular.

Desde el punto de vista logístico, la tendencia en la implementación de plantas de tratamiento de aguas residuales implicará que la mayor parte de las ciudades, en el mediano y largo plazo, contarán con generación de este tipo de lodos, con la consecuente cercanía a las diversas plantas cementeras.

En cuanto a la utilización de los lodos, es importante distinguir entre aquellos que son sometidos a procesos de digestión anaeróbica (aprovechamiento de metano) y aquellos que simplemente son generados y descartados. En ambos casos serán necesarios procesos de secado, obteniéndose contenidos energéticos en términos de poder calorífico promedio, de 2500 kcal/kg para el caso de los lodos provenientes de digestión anaeróbica, y de 4000 para el caso de lodos crudos que son descartados[13]. Ambos datos corresponden a lodos secos, con un contenido de agua inferior al 10%.

Si se considera el aprovechamiento energético de los lodos provenientes de PTAR con base en su digestión anaeróbica (producción y utilización de metano), se observa que, al nivel de costo actual del combustible tradicional, la actividad se vuelve sostenible con niveles de pago por el servicio de gestión de lodos superiores a 30 USD/t.

Si por el contrario se supone que no existirá pago por el servicio de gestión de estos lodos, la actividad se muestra sostenible para niveles de costo de combustible tradicional superiores a 140 USD/t.

Este efecto se observa en las **TABLAS 10** y **11,** en las que se consideran como constantes los costos de pretratamiento (secado) secado de los lodos, los costos logísticos, y los correspondientes costos de recepción y alimentación de lodos, los cuales se han asumido considerando niveles promedio[14].

Como se indicó, el potencial volumen de lodos factibles de tratar a través del coprocesamiento estará dado por dos factores fundamentales:

- **Factibilidad económica**, a determinar según la combinación de ingresos y costos operacionales, en conjunto con el costo del combustible tradicional.
- **Factibilidad técnica**, a determinar caso a caso según la capacidad de los hornos para absorber el contenido de cenizas provenientes de los lodos, los que pueden alcanzar niveles del 50%, dependiendo del tipo de digestión[15].

Las mejores prácticas indican que el consumo de materiales alternativos de alto contenido de cenizas en hornos cementeros puede alcanzar unos 80 kg por cada tonelada de clínker producido (Experiencia Holcim 2010-2013). Bajo este escenario, y considerando una producción de clínker en México de 44,000,000 toneladas por año, el potencial teórico para el coprocesamiento de lodos provenientes de las PTAR alcanza las 3,520,000 toneladas por año, con una sustitución energética, también teórica, del 24%.

Cabe destacar que ese potencial sólo se alcanzaría en la medida que únicamente se coprocese este tipo de material, ya que a esos niveles volumétricos y de incorporación de cenizas al proceso, la operación sería incompatible con otros tipos de residuos a ser coprocesados.

[13] IWA International Water Association 2007.
[14] Holcim 2010-2013
[15] IWA International Water Association 2007

TABLA 10 **Simulación de la utilidad de operación del coprocesamiento de lodos PTAR secos. Supuesto: Nivel actual costo combustible tradicional e ingresos por servicios de gestión por 20 USD/t de lodo**

	Lodos PTAR
Poder calorífico combinación tradicional (GJ/t)	32
Costo combustible tradicional (USD/t)	-100
Costo combustible tradicional (USD/GJ)	-3.13
Poder calorífico combinación alternativo (GJ/t)	10
Costo disposición residuo (-compra, +cobro) (USD/t)	20
Costo logístico generador - preproceso (USD/t)	0
Costo selección y preprocesameinto (USD/t)	-15
Costo combinación alternativo (USD/t)	5
Costo combinación alternativo (USD/GJ)	0.50
Costo logístico preproceso - planta cementera (USD/t)	-15
Costo de recepción/alimentación (USD/t)	-5
Costo final combinación alternativo en horno (USD/t)	-10
Costo final combinación alternativo en horno (USD/GJ)	-1.0
Beneficio por sustitución térmica (USD/t combinación alternativo)	31.25
Utilidad (+) / pérdida (-) (USD/t combinación alternativo)	**21.3**

FUENTE: elaboración propia.

TABLA 11 **Simulación de la utilidad de operación del coprocesamiento de lodos PTAR secos. Supuesto: Costo combustible tradicional 140 USD/t, sin ingresos por concepto de gestión de residuos**

	Lodos PTAR
Poder calorífico combinación tradicional (GJ/t)	32
Costo combustible tradicional (USD/t)	-140
Costo combustible tradicional (USD/GJ)	-4.38
Poder calorífico combinación alternativo (GJ/t)	10
Costo disposición residuo (-compra, +cobro) (USD/t)	0
Costo logístico generador - preproceso (USD/t)	0
Costo selección y preprocesameinto (USD/t)	-15
Costo combinación alternativo (USD/t)	-15
Costo combinación alternativo (USD/GJ)	-1.50
Costo logístico preproceso - planta cementera (USD/t)	-10
Costo de recepción/alimentación (USD/t)	-5
Costo final combinación alternativo en horno (USD/t)	-30
Costo final combinación alternativo en horno (USD/GJ)	-3.0
Beneficio por sustitución térmica (USD/t combinación alternativo)	43.75
Utilidad (+) / pérdida (-) (USD/t combinación alternativo)	**13.8**

FUENTE: elaboración propia.

La **TABLA 12** muestra, en forma general, las condiciones que debieran cumplirse en cuanto a niveles de ingreso por servicio de coprocesamiento de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales, y costo combustible tradicional,[16] para proyectar un aumento sostenible en las tasas de sustitución en el nivel nacional, así como en los volúmenes de lodos factibles de ser gestionados a través del coprocesamiento en hornos cementeros.

[16] Para esta simulación se han mantenido constantes los costos logísticos, de preprocesamiento y de recepción/alimentación a los hornos, en niveles correspondientes a la experiencia internacional. (Grupo Holcim 2010-2013).

TABLA 12 **Potencial tasa de sustitución y volumen de Lodos PTAR en función de los niveles de ingreso por servicio de coprocesamiento y costo combustible**

A: Ingresos por servicio de gestión de residuos (USD/t)
B: Costo de combustible fósil tradicional puesto en planta cementera (USD/t)

Tasas de sustitución alcanzables como promedio nacional (%)												
A/B	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
0	0	0	0	0	0	10	15	15	20	24	24	24
10	0	0	0	5	10	15	15	20	24	24	24	24
20	0	5	5	15	15	20	24	24	24	24	24	24
30	5	5	15	15	20	24	24	24	24	24	24	24
40	15	15	15	24	24	24	24	24	24	24	24	24
50	15	15	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
60	15	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24

Volumen RSU alcanzables como total nacional (kt)												
A/B	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
0	–	–	–	–	–	1467	2200	2200	2933	3520	3520	3520
10	–	–	–	733	1467	2200	2200	2933	3520	3520	3520	3520
20	–	733	733	2200	2200	2933	3520	3520	3520	3520	3520	3520
30	733	733	2200	2200	2933	3520	3520	3520	3520	3520	3520	3520
40	2200	2200	2200	3520	3520	3520	3520	3520	3520	3520	3520	3520
50	2200	2200	3520	3520	3520	3520	3520	3520	3520	3520	3520	3520
60	2200	3520	3520	3520	3520	3520	3520	3520	3520	3520	3520	3520

FUENTE: elaboración propia.

7.5. Recomendaciones

Al tomar en cuenta los desafíos técnicos que implica el coprocesamiento de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales, y la nula experiencia en México al respecto, se recomienda:

- Promover, en coordinación con la CONAGUA, la ejecución de proyectos piloto que permitan encontrar los puntos de optimización de las diferentes variables y etapas del proceso.
  Por una parte, será necesario identificar plantas de tratamiento de aguas residuales cercanas a plantas cementeras, e implementar en ellas diversas técnicas de secado de los lodos PTAR, obteniendo diferentes calidades de material a ser coprocesados, registrando los costos operacionales respectivos.
  Las plantas cementeras, por su parte, podrán establecer los niveles de humedad que permiten una operación estable del horno y un aprovechamiento de la energía térmica entregada por los lodos. Asimismo, podrán establecer las tasas de alimentación óptimas que garanticen la calidad del clínker producido.
  Estas experiencias piloto entregarán las conclusiones sobre los equilibrios técnicos y económicos en la cadena de suministro de los lodos, que serán necesarios para justificar el coprocesamiento en una planta determinada.
- Las conclusiones obtenidas podrán reflejarse en reglamentos o manuales específicos que faciliten la gestión de estos materiales en diferentes plantas de tratamiento y diferentes plantas cementeras.

8.1. Conclusiones

Al tomar como base la experiencia internacional, y considerando el hecho de que la industria cementera mexicana cuenta con instalaciones modernas que ofrecen las mejores tecnologías disponibles, se puede estimar que el potencial volumen de residuos sólidos urbanos que podría gestionarse a través de su coprocesamiento alcanza 3,1 millones de toneladas anuales, correspondientes a un 8.2% del volumen total generado en el nivel nacional según las estimaciones de la SEMARNAT (2012). Este volumen se basa en un reemplazo de energía térmica en la industria del cemento (sustitución de combustibles fósiles como coque de petróleo o carbón), equivalente a un 30% del total.

Este potencial teórico tiene asociada una serie de cobeneficios, entre los que destacan una gestión de residuos sostenible, y un impacto relevante en las emisiones de gases de efecto invernadero, con una reducción total teórica de 3,2 millones de toneladas de CO_2 anualmente, de acuerdo con las estimaciones planteadas por CANACEM en su propuesta de NAMA del Sector Cemento. Esta disminución teórica se basa en los diferentes factores de emisión de los combustibles provenientes de residuos, y en las emisiones evitadas al no disponer esos residuos de una forma tradicional.

Para lograr alcanzar este potencial se requiere la materialización de una serie de condiciones económicas, técnicas y regulatorias, dentro de las que destaca la necesidad de inyección de recursos en la cadena de valor en la gestión de residuos (por ejemplo a través de fórmulas como la REP), la optimización operacional y logística, y la actualización de marcos regulatorios tanto en el campo de la gestión de residuos como de la producción de cemento.

También es muy importante considerar algunas externalidades que definen la factibilidad de las actividades de coprocesamiento, y que complementan los conceptos anteriores. La más importante es la que tiene relación con el costo de los combustibles fósiles tradicionales. A mayor costo de estos, mayor será el incentivo de la industria para invertir en el reemplazo de estos combustibles tradicionales y en el desarrollo de capacidades de procesamiento de combustibles alternativos.

Si se considera la fluctuación histórica en el costo de los combustibles fósiles tradicionales, y el desarrollo de políticas públicas e iniciativas privadas que permitan dotar de recursos a la cadena de valor, se estima que para el mediano y largo plazo, el volumen de residuos sólidos urbanos a gestionar por coprocesamiento debería estar en el rango de 500,000 a 2,000,000 toneladas anuales. El potencial teórico de 3,100,000 toneladas anuales solamente se considera factible en el largo plazo, una vez que las condiciones regulatorias y de desarrollo alcancen los niveles que existen, por ejemplo, en los países europeos.

En el caso de las llantas usadas, el potencial teórico para el coprocesamiento en México alcanza los 1,1 millones de toneladas anuales, siendo necesario invertir en equipos e instalaciones destinadas a preprocesar estos materiales. Los costos logísticos también tendrán un papel fundamental en la materialización de este potencial o parte de él.

Respecto al coprocesamiento de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales, se ha estimado un potencial teórico máximo de 3,5 millones de toneladas anuales, basado principalmente en aspectos de calidad del clínker y el cemento.

En los tres casos (RSU, llantas y lodos de las PTAR), la realización del potencial de coprocesamiento, o al menos su maximización, requerirá del cumplimiento de una serie de factores, algunos de ellos externos a la realidad de la industria cementera, otros de carácter técnico y logístico, y también de asuntos regulatorios.

Dentro de las externalidades que determinan el potencial de aprovechamiento energético de residuos a través de coprocesamiento, la principal corresponde al costo de los combustibles fósiles tradicionales (coque de petróleo, carbón), que determinará el potencial ahorro por la utilización de combustibles alternativos.

Aspectos técnicos y logísticos corresponden principalmente a la optimización de inversiones y costos operacionales para el adecuado pretratamiento y posterior coprocesamiento de los desechos, siempre bajo criterios de cumplimiento de estándares ambientales y de seguridad. La optimización logística será también fundamental, considerando la ubicación de las plantas cementeras.

Por último, los aspectos regulatorios, que principalmente se refieren a la modernización en la gestión de residuos, corresponden a un aspecto clave en el desarrollo y consolidación de tecnologías como el coprocesamiento. La sostenibilidad de esta actividad dependerá en gran medida de la definición de responsabilidades en la cadena de valor de los residuos, que permita inyectar los recursos necesarios para una adecuada gestión. En este sentido, la aplicación de principios como "el que contamina paga", o herramientas de gestión como la REP, parecen ser necesidades básicas para el desarrollo sostenible de una actividad como el coprocesamiento en hornos cementeros.

Es importante destacar que este estudio contiene estimaciones de potenciales teóricos que, si bien proporcionan una idea general del posible uso de residuos en el coprocesamiento, no son suficientes para el desarrollo de políticas específicas. Para diseñar una política funcional se requerirá contar con potenciales reales basados en proyectos concretos y más aún para aumentar el éxito del coprocesamiento es indispensable identificar la factibilidad técnica, económica, ambiental y social del coprocesamiento en México para distintas plantas y distintas empresas. Es por lo anterior que la interacción con la industria es fundamental.

8.2. Recomendaciones

- Trabajar con la autoridad ambiental mexicana en la revisión, actualización y desarrollo de marcos regulatorios que permitan generar incentivos para una gestión que favorezca la jerarquía de los residuos. En este sentido, parece atractivo incluir conceptos de promoción para la valorización en los procesos de revisión de la normativa general de gestión de residuos.
- Desarrollar un programa de construcción de capacidades en el nivel legislativo, autoridad ambiental nacional y autoridades estatales y municipales, para un común entendimiento de la tecnología del coprocesamiento, sus virtudes, riesgos y potencial.
- Revisar la normativa legal sobre coprocesamiento en hornos cementeros, tomando como referencia los lineamientos del Convenio de Basilea.
- Formalizar una mesa de trabajo público-privada junto con la industria del cemento, para el trabajo en torno a la actualización de la legislación relativa a coprocesamiento en particular y a gestión de residuos en general.
- Monitorear iniciativas privadas en torno al coprocesamiento de RSU, como el proyecto FIRSU de Cemex y la iniciativa piloto de Holcim en su planta de Hermosillo, promoviendo instancias de socialización de sus resultados.
- Monitorear desarrollos tecnológicos en la industria cementera que impliquen mayores oportunidades para el coprocesamiento, como la conversión de hornos antiguos a hornos BAT con precalcinadores o la inversión en equipamiento específico de coprocesamiento como Hot Disk, que permiten al aumento de las tasas de coprocesamiento en forma relevante.
- Promover nuevas iniciativas de proyectos piloto, involucrando a la industria y autoridades locales:
    - Selección, pretratamiento y coprocesamiento de RSU
    - Campañas de recolección y coprocesamiento de llantas usadas en conjunto con municipios
    - Secado y coprocesamiento de lodos de las PTAR
- Buscar sinergias con otros sectores empresariales involucrados, como por ejemplo la industria de la gestión de residuos (agrupados en AMEXA por ejemplo).
- Mantener identificadas e informadas a las partes interesadas relevantes (comunidades, academia, ONG, etcétera).

REFERENCIAS GENERALES

Archivos estadísticas Holcim, 2010-2013.

Berkeley National Laboratory (2012), *International Best Practices for Pre-Processing and Co-Processing Municipal Solid Waste and Sewage Sludge in the Cement Industry*.

Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública Cámara de Diputados (2012), *REPORTE CESOP Residuos Sólidos Urbanos en México*.

Convenio de Basilea (2011), *Directrices Técnicas para el coprocesamiento Racional de Residuos Peligrosos en Hornos Cementeros*.

CSI (2014), *Guidelines for Co-Processing Fuels and Raw Materials in Cement Manufacturing*.

GTZ-Holcim (2006), *Guías para el Co-procesamiento de Residuos en la Industria del Cemento*.

SEMARNAT (2015), P*olítica y estrategias para la prevención y gestión integral de los residuos en México*.

SEMARNAT (2012), *Estadísticas ambientales*.

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

– Cooperación Alemana al Desarrollo –

Friedrich-Ebert-Allee 36 + 40
53113 Bonn, Deutschland
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
I www.giz.de

Agencia de la GIZ en México: Torre Hemicor, PH
Av. Insurgentes Sur No. 826
Col. Del Valle, CP 03100
Ciudad de México, México
T +52 55 5536 2344
F +52 55 5536 2344
E giz-mexiko@giz.de
I www.giz.de/mexico