















# Proyectos de Aprovechamiento Energético a partir de Residuos Urbanos en México

Plantas de Producción de Energía en Hornos Cementeros, Biodigestores, Rellenos Sanitarios y Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales



Programa Aprovechamiento Energético de Residuos Urbanos en México













Programa Aprovechamiento Energético de Residuos Urbanos: Av. Insurgentes Sur 813, oficina 1301

gético de Residuos Urbanos: Col. Nápoles, CP 03810 Ciudad de México, México

Ejecutado por: GIZ México

Dirección General de Fomento Ambiental, Urbano y Turístico

SEMARNAT

Dirección General de Energías Limpias

SENER

Por encargo de: Ministerio Federal de Cooperación Económica

y Desarrollo (BMZ) de Alemania

Autores: Equipo técnico EnRes

Diseño y coordinación editorial: Leticia Llamas De la Torre, México

Fotografías: Portada (de izquierda a derecha y de arriba a abajo)

Biodigestor Atlacomulco GIZ 2015 FIRSU Ciudad de México GIZ 2015

Residuos orgánicos Shutterstock Ulrich Mueller Aguas residuales Shutterstock Roibu

Aguas residuales Shuttersto
Coprocesamiento Holcim
PTAR Atotonilco GIZ 2018
Relleno Sanitario Nuevo León GIZ 2018

Contraportada (de izquierda a derecha y de arriba a abajo)

Pepenador Naucalpan GIZ 2018

Separación de FIRSU Shutterstock Deyana Stefanova

Biodigestor Milpa Alta GIZ 2017 Camión de residuos Naucalpan GIZ 2018

Fecha de publicación: Septiembre, 2018

Las opiniones expresadas en este documento no necesariamente representan la opinión de SEMARNAT, SENER 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.

## Proyectos de Aprovechamiento Energético a partir de Residuos Urbanos en México

Plantas de Producción de Energía en Hornos Cementeros, Biodigestores, Rellenos Sanitarios y Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales

## **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 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).

Este documento es una compilación de información general sobre proyectos en México que involucran la generación de energía a partir de residuos, a través de diferentes tecnologías como el coprocesamiento en la industria del cemento, la biodigestión anaeróbica de residuos sólidos urbanos y de lodos de PTAR, y el aprovechamiento del CH<sub>4</sub> en rellenos sanitarios.

La información de las plantas que realizan estos procesos se presenta en formato de fichas técnicas con los siguientes datos resumidos: descripción del proyecto; ubicación; potencial de aprovechamiento energético; aspectos financieros y cifras sobre la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero.

# CONTENIDO

SIG	GLAS Y SÍMBOLOS	5
INT	TRODUCCIÓN	7
1.	COPROCESAMIENTO EN HORNOS CEMENTEROS	15
	Breve descripción de la tecnología de coprocesamiento	15
	Coprocesamiento en la industria del cemento en México	
	richas técnicas de Hornos Cementeros con sistemas de coprocesamiento:	
	HORNOS CEMEX FRACCIÓN INORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (FIRSU)	
	HORNOS HOLCIM RESIDUOS PELIGROSOS Y DE MANEJO ESPECIAL	
2.	BIODIGESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS	23
	Tecnología en breve	23
	Biogás	
	Sistema de biodigestión	
	Biodigestión húmeda continua	
	Biodigestión seca continua	
	Biodigestión seca en lote	
	Contexto en México	29
	Fichas técnicas de Biodigestores de RSU: BIODIGESTOR DE RSU EN ATLACOMULCO ESTADO DE MÉXICO	30
	BIODIGESTOR DE RSU EN MÉRIDA YUCATÁN	31
	BIODIGESTOR DE RSU EN MILPA ALTA CIUDAD DE MÉXICO	32
3.	EXTRACCIÓN DE BIOGÁS DE RELLENOS SANITARIOS	35
	Tecnología en breve	35
	Contexto en México	36
	Fichas técnicas de Rellenos Sanitarios con extracción de biogás:	
	RELLENO SANITARIO SALINAS VICTORIA NUEVO LEÓN	
	RELLENO SANITARIO CIUDAD JUÁREZ CHIHUAHUARELLENO SANITARIO SAN NICOLÁS AGUASCALIENTES	
	RELLENO SANITARIO DURANGO DURANGO	41
	RELLENO SANITARIO PUERTO DE CHIVOS ESTADO DE MÉXICO	
	RELLENO SANITARIO LA PERSEVERANCIA MORELOSRELLENO SANITARIO DE SALTILLO COAHUILA	
	RELLENO SANITARIO MOMPANÍ QUERÉTARO	45
4.	BIODIGESTIÓN ANAERÓBICA DE LODOS PROVENIENTES DE LAS PTAR	49
	Tecnología en breve	49
	Tratamiento de aguas residuales en México	50
	Fichas técnicas de las PTAR con biodigestión anaeróbica:	
	PTAR AGUA PRIETA JALISCO	
	PTAR NORTE NUEVO LEÓN	
	PTAR LEÓN GUANAJUATO	
	PTAR EL AHOGADO JALISCO	
	PTAR SAN PEDRO MÁRTIR QUERÉTAROPTAR PRINCIPAL COAHUILA	
	PTAR ATOTONILCO HIDALGO	
	PTAR HERMOSILLO sonora	
	PTAR VILLA DE ÁLVAREZ COLIMAPTAR LA PURÍSIMA GUANAJUATOPTAR LA PURÍSIMA GUANAJUATO	
001	NOLLISIONES	75

## GRAFICOS

GRÁFICO	) 1	Flujo y disposición final de los residuos en México durante el año 2012	8
GRÁFICO	2	Manejo y aprovechamiento de RSU en la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) en la Unión Europea y en México	q
GRÁFICO	1 3	Contribución de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) a la energía renovable en México (2015) en TWh.	
GRÁFICO	_	Capacidad instalada y generación bruta a partir de Biogás, 2004-2016	
GRÁFICO		Puntos de alimentación de combustible alterno en horno cementero BAT.	
GRÁFICO	_	Tipos de combustibles empleados en la industria cementera en México durante el año 2011.	
GRÁFICO	_	Contribución a las emisiones de GEI del sector industrial y uso de productos por subsectores en 2015	
GRÁFICO		Etapas de la biodigestión anaeróbica.	
GRÁFICO	_	Usos del biogás	
GRÁFICO		Rendimiento energético de posibles sustratos	
GRÁFICO	) 11	Sistema de aprovechamiento de biogás.	
GRÁFICO	12	Tecnologías de biodigestión húmeda continua	
GRÁFICO	13	Tecnología de biodigestión seca continua	
GRÁFICO	14	Tecnología de biodigestión seca	
GRÁFICO	15	Esquema principal para la generación de energía eléctrica mediante biogás obtenido de un relleno sanitario	
GRÁFICO	16		
GRÁFICO	17	Esquema del tratamiento de aguas residuales en una PTAR con proceso de lodos activados	
		Sistema de cogeneración	
GRÁFICO	19	Distribución en México de las PTAR con biodigestión anaeróbica de lodos residuales y potencial para generación de energía	51
GRÁFICO	20	Esquema de Tratamiento de la PTAR Agua Prieta	53
GRÁFICO	21	Esquema de Tratamiento de la PTAR Dulces Nombres	55
GRÁFICO	22	Esquema de Tratamiento de la PTAR Norte	57
GRÁFICO	23	Esquema de Tratamiento de la PTAR León.	59
GRÁFICO	24	Esquema de Tratamiento de la PTAR El Ahogado	61
GRÁFICO	25	Esquema de Tratamiento de la PTAR San Pedro Mártir	63
GRÁFICO	26	Esquema de tratamiento de la PTAR Principal	65
GRÁFICO	27	Esquema de Tratamiento de la PTAR Atotonilco.	67
GRÁFICO	28	Esquema de Tratamiento de la PTAR Hermosillo	69
GRÁFICO	29	Esquema de tratamiento de la PTAR Villa de Álvarez.	71
GRÁFICO	30	Esquema de Tratamiento de la PTAR La Purísima	73
TABLA	AS		
TABLA	1	Emisiones GEI del sector residuos en México durante 2015.	
TABLA	2	Clasificación de medidas para la mitigación de GEI	11
ΤΔΒΙΔ	3	Resumen Rellanos Sanitarios	46

# SIGLAS Y SÍMBOLOS

AUT	Autoabastecimiento (modalidad de permiso CRE)
BANOBRAS	Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos
BDAN	Banco de Desarrollo de América del Norte
BENLESA	Bioenergía de Nuevo León, S.A. de C.V.
DB0	Demanda bioquímica de oxígeno
DBO <sub>5</sub>	Demanda bioquímica de oxígeno (transcurridos cinco días de reacción)
CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de calcio
CANACEM	Cámara Nacional de Cemento
Ca0	Óxido de calcio
CDR	Combustibles Derivados de Residuos
CEA	Comisión Estatal del Agua
CEMBUREAU	Asociación Europea de Cemento (European Cement Association)
CEMEX	Cemex, S.A.B. de C.V.
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CH <sub>4</sub>	Metano
СНР	Cogeneración (Combined Heat and Power)
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CO <sub>2</sub> eq	Dióxido de carbono equivalente
COCEF	Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza
COG	Cogeneración (modalidad de permiso CRE)
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
COP21	Conferencia 21 de las partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (Conference of the Parties)
CRE	Comisión Reguladora de Energía
CSTR	Reactor continuamente agitado (Continuous Stirred Tank Reactor)
EnRes	Aprovechamiento energético de residuos urbanos
EPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (Environmental Protection Agency)
FIRCO	Fideicomiso de Riesgo Compartido
FIRSU	Fracción Inorgánica de los Residuos Sólidos Urbanos
FONADIN	Fondo Nacional de Infraestructura
FORSU	Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GEN	Generación (modalidad de permiso CRE)
Gg	Gigagramo
GIZ	Cooperación Alemana al Desarrollo
GWh/año	Gigavatio por año
GWP	Índice de potencial de calentamiento global (Global Warming Potential)
GyCEI	Gases y compuestos de efecto invernadero
ICMA	Asociación Internacional de Administración de Ciudades y Condados
IIE	Instituto de Investigaciones Eléctricas
IMTA	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
INERE	Inventario Nacional de Energías Renovables
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change)
ISASAL	Ideal Saneamiento de Saltillo, S.A. de C.V.
kt	Kilotón
kW	Kilovatio
kWh	Kilovatio por hora (mide la producción o consumo durante cierto tiempo)
l/s	Litros por segundo (caudal)
m³	Metro cúbico
MDL (CDM)	Mecanismo de Desarrollo Limpio, originalmente CDM (Clean Development Mechanism)
mg/l	Miligramos por litro (concentración)
MW	Megavatio (capacidad instalada)
Mt	Megatonelada
N <sub>2</sub> O	Óxido nitroso
Nm³	Metro cúbico normal
NAMA	Acciones Nacionalmente Apropiadas de Mitigación (Nationally Appropriate Mitigation Actions)
NOM	Norma Oficial Mexicana
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
PM2.5	Partículas menores a 2.5 micras
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
PP	Pequeña Producción (modalidad de permiso CRE)
PPGIR	Programa para la Prevención y Gestión Integral de Residuos
PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
SAPAL	Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de León
SECITI	Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México
SEDESOL	Secretaría de Desarrollo Social
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SENER	Secretaría de Energía
SIMEPRODE	Sistema Integral para el Manejo Ecológico y Procesamiento de Desechos del Estado de Nuevo León
SST	Sólidos suspendidos totales
t	Tonelada
t/día	Tonelada al día
TBC	Tren de tratamiento biológico convencional
tCO <sub>2</sub> eq	Tonelada de dióxido de carbono equivalente
TFQ	Tren de tratamiento físico-químico
TMQ	Tecnología del Medio Ambiente de Querétaro
UAEM	Universidad Autónoma del Estado de México
UASB	Reactor anaerobio de flujo ascendente ( <i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i> )
UANL	Universidad Autónoma de Nuevo León
UE	Unión Europea
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
ZMVM	Zona Metropolitana del Valle de México

El manejo de residuos representa un reto para la sostenibilidad de México, incluso se ha expuesto que se ubica en el séptimo lugar de los países de la región de América Latina y el Caribe en generar más residuos sólidos urbanos (RSU) per cápita [110].

En México se generan diariamente 102,895 toneladas de residuos, de los cuales se recolecta el 83.93% y se disponen en sitios de disposición final el 78.54%, reciclando únicamente el 9.63% de los residuos generados [137].

En el país, sigue predominando el manejo básico de los RSU que consiste en recolectar y disponer los residuos en rellenos sanitarios, desaprovechando aquellos que son susceptibles a reincorporarse al sistema productivo, lo que disminuiría la demanda y explotación de nuevos recursos; a diferencia de países como Suiza, Países Bajos, Alemania, Bélgica, Suecia, Austria y Dinamarca, donde la disposición final de los residuos es de menos del 5% en rellenos sanitarios [137].

El artículo 10 de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos establece que los municipios tienen a su cargo las funciones de manejo integral de residuos sólidos urbanos (recolección, traslado, tratamiento, y su disposición final). La realidad de los municipios es que se enfrentan a diversas circunstancias que en muchos casos se escapan de sus capacidades técnicas y financieras, debido a las dificultades para contar con personal capacitado, para adquirir o comprometer recursos financieros que den certeza a las inversiones del sector privado, o por el corto tiempo que duran las administraciones municipales, lo que conlleva a la ruptura de la curva de aprendizaje y, por ende, a una falta de continuidad en las acciones y proyectos que garanticen una gestión integral de los residuos sólidos urbanos [137].

En México, la regulación nacional en materia de residuos establece tres tipos:

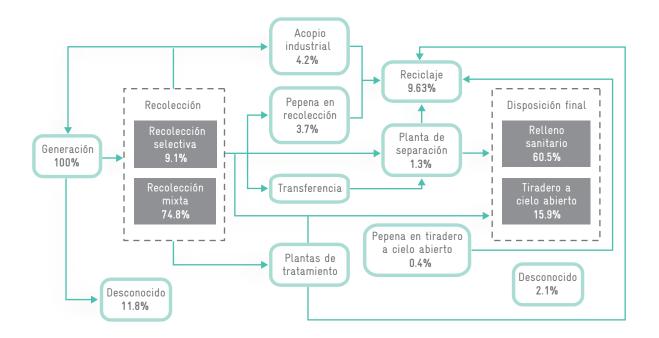
- Residuos urbanos (de competencia municipal).
- Residuos de manejo especial (de competencia estatal).
- Residuos peligrosos (de competencia federal).

También precisa que los municipios poseen la facultad de prestar el servicio público para el tratamiento y disposición de sus aguas residuales [101].

Es importante destacar la nula o baja efectividad de la aplicación de políticas públicas encaminadas a ejecutar un sistema de recolección selectiva que favorezca la gestión de residuos y su valorización. Más de un 75% de los residuos terminan en rellenos sanitarios y tiraderos a cielo abierto, incluyendo el desecho no regulado de residuos peligrosos; toda esta situación es alarmante debido a la contaminación de agua, aire y suelo que acarrea, así como por el desarrollo de fauna nociva.

El GRÁFICO 1 da un panorama del flujo de los residuos en México y muestra las rutas que estos siguen desde su generación hasta su disposición final.

GRÁFICO 1 Flujo y disposición final de los residuos en México durante el año 2012.

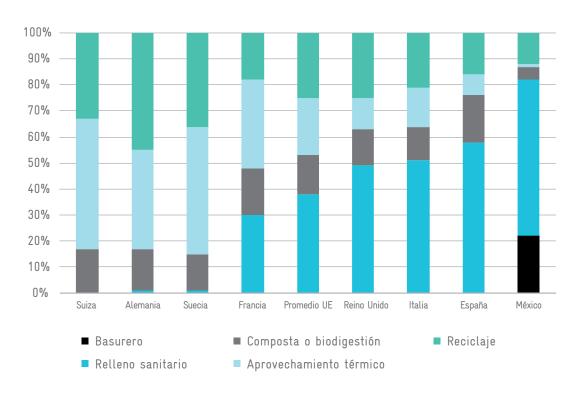


Fuente: [96].

Las aguas residuales se clasifican dentro del sector de residuos y es importante el potencial que tiene el producto derivado de su tratamiento en las PTAR, este producto es una materia orgánica de manejo especial denominada 'lodo', con alto contenido energético y susceptible de ser aprovechada; sin embargo, los datos arrojados en 2012 indicaron que el 75.2% de los residuos obtenidos fue enviado directamente a rellenos sanitarios para su disposición final, sin aprovechamiento o tratamiento alguno [96]. Otro dato que muestra la dimensión de esta situación indica que, durante 2015, las aguas residuales alcanzaron un volumen de 7.23 km³ y sólo el 53% recibió tratamiento en las PTAR [39].

A pesar de que numerosos países han conseguido alcanzar altas cifras en la generación de energía y reducir la disposición final de los residuos, México se sitúa distante de alcanzarlos. En el GRÁFICO 2 se aprecia un comparativo.

GRÁFICO 2 Manejo y aprovechamiento de RSU en la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) en la Unión Europea y en México.



Fuente: [136].

El sector de residuos es de gran relevancia dentro de la política nacional de cambio climático por sus emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero (GyCEI), tan solo en 2013 emitió 30,903 Gg de CO<sub>2</sub>eq, que representan un 4.6% del total de emisiones en el país [101]; en comparación al 2015, este sector emitió 45,909 Gg de CO<sub>2</sub>eq lo que representa un 7% del total de emisiones [98]. Para el caso del carbono negro, considerado un contaminante climático de vida corta proveniente de la quema incompleta de residuos, se estimó que el sector generó 204 kt [47].

Existe una amplia área de oportunidad en el tratamiento de residuos para la mitigación de los GEI, a través del aprovechamiento energético de los mismos. En la TABLA 1 se aprecia que el compuesto con mayor presencia en las emisiones de GEI es el CH<sub>4</sub>, este gas es un subproducto de la descomposición de la materia orgánica en ausencia de oxígeno y puede ser usado como sustituto de combustible, similar al gas natural.

TABLA 1 Emisiones GEI del sector residuos en México durante 2015.

Subcategoría del sector residuos	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	Total
4A Eliminación de residuos sólidos	_	21,920.61	_	21,920.61
4A1 Sitios gestionados de eliminación de residuos (rellenos sanitarios)	-	17,007.47	-	17,007.47
4A2 Sitios no controlados de eliminación de residuos	_	2,456.29	_	2,456.29
4A3 Tiraderos a cielo abierto para eliminación de residuos	-	2,456.85	_	2,456.85
4B Tratamiento biológico de los residuos sólidos	-	116.69	82.83	199.51
4C Incineración y quema a cielo abierto de residuos	730.23	620.42	136.51	1,487.15
4C1 Incineración de residuos peligrosos industriales y biológico infecciosos	23.72	0.11	1.03	24.85
4C2 Quema a cielo abierto de residuos sólidos	706.51	620.31	135.48	1,462.30
4D Tratamiento y eliminación de aguas residuales	-	20,435.51	1,866.23	22,301.74
4D1 Tratamiento y eliminación de aguas residuales municipales	-	3,726.20	1,866.23	5,592.44
4D2 Tratamiento y eliminación de aguas residuales industriales	_	16,709.30	_	16,709.30
Total Emisiones Netas (Gg de CO <sub>2</sub> eq)	730.23	43,093.22	2,085.57	45,909.01

Fuente: [100].

Referente a los contaminantes climáticos de vida corta, en el caso específico del carbono negro, se estimó para el año 2015 una generación de 1.155 Gg [100]. La Ley General de Cambio Climático tiene como meta para el año 2018, que todos los centros urbanos con más de 50 mil habitantes no emitan a la atmósfera CH<sub>4</sub> proveniente de los RSU, para esto deben desarrollar infraestructura necesaria en coordinación con la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), las entidades federativas y con las instancias administrativas y financieras competentes; y de ser viable, se deben implementar tecnologías para la generación de energía eléctrica a partir de las emisiones de CH<sub>4</sub> [108].

En 2015, dentro de la COP21, México asumió de manera voluntaria reducir en 22% sus emisiones de GEI para el año 2030, tomando como línea base las emisiones de 2013.

En el sector de residuos se prevé un escenario de mitigación del 28.6% para el año 2030, a través de medidas condicionadas (con recursos propios) y no condicionadas (con apoyo internacional), como se describen en la **TABLA 2**.

TABLA 2 Clasificación de medidas para la mitigación de GEI.

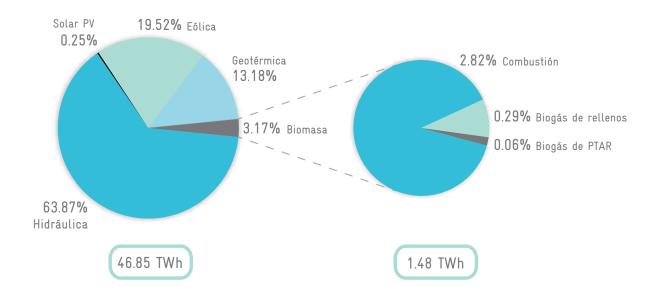
Medidas no condicionadas	Medidas condicionadas
Cero emisiones de metano en los rellenos sanitarios	Captura de biogás y generación de energía eléctrica en ciudades con población mayor a 50,000 habitantes
Cero quemas de residuos a cielo abierto	Aumento de la eficiencia y aprovechamiento de metano en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales municipales

Fuente: [75].

Por otro lado, la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética, tiene como meta respecto al ámbito energético, que para el año 2024 se reduzca al 65% la generación eléctrica a partir de fuentes fósiles, al 60% en el año 2035 y al 50% en el año 2050, esto con el propósito de aumentar cada vez más la generación a partir de energías limpias.

Si se considera la combustión, el biogás proveniente de los rellenos sanitarios y el biogás de las PTAR, la generación de energía eléctrica a partir de biomasa es muy baja en comparación con otras energías renovables, esto se percibe en el **GRÁFICO 3**.

GRÁFICO 3 Contribución de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) a la energía renovable en México (2015) en TWh.



Fuente: [140].

En 2015, se generaron 204 GWh/año de electricidad a partir del biogás proveniente de siete rellenos sanitarios y algunas PTAR; sin embargo, existe un potencial estimado para generar hasta 8400 GWh/año usando biogás producido mediante 20 millones de toneladas anuales de residuos orgánicos municipales [76]. En el **GRÁFICO 4** se observa el progreso de la generación eléctrica la capacidad instalada durante el período comprendido entre 2004 y 2016.

MW GWh N Capacidad Instalada MW Generación GWh -O-

GRÁFICO 4 Capacidad instalada y generación bruta a partir de Biogás, 2004-2016.

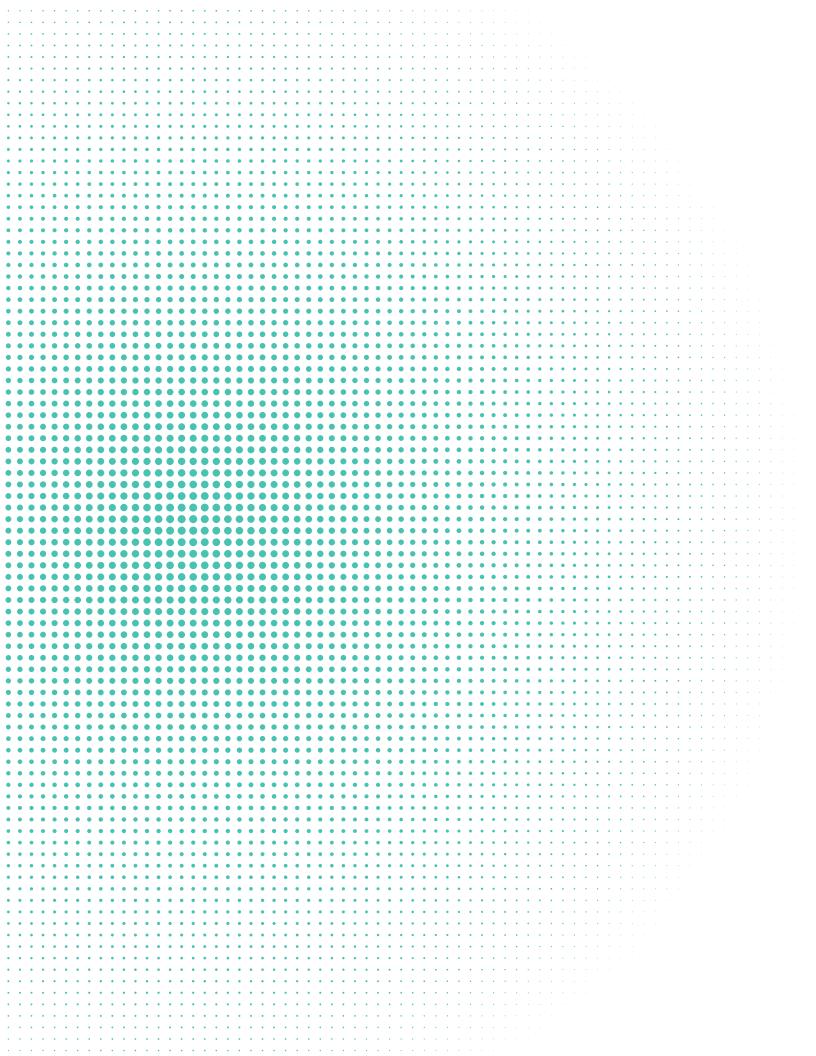
Fuente: [141].

El objetivo fundamental de este documento es brindar información general sobre proyectos en México que involucran la generación de energía a partir de residuos, considerando los siguientes temas:

- Descripción general de la tecnología de coprocesamiento en la industria del cemento, y proyectos cementeros que alimentan sus hornos aprovechando materiales de desecho y residuos urbanos como combustible alternativo al carbón o fósiles.
- Proyectos de biodigestión anaeróbica.
- Proyectos de PTAR autorizadas por la CRE para generar electricidad, y otros proyectos de PTAR que tienen aprovechamiento de energía térmica especificando el tipo de tratamiento de agua y de lodos que emplean.
- Principales rellenos sanitarios que aprovechan el CH<sub>4</sub> para generar electricidad.
- Conclusión con aspectos que sería importante abordar en futuros estudios institucionales concernientes al tema objeto de esta publicación.

Los proyectos se presentan en formato de ficha técnica con información resumida que contiene: descripción del proyecto; ubicación; potencial de aprovechamiento energético; aspectos financieros y datos sobre la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero.

La información recopilada tiene sustento en fuentes de carácter público y, en algunos casos, ha sido verificada por representantes de las empresas correspondientes, visitas en campo, autoridades locales o autoridades operadoras de los rellenos sanitarios o de las PTAR.



## Breve descripción de la tecnología de coprocesamiento

El Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente, a través del Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos, describe así el coprocesamiento: "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." También, durante la Conferencia de las Partes, fueron implementadas las directrices técnicas del coprocesamiento [121].

El principal componente del cemento es el clínker, que se produce a partir de piedra caliza y arcilla molidas y homogenizadas en la cocción a 1450 °C dentro un horno rotatorio. Este proceso es el más significativo en términos de impacto ambiental debido a que genera cuantiosas emisiones de CO<sub>2</sub> por las altas temperaturas que deben alcanzar los hornos y que tradicionalmente se obtienen usando combustibles fósiles. También tiene importancia ambiental la conversión química del carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) en óxido de calcio (CaO) como producto y principal componente del clínker [73].

Dentro de los hornos cementeros se pueden coprocesar una diversidad de residuos con alto potencial calorífico, tanto urbanos como peligrosos, entre ellos: plásticos, aceites, textiles, llantas, lodos industriales o lodos de PTAR. Quedan fuera de consideración residuos hospitalarios o que contengan asbesto, así como baterías, electrónicos o ácidos [121]. Este proceso de coprocesamiento se debe llevar a cabo en hornos cementeros de Mejores Tecnologías Disponibles, llamados BAT por sus siglas en inglés (*Best Available Techniques*) **GRÁFICO 5**.

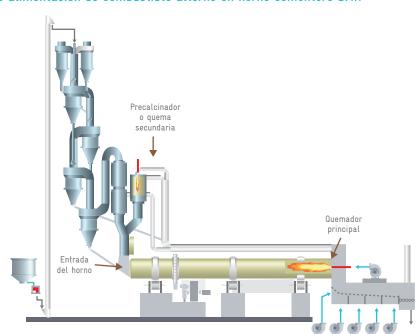


GRÁFICO 5 Puntos de alimentación de combustible alterno en horno cementero BAT.

Fuente: adaptado de [104].

El coprocesamiento no sólo permite la recuperación energética de los residuos, también reduce el impacto ambiental y es una alternativa para la gestión de los mismos.

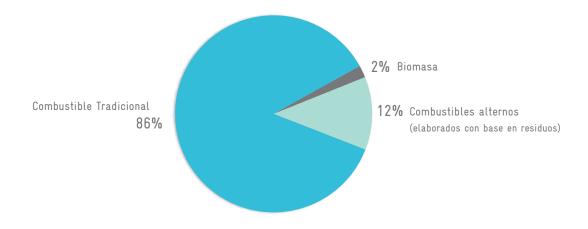
En el año 2009, la Asociación Europea de Cemento (European Cement Association) planteó las ventajas del coprocesamiento a alta temperatura, consistentes en:

- Destruir completamente los compuestos orgánicos.
- Neutralizar el total de los gases ácidos (óxidos de azufre y cloruro de hidrógeno).
- Anular la generación de subproductos o residuos, como cenizas o líquidos de depuración de gases, gracias a la integración de las trazas de metales pesados en la estructura del clínker.
- Evitar la necesidad de invertir en incineradores nuevos o en un sitio de disposición final seguro. [25]

Por otro lado, la Unión Europea cuenta con las tasas más altas de sustitución de combustibles fósiles, destacando el rol de líder de la industria cementera alemana, que alcanza tasas de sustitución de hasta 64% comparado con el 33% de la media de la Unión Europea. En contraste, en México en el año 2011, los combustibles alternos elaborados con base en residuos alcanzaron un 12% y la biomasa un 1.6%, mientras que los combustibles tradicionales fueron el sustrato mayoritario en hornos cementeros con un 86% [104].

En contraste, el **GRÁFICO 6** muestra la tasa de sustitución de combustibles fósiles en la industria del cemento en México durante el año 2011, quedando claro que aún queda un largo camino por recorrer en comparación con la Unión Europea.

GRÁFICO 6 Tipos de combustibles empleados en la industria cementera en México durante el año 2011.



Fuente: [104].

## Coprocesamiento en la industria del cemento en México

Según datos de 2014, después de Brasil, México es el segundo mercado de cemento más grande de América Latina, consume aproximadamente 36 millones de toneladas anuales de cemento. Las compañías más importantes son: Cemex, Cruz Azul, Moctezuma, Cementos de Chihuahua, y Holcim-Lafarge. Cemex controla alrededor del 50% del mercado y junto con Holcim y Cruz Azul registran el 70% de la oferta [146].

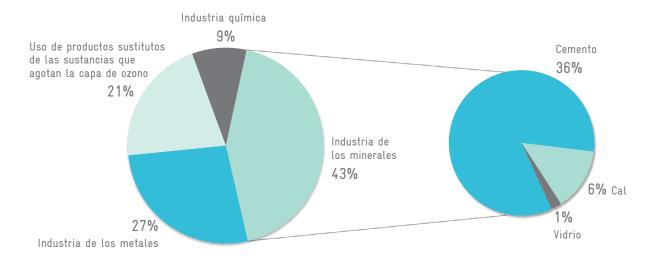
La industria cementera mexicana presenta niveles de coprocesamiento del 12% en términos de sustitución térmica promedio, y fue pionera en América Latina empleando como fuente alternativa de combustible, productos industriales como aceites y solventes usados o incluso llantas de desecho [104].

Si se considera que en México se generan alrededor de 42 millones de toneladas anuales de RSU, existe un potencial de reemplazo de energía térmica en la industria del cemento hasta del 30%, es decir, el aprovechamiento de 3.1 millones de toneladas anuales de RSU, equivalente al 8.2% del total de este tipo de residuos generados en el país. A su vez, los lodos de las PTAR aún son una opción por explorar, tanto como otras fuentes atractivas: descartes industriales, lodos de petróleo y biomasa con alto contenido energético (por ejemplo, papel, cartón o madera); sin embargo, para llegar a su uso hay una serie de desafíos regulatorios que se deben abordar, como la inclusión de la cadena de valor en la gestión de residuos, la promoción de un sistema de economía circular, la responsabilidad extendida del productor, entre otros desafíos de políticas públicas [104].

En 2013, dentro de la circunscripción de cambio climático, las emisiones de GEI de la industria cementera mexicana correspondieron al 26.3% de todo el sector industrial, esto supone, en términos absolutos, casi 9.7 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>eq por consumo de combustibles fósiles y 20.5 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>eq por procesos industriales [97]. Si se aplicara el potencial teórico de reemplazo de energía térmica por RSU, se asociaría a una reducción de 3.2 millones de toneladas anuales de CO<sub>2</sub>eq, así como a una serie de beneficios paralelos, dentro de los que se incluye una gestión de residuos más sostenible [104].

La industria cementera contribuye con el 3% de las emisiones de partículas menores a 2.5 micras (PM2.5) correspondientes a carbono negro [99], al ser este un contaminante atmosférico y un forzador climático de vida corta, cualquier acción que permita reducir su generación tendrá un impacto considerable en la mejora de la calidad del aire y de la salud pública, así como beneficios para la mitigación del cambio climático. El **GRÁFICO 7** muestra el porcentaje de emisores de GEI del sector industrial, en el que destacan las industrias de cemento y metales como las de más alta contribución.

GRÁFICO 7 Contribución a las emisiones de GEI del sector industrial y uso de productos por subsectores en 2015.



Fuente: [98].

A través de las Acciones Nacionalmente Apropiadas de Mitigación, también llamadas NAMA por sus siglas en inglés (*Nationally Appropriate Mitigation Actions*), se presentó un instrumento para la disminución de las emisiones de GEI en el sector industrial, en el que se plantea la sustitución de combustibles primarios por combustibles alternos, con base en el coprocesamiento de RSU. Esta iniciativa fue impulsada por la Cámara Nacional del Cemento (CANACEM) y presupone para el año 2020 un incremento potencial del 8% de RSU, residuos líquidos industriales y llantas de desecho utilizados como combustible alterno para sus hornos, (calculando 5% de uso de residuos urbanos y 3% de uso de llantas). Para 2030, la industria buscará aumentar el uso de estos materiales en 21% [104].

# HORNOS CEMEX FRACCIÓN INORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (FIRSU)



Atotonilco, Hidalgo Barrientos, Ciudad de México Ensenada, Baja California

Guadalajara, Jalisco Huichapan, Hidalgo

Mérida, Yucatán Monterrey, Nuevo León Tepeaca, Puebla Yaqui, Sonora Zapotiltic, Jalisco

#### Coprocesamiento de la FIRSU

Desde 2012, Cemex ha impulsado el coprocesamiento de la FIRSU a través de un proyecto que se basa en la separación de materiales procesables, extraídos de los rellenos sanitarios, o previo a su arribo a estos, así como su acondicionamiento y transporte para la alimentación de los hornos cementeros [27].

#### Descripción de la FIRSU

La FIRSU es un combustible verde y su nombre proviene de las siglas de Fracción Inorgánica del RSU. Es lo que resta del RSU una vez que se separan los materiales valorizables, por ejemplo, latas de aluminio, botes de PET, metales o vidrio, así como la fracción orgánica y otros residuos como pilas, piezas metálicas o aparatos electrónicos, etcétera.

#### **Insumos**

La FIRSU está compuesta principalmente por pedacerías de papel, cartón, plástico, hule, textiles naturales o sintéticos, incluso por restos de madera o poda.

Porcentajes aproximados de la composición típica de la FIRSU [26]:

- 50% papel y cartón
- 32% plástico
- 10% textiles
- 8% madera



Muestras de residuos para análisis físicos y químicos. Fotografía: Agencia de Noticias Tecnológicas y Científicas TSS, www.unsam.edu.ar.

#### Tipo de tratamiento y tecnología

Cemex utiliza su propia tecnología en los rellenos sanitarios y centros de transferencia para separar de manera automática la FIRSU, ya sea en plantas fijas o en la denominada Planta FIRSU Móvil; posteriormente, este material se compacta para ser transportado hacia las plantas de cemento de la manera más eficiente desde un punto de vista ambiental y económico.

Tras análisis físicos, químicos y una preparación para convertirla en combustible alterno, la FIRSU es coprocesada en los hornos cementeros con temperaturas de flama que alcanzan los 2000°C, con enormes tiempos de residencia (mayores a 5 segundos), así como alta turbulencia y disponibilidad de oxígeno, que permiten un reciclaje energético de este material de la manera más eficiente y ambientalmente amigable, razón por la cual, este proceso ha sido reconocido como la mejor opción para el aprovechamiento de la FIRSU, acorde al Convenio de Basilea, a las metodologías del Protocolo de Kioto y a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, también conocida como UNFCCC por sus siglas en inglés (United Nations Framework Convention on Climate Change).

#### Aspectos financieros

Los proyectos de coprocesamiento de la FIRSU como combustible alterno cuentan con distintas estrategias y sinergias entre Cemex y distintas entidades privadas o de gobierno. Los proyectos se desarrollan con una filosofía ganar-ganar, mediante la cual hay reducción de emisiones en el proceso cementero y también en el relleno sanitario, logrando además ahorros por ambas partes; la cementera en lo relacionado al uso de combustibles tradicionales, y el relleno o el municipio por el manejo del mismo y por la disposición de residuos. Adicionalmente, se generan cadenas de valor a nivel local, creando empleos directos e indirectos relacionados al transporte y las distintas operaciones y procesos acordes a la generación, preparación, logística y consumo de la FIRSU.

En 2013, se procesaron 84 mil toneladas de FIRSU en 8 plantas de cemento [27].

En 2014, se duplicó el coprocesamiento de FIRSU en hornos cementeros de Cemex México respecto al año anterior.

En 2017, Cemex México coprocesó 217 mil toneladas de FIRSU en sus hornos cementeros.

#### Mitigación de GEI

La FIRSU cuenta con un factor de emisión menor al existente en los combustibles primarios fósiles típicamente utilizados en la producción de clínker y consecuentemente de cemento; por lo que su uso permite reducir las emisiones directas de  $CO_2$  en el proceso cementero.

Mediante cálculos que incluyen los algoritmos en la metodología *Avoidance of methane production from biomass decay through controlled combustion*, se estima que por cada tonelada de FIRSU alimentada, se mitigan 1.5 toneladas de  $CO_2$ eq, siendo que el 60% de dicho valor se logra al evitar la generación de metano en el relleno sanitario.

El coprocesamiento de la FIRSU realizado por Cemex México durante 2017, representó una mitigación de 325 mil toneladas de  $CO_2$ eq, lo que sería igual que sembrar casi un millón de árboles o evitar la circulación de 70 mil automóviles durante un año.

## HORNOS HOLCIM

#### RESIDUOS PELIGROSOS Y DE MANEJO ESPECIAL





Cada residuo se analiza individualmente. Fotografía: Pixabay.

La empresa Geocycle, filial de Holcim México, ofrece el manejo integral de una variedad muy amplia de residuos, así como su tratamiento y su coprocesamiento [93]. En 2015, Geocycle recicló 300 mil toneladas de residuos en México, para ser utilizados como combustible alterno en los hornos cementeros de Holcim México [14].

Las seis plantas cementeras de Holcim México cuentan con el certificado ISO 14001 y con el de Industria Limpia [13].

Durante el período comprendido entre 2002 y 2012, Holcim dejó de consumir más de 700 mil toneladas de combustibles fósiles tradicionales debido a su sustitución por combustibles alternos [92].

#### Insumos

Geocycle utiliza residuos de la industria automotriz, alimentaria, farmacéutica, cosmética, química, siderúrgica, petrolera, agrícola y de consumo. En un comunicado de prensa de 2016, representantes de Geocycle mostraron interés en iniciar el coprocesamiento de residuos sólidos de fábricas de café y jugos, así como de residuos orgánicos domiciliarios [14].

#### Tipo de tratamiento o tecnología

Para determinar el tipo de tecnología más adecuada, se toma una muestra de cada tipo de residuo que se desea coprocesar y tras las pruebas de laboratorio realizadas, se determina qué desechos no funcionan y cuáles son adecuados para el coprocesamiento y el tipo de tratamiento que requieren. Si el sustrato es líquido, se insufla al horno, si es sólido se tritura, se mezcla y se introduce al horno [90].

#### Aspectos financieros

En el año 2016, Holcim México sustituyó el 14% de sus combustibles fósiles por RSU para operar sus hornos cementeros [14], ahorrando con ello al no comprar combustibles tradicionales (coque de petróleo, combustóleo o gas).

## Mitigación de GEI

Holcim México ha enfocado sus esfuerzos en el uso de combustibles alternos y en la reducción de emisiones del clínker, logrando en 2012 disminuir sus emisiones en un 18% comparadas con las que producía en 1990, y ha alcanzado los menores índices de emisiones específicas de CO2 por tonelada de cemento producido en el mercado nacional [92].

## HORNOS COOPERATIVA LA CRUZ AZUL

## RESIDUOS PELIGROSOS, DE MANEJO ESPECIAL Y DOMICILIARIOS



Plantas Cooperativa La Cruz Azul

Ciudad Cooperativa Cruz Azul, Hidalgo Lagunas, Oaxaca Tepezalá, Aguascalientes Palmar de Bravo, Puebla



Las llantas se trituran para el coprocesamiento. Fotografía: Shutterstock

## Mitigación de GEI

Se emitieron 3'820,118 toneladas de CO2 en el año 2015 y hubo una disminución de 0.92% en los kilogramos de CO<sub>2</sub> por tonelada de cemento respecto al año anterior [46].

Con base en información de 2009, Cooperativa La Cruz Azul estableció con un programa de recolección de aceites lubricantes usados en diferentes entidades de la república mexicana, además de recolección de otro tipo de insumos, como llantas usadas y residuos peligrosos o de manejo especial [45].

Cooperativa La Cruz Azul ha establecido convenios con autoridades para fomentar el aprovechamiento energético de los residuos dentro del proceso de fabricación del cemento, en pro de mejorar la infraestructura de sus plantas y fomentar programas de aprovechamiento de residuos, a través de diversas acciones, por ejemplo, en cooperación con el estado de Morelos se contempla construir hasta ocho plantas de valorización de RSU y una de combustibles derivados de residuos (CDR) [105].

#### **Insumos**

En la Planta Hidalgo, durante el año 2016, se coprocesaron 4049 toneladas de llantas de desecho, 19,474 toneladas de residuos de manejo especial, 12,866 toneladas de residuos peligrosos, 1537 toneladas de combustible alterno líquido y 4805 toneladas de tierras contaminadas o lodos con hidrocarburos, lo que representó una sustitución de combustibles del 11%. Respecto al reporte del año 2015, hubo un decremento del 34.4% en el coprocesamiento, sin embargo, el porcentaje de sustitución de combustibles se mantuvo, lo cual indicó que hubo un mejor control de parámetros fisicoquímicos, infraestructura y lineamientos, que implicaron el aumento de la eficiencia de aprovechamiento energético [46].

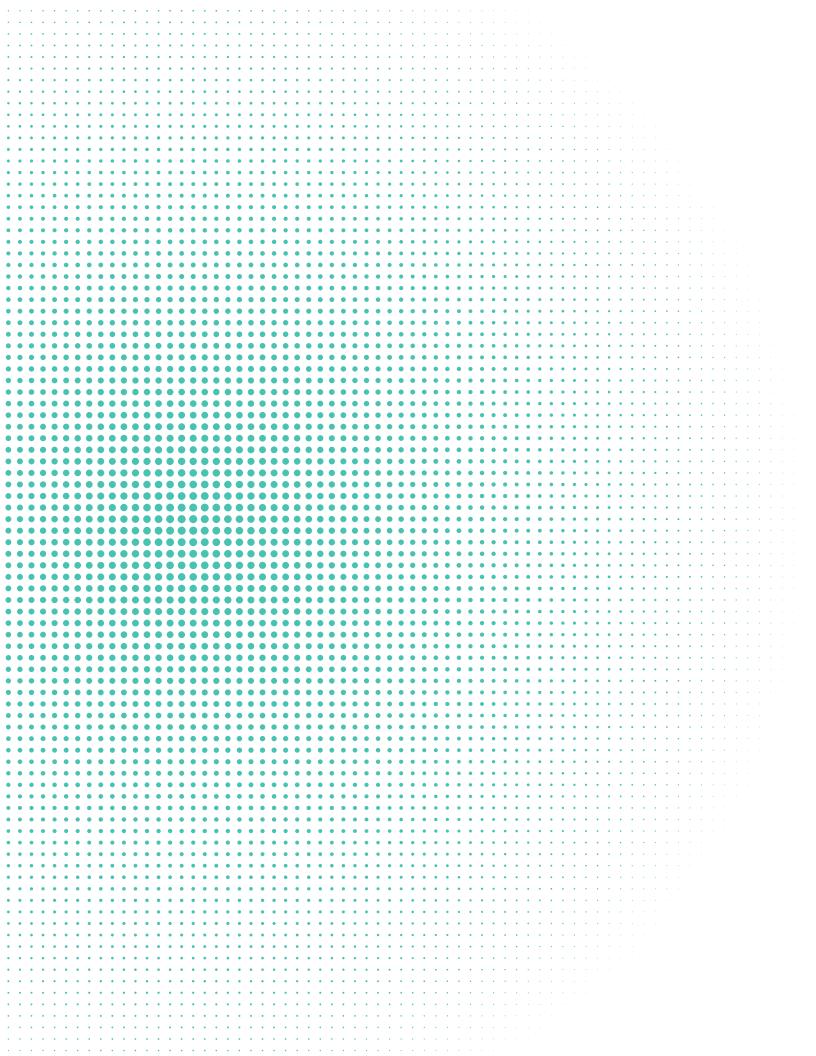
En la Planta Laguna, durante el año 2016, se coprocesaron 1549.85 toneladas de llantas usadas, 227.3 toneladas de tierras contaminadas y lodos aceitosos, 432.11 toneladas de RSU y 1954.4 toneladas de residuos peligrosos y de manejo especial, lo cual significó una sustitución de combustible de 2.60% en el Horno 4 y de 3.50% en el Horno 3 [46].

#### Tipo de tratamiento o tecnología

La Planta Cruz Azul Hidalgo cuenta con una cámara de combustión *Hot Disc* diseñada para la destrucción térmica, completa y segura de residuos peligrosos y no peligrosos, [149].

#### Aspectos financieros

En el año 2011, La Planta Cruz Azul Hidalgo realizó inversiones para la compra de una cámara de combustión Hot Disc, lo que significó una inversión de 14 millones de dólares, dicha acción se hizo con la visión de alcanzar un 30% de sustitución de combustibles convencionales fósiles [149].



## Tecnología en breve

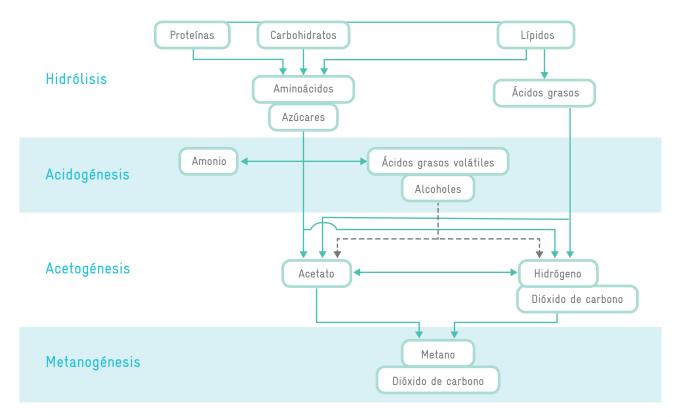
El proceso de la biodigestión anaeróbica consiste en la descomposición de materia orgánica (biomasa), por la actividad digestiva de ciertos microorganismos en ausencia de oxígeno, dicha materia orgánica se transforma en un gas con una concentración alta de CH<sub>4</sub> y en un lodo rico en nutrientes que puede ser utilizado como abono [48].

La biodigestión anaeróbica sigue cuatro etapas:

- Hidrólisis.
- Acidogénesis.
- Acetogénesis.
- Metanogénesis.

Durante las cuales se producen múltiples compuestos como alcoholes, ácidos y otros; sin embargo, el resultado final de dichas etapas son compuestos más sencillos estructuralmente, como el CH<sub>4</sub> o CO<sub>2</sub>, esto se aprecia en el **GRÁFICO 8**.

GRÁFICO 8 Etapas de la biodigestión anaeróbica.



Fuente: Elaboración propia.

#### Biogás

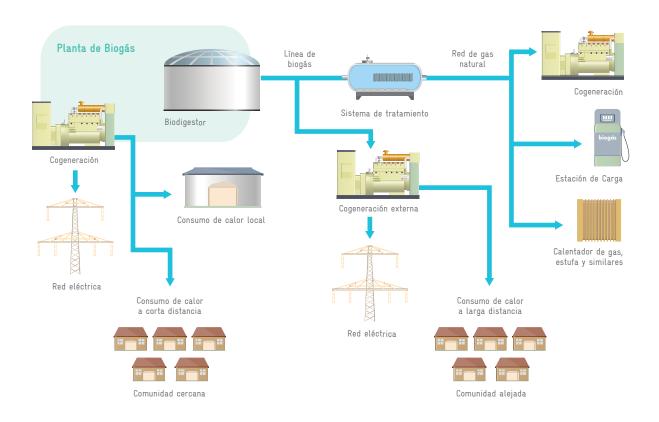
Es una mezcla de gases principalmente compuesta de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> y en menor medida de otros gases, como vapor de agua, sulfuro de hidrógeno, amoníaco y, en ciertos casos, siloxanos. Contiene entre 55 y 70% en volumen de CH4 y entre 30 y 45% de CO<sub>2</sub> en función del tipo de sustrato utilizado y de las condiciones de operación del biodigestor [61].

Un metro cúbico de biogás, tiene un contenido energético aproximado de entre 6 y 6.5 kWh, por lo que es una viable fuente energética [61].

Dependiendo del uso que se da al biogás, este requerirá cierto nivel de acondicionamiento, ya que puede ser empleado como sustituto de gas natural, combustible para generador termoeléctrico combinado, también llamado CHP por sus siglas en inglés (Combined Heat and Power) o para automóviles.

Después de las etapas de deshidratación y desulfuración, puede ser usado como combustible en una caldera para la producción de calor o en un sistema de cogeneración para la producción de electricidad y de calor, como se observa en el GRÁFICO 9. Otra forma es convertir al biogás a biometano, si el biogás es limpiado hasta llegar a ciertos estándares, puede ser inyectado a la red de gas [152].

GRÁFICO 9 Usos del biogás.

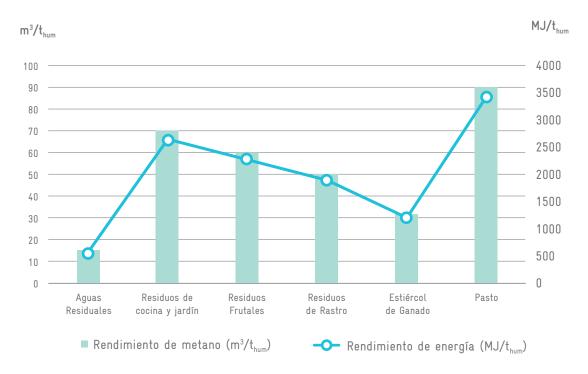


Fuente: adaptado de [144].

#### Sistema de biodigestión

El procedimiento general para la operación de un biodigestor consiste, en primer lugar, en aumentar su área de contacto con los microorganismos, esto se hace realizando una molienda del sustrato empleado, que pueden ser residuos de cocina y jardín, frutales, de rastro, estiércol o similares, cuyos rendimientos de energía y producción de CH<sub>4</sub> se muestran en el **GRÁFICO 10**.



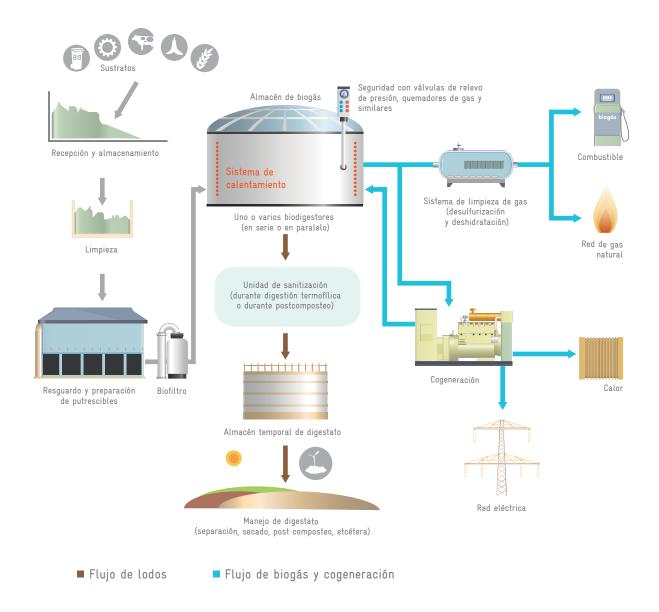


Fuente: [112].

Como segunda fase, se agrega el sustrato molido al tanque adicionando agua para una mejor fermentación, en una relación de acuerdo al tipo de tecnología usada [68].

Los lodos generados del biodigestor se pueden usar como fertilizante y el sobrenadante como agua de riego, por otro lado, mediante válvulas se realiza la extracción del biogás para su uso o quema de acuerdo al sistema empleado [68]. En el **GRÁFICO 11** se muestra de forma gráfica el flujo de este proceso.

GRÁFICO 11 Sistema de aprovechamiento de biogás.



Fuente: adaptado de [144].

Un biodigestor es el principal componente en el proceso de biodegradación, en el cual se lleva a cabo la fermentación anaeróbica y la producción de biogás. La elección de la tecnología depende de múltiples factores, como la disponibilidad y características del sustrato, su contenido de materia seca, potencial energético, incentivos, demanda local de energía, condiciones de transporte y recursos financieros disponibles, entre otros, por lo que la elección de la tecnología más apropiada debe hacerse con el apoyo de un experto [144].

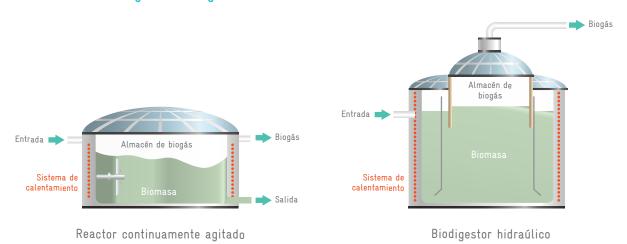
Las principales tecnologías de biodigestión son:

- Biodigestión húmeda continua.
- Biodigestión seca continua.
- Biodigestión seca en lote.

#### Biodigestión húmeda continua

La biomasa sólida se diluye usando aguas tratadas o biomasa líquida para proveer un sustrato diluido al biodigestor, el digestato líquido puede esparcirse en el suelo directamente como fertilizante. **GRÁFICO 12**.

GRÁFICO 12 Tecnologías de biodigestión húmeda continua.



Fuente: adaptado de [144].

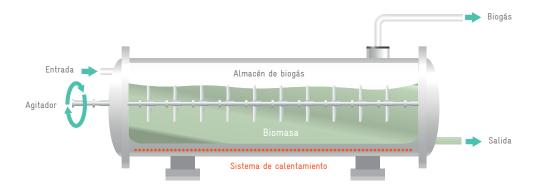
En el reactor continuamente agitado, también llamado CSTR por sus siglas en inglés (*Continuous Stirred Tank Reactor*), se tiene un proceso continuo en un rango de operación de materia seca del 6 al 15% y con temperaturas mesofílicas o termofílicas. Esta tecnología es la más utilizada debido a su amplio rango de sustratos aprovechables, así como por su adaptación de operación en múltiples tamaños de plantas [144].

El digestor hidráulico funciona de manera continua, no necesita agitación, el porcentaje de materia seca necesario varía del 6 al 16%, usa temperaturas mesofílicas o termofílicas y se necesita una cantidad mínima de 20,000 toneladas de sustrato por año [144].

#### Biodigestión seca continua

La biomasa se transporta lentamente desde la entrada de materia prima, al final del tanque, por lo que idealmente todas las partículas tienen el mismo tiempo de retención, aunque dependiendo de la naturaleza de la materia prima se pueden diseñar salidas alternas. Debe tener un sistema de agitación muy fuerte [144] **GRÁFICO 13**.

GRÁFICO 13 Tecnología de biodigestión seca continua.



Reactor de flujo pistón

Fuente: adaptado de [144].

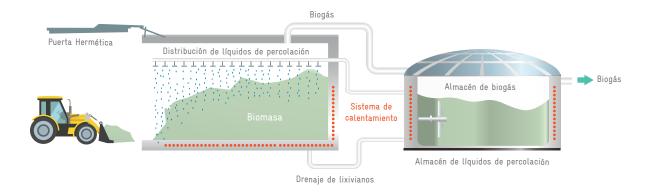
El proceso para este tipo de reactores es continuo, el contenido de materia seca debe estar dentro del rango de 15 y 45%, el reactor puede operar tanto horizontalmente como verticalmente, optimizando el uso de espacios. El volumen de los reactores es limitado (entre 1000 y 2000 m³) por las intensas fuerzas radiales involucradas en el proceso de agitación. Normalmente trabaja en condiciones termofílicas y con un mínimo de 20,000 toneladas anuales de materia prima [144].

## Biodigestión seca en lote

La biomasa es procesada en lotes que permanecen por un tiempo de retención definido, el siguiente lote es inoculado con el digestato obtenido del proceso previo. Los lixiviados del sistema de drenaje se recirculan para que sirvan como líquido de percolación y optimicen el contacto de bacterias, ácidos orgánicos y materia prima. El digestato es postcomposteado sin una etapa de separación [144].

El proceso no es continuo, se necesita maquinaria de transporte pesado. Un inconveniente es el porcentaje de materia seca necesario, que debe ser mayor al 30%, así como la necesidad de al menos tres digestores para homogeneizar el nivel de producción de gas. El proceso se trabaja a temperaturas mesofílicas o termofílicas y la mayor ventaja es que al no necesitar componentes móviles, los costos de mantenimiento son bajos [144] **GRÁFICO 14**.

#### GRÁFICO 14 Tecnología de biodigestión seca.



Sistema de almacén

Fuente: adaptado de [144]

#### Contexto en México

De acuerdo al *Diagnóstico General de la Situación Actual de los Sistemas de Biodigestión en México*, se sabe que en México existen al menos 721 sistemas de biodigestión, se realizó un estudio usando como muestra 345 de estos biodigestores, de los cuales, el 77.7% fueron implementados mediante el esquema de MDL y los restantes a través de apoyos gubernamentales [69].

Los estados de Coahuila, Durango, Jalisco, Puebla, Sonora y Tamaulipas cuentan con el 76% de los proyectos de biodigestión a partir de residuos agropecuarios. Sonora cuenta con 116 sistemas y Jalisco con 107, lo cual está directamente relacionado con que ambos estados son los mayores productores de ganado porcino en el país. La tecnología más usada para su construcción es la de tipo laguna, similar a los reactores continuamente agitados, de tal manera que el 94% de los sistemas funciona a partir de dicha tecnología [69].

De acuerdo a la GIZ [112], para el caso de biodigestores a partir de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU), se tienen algunas experiencias; sin embargo, las principales barreras para la implementación de estos proyectos son:

- La baja efectividad del marco legal en materia de gestión, manejo y aprovechamiento energético de los residuos.
- Los costos de inversión, operación y mantenimiento de plantas de aprovechamiento energético de residuos, que son considerablemente altos comparados con los costos de un relleno sanitario.

La suficiente disponibilidad de cantidad y calidad de la FORSU es clave para un proyecto de biodigestión, con base en eso, se podrá seleccionar la tecnología más adecuada para la generación de biogás.

A continuación, se presentan tres casos en México de Biodigestores a partir de FORSU, uno de ellos en fase piloto.

## BIODIGESTOR DE RSU EN ATLACOMULCO ESTADO DE MÉXICO



Este biodigestor forma parte de un sistema integral de manejo de RSU que se encarga de disponer y manejar los residuos que se ubican en una celda, este sistema también está conformado por una planta de composta y un biodigestor [7].

#### Tipo de tratamiento o tecnología

El biodigestor, con tecnología de biodigestión húmeda continua, cuenta con un acondicionamiento de los residuos orgánicos que ingresan en él, para que su homogeneización sea la más adecuada y la fermentación pueda tener los mejores rendimientos posibles [29].

En el biodigestor se lleva a cabo la fermentación, posterior a este proceso, se encuentran dos recipientes de almacenamiento, uno para líquidos fermentados que servirán como mejoradores orgánicos de suelos, y el otro u otros, para almacenar el biogás. Al final del proceso tiene una unidad de generación de energía eléctrica para la transformación del biogás [29].



Biodigestor de 4241 m³. Fotografía: GIZ México.

## Energía

En 2013 se estimó que este biodigestor transformaba 30 toneladas diarias de residuos orgánicos [6], y que en 2015 era capaz de generar más de 2400 m³/día de biogás como combustible, con una producción eléctrica de 1°752,091 kWh/año, obteniendo además, fertilizante orgánico como subproducto [29].

## Mitigación de GEI

Se proyecta una mitigación de 8883 toneladas anuales de  $CO_2$  [29].

#### Insumos

Principalmente residuos sólidos orgánicos domiciliarios recolectados en el municipio, los cuales se someten a una trituración; así como lodos activados originados de la PTAR y, opcionalmente, estiércoles [29].

#### Aspectos financieros

Se obtuvo un financiamiento de 34 millones de pesos por parte de la SEMARNAT, mediante el Programa para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (PPGIR) [84], recursos que fueron gestionados y suministrados por el Gobierno del Estado de México [6].

# BIODIGESTOR DE RSU EN MÉRIDA YUCATÁN





Separación de residuos orgánicos Fotografía: Ayuntamiento de Mérida.

## Mitigación de GEI

Se proyecta una mitigación de 73,675 toneladas anuales de CO<sub>2</sub> durante un período de 10 años, que comprende de 2015 a 2025 [23].

Se construyó como complemento para la gestión integral de los RSU de la ciudad de Mérida, junto con una planta de separación de residuos, ya que estos llegaban directamente a un relleno sanitario, lo que acortaría el tiempo de vida de los mismos; con esto se mejoró el servicio de manejo de los residuos orgánicos y de disposición final, con el objetivo de mitigar los efectos ambientales y de salud que ocasionan [23].

#### Tipo de tratamiento o tecnología

Los residuos orgánicos son tratados en un reactor con biodigestión húmeda continúa, diseñado para tratar de 244 a 400 toneladas diarias de residuos orgánicos; dentro del biodigestor se forma el CH<sub>4</sub>, el cual es capturado para su posterior transformación en energía. El biodigestor funciona en condiciones mesófilas que son las óptimas para la biodigestión anaeróbica con un tiempo de retención de 15 días promedio, ideal para la generación del biogás. Los lixiviados generados se recirculan para adecuar la materia orgánica entrante al sistema y los lodos son dispuestos en un relleno sanitario [23].

#### Insumos

Residuos orgánicos municipales.

#### Aspectos financieros

Se hizo una inversión privada de 160 millones de pesos para la construcción, tanto del biodigestor como de una planta de separación de residuos, por lo que el municipio no realizó inversión alguna. Se estimó que el Ayuntamiento ahorraría el 15% del pago que hacía al relleno sanitario, y que este ahorro estaría destinado a la creación de programas de educación ambiental y concientización ecológica [62].

De igual forma, este proyecto ya cuenta con la validación necesaria para comercializar bonos de carbono [23].

#### Energía

En 2015, se estimó que esta planta procesará hasta 254 toneladas diarias de RSU que serán convertidos en 85,110 m³ de biogás/día procedentes de la planta de separación existente en la ciudad [23].

El biogás generado es filtrado y usado para la generación de energía eléctrica dentro de la misma planta de valorización, la cual tiene una capacidad instalada de 7.42 MW y cuya electricidad será exportada a la red eléctrica nacional [23].

## BIODIGESTOR DE RSU EN MILPA ALTA CIUDAD DE MÉXICO



Funciona con biodigestión húmeda continua y es una planta piloto del Sistema para el Tratamiento Integral en Sitio de Residuos Orgánicos Mbio, un proyecto realizado por la empresa Suema (Sustentabilidad en Energía y Medio Ambiente)[148].

En Milpa Alta se producen cerca de 300 mil toneladas anuales de nopales, de las cuales 60 mil no se venden [4], adicionalmente se consideran los residuos generados por el desespinado del nopal y otros residuos orgánicos procedentes del Centro de Acopio y Comercialización de Nopal-Verdura de la Delegación. Una parte fundamental de este proyecto es dar aprovechamiento energético a estos recursos.

#### Tipo de tratamiento o tecnología

Primero se trituran los residuos y se calientan antes de ingresar al proceso de biodigestión anaeróbica, el biogás generado se quema en un motor de combustión interna que está acoplado a un generador eléctrico y así produce energía eléctrica; independiente a ello, la planta cuenta con un sistema de calentadores solares para el biodigestor [148].

#### Insumos

Residuos orgánicos del Centro de Acopio y Comercialización de Nopal-Verdura que está ubicado a un lado del biodigestor, hecho que facilita que los comerciantes locales realicen ellos mismos la disposición de los residuos en la planta [111].

#### **Aspectos Financieros**

El biodigestor tuvo un costo aproximado de 15 millones de pesos, de los cuales 13.76 millones fueron cofinanciados por la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México (SECITI) [148].

El proyecto permitirá ahorros por gastos de disposición de residuos y de energía eléctrica, satisfaciendo el consumo del centro de acopio, adicionalmente generará abono para impulsar el crecimiento de la agricultura local [148].



Residuos de nopal para alimentar el biodigestor.

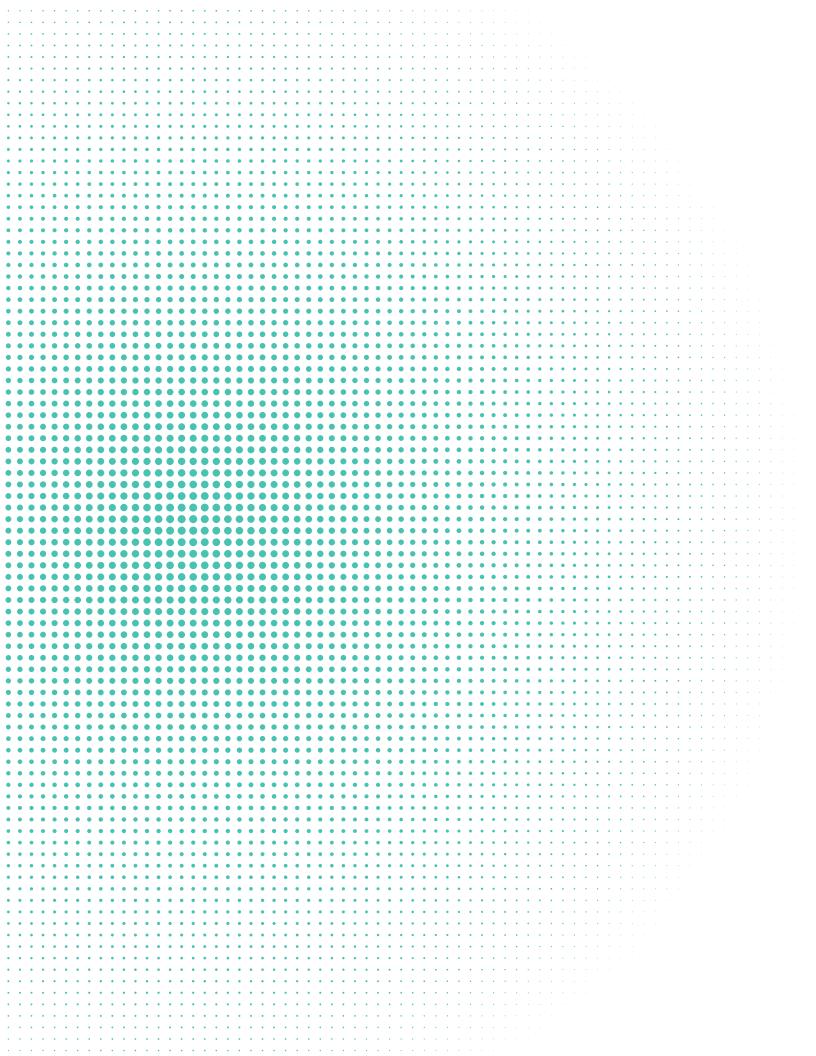
#### Mitigación de GEI

Se estima una mitigación de 123.77 toneladas anuales de CO<sub>2</sub>eq.

#### Energía

La planta procesará hasta 100 toneladas al mes de RSU y cuenta con una producción de biogás de 105.7  $\rm m^3/día$  equivalente a 67 toneladas de CH<sub>4</sub> al día. La potencia eléctrica ocupada es de 8.24 kW/día.





## Tecnología en breve

Los rellenos sanitarios son los sitios de disposición final de los RSU, cuyo objetivo es retener lixiviados y otros contaminantes tóxicos para que no contaminen el medio ambiente circundante. Ofrecen una solución para la gestión de residuos en el corto plazo, aunque la experiencia de países desarrollados ha demostrado que a largo plazo los costos de operación son muy altos e insostenibles [134]; sin embargo, los rellenos sanitarios siguen siendo una opción adoptada en el sistema de gestión de residuos estándar en muchos países en vías de desarrollo, y en particular en América del Norte y América Latina.

Para que un sitio de disposición final sea considerado como relleno sanitario debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Aislamiento hidrológico (de forma natural dada su ubicación o tipo de suelo, o por un revestimiento sintético).
- Diseño formal de ingeniería.
- Personal capacitado para un control permanente.
- Disposición controlada de residuos (separar en capas, compactar y recubrir) [145].

La captura de biogás representa un tipo de tecnología de aprovechamiento energético de residuos. El biogás de relleno sanitario se forma por la biodigestión anaeróbica de la fracción orgánica de los residuos depositados en él, mismo que se asemeja a un reactor biológico sobredimensionado. La recuperación y quema de biogás en los rellenos sanitarios se aplica en muchos países, ya que contribuye a la mitigación de emisiones a la atmosfera de GEI y otras sustancias tóxicas.

Al porcentaje de biogás recolectado se le conoce como la eficiencia de recolección, y varía significativamente dependiendo del diseño y funcionamiento del relleno. La eficiencia de recolección en rellenos sanitarios con un buen diseño de operación fluctúa entre el 60 y el 85% [60], sin embargo, en la realidad, el rendimiento del biogás en muchos rellenos sanitarios de América Latina se encuentra muy por debajo de las expectativas, llegando hasta el 50% de captura [112].

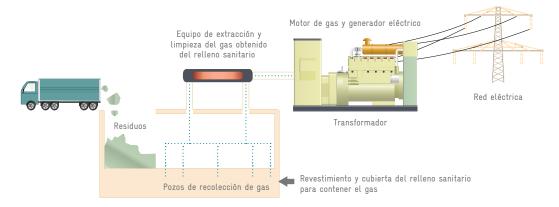
Aunque los usos del biogás de rellenos sanitarios son variados, principalmente se usa para sustituir combustibles fósiles en procesos de combustión o para la generación de energía eléctrica y térmica, también se utiliza como combustible para el transporte, contribuyendo a la mejora de la calidad del aire.

De acuerdo a Castells [15] un sistema de recolección de gas de relleno sanitario típico se constituye con los siguientes componentes:

- Pozos de recolección del biogás: consisten en una red de pozos verticales u horizontales (trincheras) instalados en las celdas de los residuos y sirven para colectar el biogás.
- Red de tuberías (laterales y cabezales): tienen el fin de conectar el pozo de recolección a la antorcha o a la planta de energía. Generalmente son fabricadas con polietileno.
- Trampas de condensado o cárcamos: es un sistema de eliminación de la humedad que contiene el biogás y que genera condensaciones, mismas que pueden taponar la tubería y con ello anular o reducir la efectividad de la red de captación.
- Estación de quemado, con o sin planta de energía: al final del proceso debe contar con los elementos necesarios para que el biogás capturado se pueda quemar para evitar las emisiones de CH<sub>4</sub> a la atmósfera, se infiltre dentro del suelo o se pueda utilizar como combustible para generar electricidad.

En el GRÁFICO 15 se muestran las principales áreas del proceso para generar electricidad con el biogás producido en las celdas de los rellenos sanitarios.

GRÁFICO 15 Esquema principal para la generación de energía eléctrica mediante biogás obtenido de un relleno sanitario.



Fuente: adaptado de [112]

#### Contexto en México

En el año 1991, surge la primera iniciativa de aprovechamiento de biogás en un relleno sanitario de la Ciudad de México y se implementó por el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) en el relleno sanitario de Santa Cruz Meyehualco, en el que se instaló una planta piloto de 20kW, en colaboración con la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y la compañía Luz y Fuerza del Centro [5].

En el año 2003, se instaló la primera planta de generación eléctrica de biogás en Monterrey [12], proyecto que sirvió como modelo para el surgimiento de más iniciativas, fue hasta entonces que despuntaron proyectos como los que se describirán más adelante.

Si consideramos que en México la mayor parte de los residuos urbanos se disponen en rellenos sanitarios o tiraderos a cielo abierto no controlados, resulta de suma importancia impulsar mejores políticas públicas y regulaciones para la gestión, manejo, aprovechamiento y disposición final de los residuos urbanos en el país. Si regresamos al GRÁFICO 1, se puede ver que tan solo el 9.6% de los residuos son llevados a reciclaje y un 60.5% son dispuestos en rellenos sanitarios, mientras que los demás residuos son desechados en tiraderos al aire libre o tienen un destino desconocido.

La Ley General de Cambio Climático plantea en el sector residuos, una estrategia para la reducción de emisiones de GEI: "desarrollar acciones y promover el desarrollo y la instalación de infraestructura para minimizar y valorizar los residuos, así como para reducir y evitar las emisiones de metano provenientes de los residuos sólidos urbanos" [108].

Cabe destacar, que se estima que sólo una fracción mínima de los rellenos sanitarios cumplen con la NOM-083-SEMARNAT-2003, que establece las especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de RSU y de manejo especial.

De acuerdo al *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 2015*, la disposición final de RSU en todas sus modalidades emitió 45,909.010 toneladas de CO<sub>2</sub>eq para ese mismo año [98]. Por otro lado, el *Inventario Nacional de Energías Renovables* (INERE) de la SENER, reportó que también en 2015 existían ocho proyectos de generación de energía por medio de la extracción de biogás en rellenos sanitarios en el país, tal como puede observarse en el **GRÁFICO 16**.

6.4 MW Biogás de Juárez Ciudad Juárez 2.1 MW Saltillo LOREAN Energy ■ 16.9 MW Monterrey BENLESA 1.6 MW Durango Ener-G ■ 2.6 MW Aquascalientes Ener-G 2.7 MW Querétaro 0.6 MW Proáctiva Atizapán 1.06 MW Energreen Cuautla Energía Renovable

GRÁFICO 16 Mapa de rellenos sanitarios con aprovechamiento energético de biogás (capacidad instalada en 2015).

Fuente: Elaboración propia con base en [140].

Es importante considerar que para los proyectos de aprovechamiento de residuos es necesario tramitar un permiso de acuerdo al tipo de actividad del relleno sanitario, biodigestor o PTAR; ya sea para cogeneración, autoabastecimiento, pequeña producción u otra actividad. Este debe solicitarse a la Comisión Reguladora de Energía (CRE), encargada de otorgar y revocar los permisos, considerando los criterios y lineamientos de la política energética nacional, así como de tomar en cuenta la opinión de la CFE, cuidando la seguridad, la eficiencia y la estabilidad del servicio público [33].

A continuación, se describen de manera básica algunos proyectos que actualmente aprovechan energéticamente el biogás producido en sus rellenos sanitarios, los cuales son gestionados tanto por entes públicos, como por el sector privado.

# RELLENO SANITARIO SALINAS VICTORIA NUEVO LEÓN





Generadores de energía a un costado del relleno sanitario. Fotografía: GIZ México.

### Energía

El permiso de la CRE fue otorgado bajo la modalidad de cogeneración con el número E/217/COG/2002 [50], de acuerdo a este, la empresa tiene la facultad de suministrar electricidad para su alumbrado público a siete municipios, dentro de la Zona Metropolitana de Monterrey (Monterrey, San Pedro Garza, Guadalupe, San Nicolás de los Garza, Apodaca, General Escobedo y Santa Catarina); puede suministrar al Sistema de Transporte Colectivo Metrorrey de la ciudad de Monterrey; a la compañía estatal de agua y drenaje; a las instalaciones del Gobierno de Nuevo León y para usos propios de Benlesa.

Comenzó a operar en 1990 [142]. Se estimó que este relleno sanitario recibirá residuos hasta el año 2025 y que la planta seguirá produciendo energía hasta el año 2045 [150]. Hasta 2015, el relleno recibía aproximadamente 6000 toneladas diarias de residuos de la Zona Metropolitana de Monterrey (ZMM) [3].

Desde el año 2000, el Sistema Integral para el Manejo Ecológico y Procesamiento de Desechos del Estado de Nuevo León (Simeprode) es el organismo responsable de la comercialización de los RSU y los subproductos generados [119]. En el 2003, se formó Benlesa, que es un *joint venture* entre Sistemas de Energía Internacional, S.A. de C.V. (empresa de capital privado) de Grupo Gentor, y Simeprode por parte del Gobierno de Nuevo León; a partir de ese momento Benlesa es la empresa encargada de la recuperación de biogás en rellenos sanitarios para generación de energía eléctrica [9].

El proyecto de conversión y recuperación de biogás se realizó en tres etapas: la primera comenzó en 2003, cuando la planta eléctrica en el relleno sanitario contaba con una capacidad instalada de 7.42 MW, con una producción de energía eléctrica de 58.254 GWh/año y un consumo de 36.229 millones anuales de Nm³ de biogás [50], la venta de la energía generó ahorros al gobierno municipal, de aproximadamente 50,000 pesos al mes [139]. La segunda etapa, en 2008, se tituló Proyecto Monterrey II y tuvo como fin abarcar una mayor área del relleno sanitario, durante esta fase, Benlesa logró alcanzar una capacidad instalada de 12.72 MW. La tercera etapa contempló una capacidad instalada de 16.96 MW con una generación estimada de 120,000 MWh/año y dio inicio en el año 2010 [130].

#### Aspectos financieros

La ciudad de Monterrey es un cliente de la empresa Benlesa, por lo que paga una tarifa mensual por los servicios. Los costos de producción, transmisión y distribución de la electricidad son absorbidos por dicha empresa. Durante la primera fase Simeprode recibió 5.1 millones de dólares provenientes del Banco Mundial [103], el fondeo restante fue provisto por Bioeléctrica de Monterrey con una inversión total para esta misma fase, de 10.8 millones de dólares [138].

Adicionalmente, las dependencias que hacen uso de la energía producida por Benlesa se benefician por el ahorro de un 10% en su facturación eléctrica [103]. Hasta 2009, cuando se contaba con una capacidad instalada de 12.72 MW, se generaban ahorros de hasta 1.5 millones anuales de dólares para los municipios y para el Gobierno de Nuevo León [129]. Dentro de la tercera etapa se proyectó un ahorro de 10.9 millones anuales de pesos para los municipios que reciben energía eléctrica [9].

## Mitigación de GEI

Durante su primer período de acreditación, comprendido del 2008 al 2014, se estimó una reducción de más de 1.57 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>eq [18].



# RELLENO SANITARIO CIUDAD JUÁREZ CHIHUAHUA



Comenzó a operar en 1995. Según datos de 2015, recibía 1200 toneladas diarias de residuos urbanos. Obtuvo el registro como proyecto de MDL en 2007 y en el período de diciembre de 2007 a marzo de 2010 quemó el CH<sub>4</sub> equivalente a 138,318 Certificados de Reducción de Emisiones, también llamados CER por sus siglas en inglés (*Certified Emission Reduction*) [83].

La extracción del biogás se realiza por medio de un sistema de pozos horizontales fabricados con polietileno de alta densidad. Cada pozo cuenta con un modulador que permite la extracción de más volumen y mejor calidad del gas que con tecnologías tradicionales [10].

## Aspectos financieros

El costo total de proyecto ascendió a 206 millones de pesos, el sistema de extracción de gas tuvo un costo de 63 millones de pesos, la estación de quema y cuarto de control 29.8 millones, y la planta de generación 113.2 millones [79].

La empresa Biogás de Juárez suministra energía limpia a la red de alumbrado público, lo que genera un ahorro de 15 millones anuales de pesos para las finanzas del Municipio [128].

## Mitigación de GEI

El proyecto fue registrado dentro del MDL el 30 de noviembre del 2007 bajo el número 1123. La cantidad estimada de reducciones promedio durante el primer período de acreditación (2007-2014) fue de 160,361 toneladas anuales de CO<sub>2</sub>eq [21].

En 2016 se planteó la meta de la comercialización de 147,877 bonos de carbono mediante la Plataforma Mexicana de Carbono [120].

#### Energía

El proyecto de aprovechamiento de biogás está registrado ante la CRE con el número E/825/AUT/2009 con la empresa Transformadora de Energía Eléctrica de Juárez, bajo la modalidad de autoabastecimiento. La empresa Biogás de Juárez es la operadora del proyecto y fue creada únicamente para surtir energía a organismos o dependencias públicas. De acuerdo con esto, los municipios de Juárez y Nuevo Casas Grandes son accionistas [67].

La electricidad producida alimenta los sistemas de alumbrado público de los municipios de Juárez y Nuevo Casas Grandes, Chihuahua, así como los requerimientos eléctricos de la empresa Biogás de Juárez [51]. La capacidad instalada de 6.4 MW es suficiente para sostener el consumo de al menos 48 mil lámparas de la red de alumbrado público de Ciudad Juárez [124].

# RELLENO SANITARIO SAN NICOLÁS AGUASCALIENTES



Se inauguró en el año 1999 [16]. Es propiedad del municipio de Aguascalientes y presta servicio a todo el estado por medio de estaciones de transferencia [77], y en el año 2010 recibió la cantidad de 914 toneladas de residuos diariamente [72].

El proyecto a cargo de la empresa Ener-G contempla la extracción y quema de biogás, así como la generación de electricidad. La empresa Biogas Technology y el municipio firmaron en el 2005 un contrato para la construcción de la planta de energía, con el objetivo de promover la construcción y operación de un sistema de recolección, quema y aprovechamiento del biogás proveniente de los residuos de este relleno sanitario [28].

La planta de aprovechamiento energético del biogás alimenta a los miembros de la Sociedad Autoabastecedora de Energía Verde de Aguascalientes, entre sus socios iniciales figuran el H. Ayuntamiento de Aguascalientes y la empresa Nissan Mexicana; dentro de los planes de expansión se planeó abastecer a otras empresas e instituciones como el INEGI, American Standard, Cementos y Concretos Nacionales, entre otras [52].

La participación de la compañía Nissan Mexicana fue un elemento que contribuyó al reconocimiento del proyecto, ya que este permitió a la automotriz alcanzar sus metas proyectadas dentro del programa Nissan Green Program 2016 [114].

## Energía

La planta cuenta con una capacidad autorizada por la CRE de 3.20 MW en el permiso de modalidad de autogeneración E/847/AUT/2010 y un consumo de 10.556 millones de m³/año de biogás [52].

## Aspectos financieros

La administración municipal no tuvo que invertir recursos financieros o técnicos, para la implementación del proyecto, tanto la búsqueda de financiamiento, como la ejecución y gestión corrieron por cuenta del consorcio Ener-G, quien lo financió de manera privada y la empresa EcoMethane realizó las gestiones necesarias para la inserción del mismo en el sistema del MDL [89].

La inversión por parte de Ener-G, fue de siete millones de dólares [113].

## Mitigación de GEI

En 2006 se hizo una estimación aproximada y se consideró que el proyecto mitigaría las emisiones de 162,593 toneladas anuales de CO<sub>2</sub>eq, en promedio [16].

## RELLENO SANITARIO DURANGO DURANGO





Manejo inicial de los residuos. Fotografía: GIZ México.

El relleno inició su funcionamiento en 1999 [17], recibiendo en promedio 400 toneladas diarias de basura del municipio de Durango [80].

En 2008, el proyecto inició cuando las empresas Ener-G y Biogas Technology, a través de la empresa EcoMethane y un tratado con el Municipio de Durango, comenzaron la quema de biogás para la obtención de energía [151]; debido a esta iniciativa, el municipio consiguió ser galardonado en 2014 con el Premio al Gobierno Local Sustentable en la gestión de residuos sólidos [66].

### Aspectos financieros

Este proyecto logró obtener financiamiento por medio del programa MDL. La primera etapa consistió en la aprobación del MDL bajo el proyecto Durango: EcoMethane Landfill Gas to Energy Project (registrado con el número 1307), cuyo objetivo radicó en la quema de CH<sub>4</sub>; esto retribuyó económicamente al municipio obteniendo regalías anuales por 95 mil dólares americanos [2]; la segunda fase del proyecto consistió en la generación de electricidad, en donde Ener-G realizó una inversión de 5.5 millones de dólares [65].

#### Energía

El proyecto se encuentra registrado ante la CRE con el número E/991/PP/2013, bajo la modalidad de pequeña producción de energía eléctrica, con una capacidad de generación de electricidad de 1.6 MW y un consumo estimado de 6 millones de m³/año de biogás [56]. Con la energía generada se cubre más de la mitad de la demanda diaria de energía del alumbrado público del municipio de Durango, es decir, aproximadamente 16 mil luminarias [65].

## Mitigación de GEI

Se espera una mitigación de 833,396 toneladas de  $CO_2$ eq durante el período comprendido de 2007 a 2017, generadas por las dos etapas del proyecto: captura de biogás y generación eléctrica. El promedio anual de mitigación es de 83,340 toneladas de  $CO_2$ eq [17].

# RELLENO SANITARIO PUERTO DE CHIVOS ESTADO DE MÉXICO



## Energía

El proyecto se encuentra registrado ante la CRE, con el número E/1033/PP/2013, bajo la modalidad de pequeña producción, donde se permite la capacidad instalada de 0.6 MW, con una producción estimada de energía de 4.8GWh/año y un consumo aproximado de 3'040,000 m3/año de biogás [57].

El proyecto contempla tres etapas de producción: la primera considera una capacidad de generación de 600 kW, esta producción es suficiente para abastecer a las instalaciones de la UAEM, contiguas al relleno, a 5000 luminarias y las necesidades energéticas de la planta; en la segunda etapa se estableció una capacidad de 3 MW; y el objetivo para la tercera etapa es llegar a los 6 MW, con el fin de abastecer el alumbrado público de todo el municipio [147].

## Mitigación de GEI

De acuerdo al documento de diseño del proyecto con nombre Puerto Chivos Landfill Gas Project (registro 9686), tiene un potencial de mitigación de 79,873 toneladas anuales de CO2eq [22].

En 1995, comenzó como un tiradero a cielo abierto en un área perteneciente a la UAEM, a través de un acuerdo de donación con el gobierno del Estado de México [22]. El relleno sanitario recibe diariamente poco más de 500 toneladas provenientes del municipio y su nueva macro celda abarca más de 60 hectáreas [86].

## Aspectos financieros

En junio del 2008, la UAEM y el Ayuntamiento de Atizapán unieron esfuerzos para desarrollar un proyecto de investigación para el aprovechamiento del biogás del relleno, con el fin de generar recursos económicos para ambas instituciones, vía venta de bonos de carbono y generación de electricidad [70]; de esta forma, en 2008 establecen una alianza con la compañía Energreen, la cual cubrió el financiamiento requerido para la instalación de la infraestructura [22].

El proyecto recibió financiamiento por medio del MDL, proporcionando un ingreso mensual para la alcaldía y la UAEM. La empresa Energreen invirtió 2.5 millones de dólares en un equipo de tecnología de extracción de biogás para transformarlo en energía eléctrica [147].

El municipio de Atizapán recibió un pago anticipado por 1.5 millones de pesos por la venta de bonos de carbono [85].



Vista satelital del Relleno Sanitario Puerto de Chivos... Fotografía: Google Earth.

## RELLENO SANITARIO LA PERSEVERANCIA MORELOS



Fue un relleno privado operado por el municipio de Cuautla y en 2011 lo adquirió la compañía Operadora de Ferrocarril y Manejo de Rellenos, S.A de C.V. [118].

Provee el manejo de RSU y destino final de los mismos para los municipios de Cuautla, Cuernavaca, Yautepec, Yecapixtla, Jiutepec, Jonacatepec, Ayala, Temixco, Temoac, Tlayacapan, Emiliano Zapata, Totolapan, Tlalnepantla, Jantetelco y Tepoztlán; se estima que recibe un total de 950 toneladas diarias de residuos de los cuales aproximadamente 180 toneladas provienen de la Ciudad de México [106].

La separación de residuos valorizables es realizada mediante los pepenadores que venden al relleno sanitario los productos resultantes de su pepena y se contempla la instalación de una planta de separación con capacidad de 600 toneladas diarias [106].

## Energía

Operadora de Ferrocarril y Manejo de Rellenos desarrolló el proyecto relativo a la quema de biogás y cuenta con el permiso de la CRE con el número E/959/COG/2012 para generación de energía; actualmente el relleno suministra electricidad a dos empresas que se encuentran en el Estado de México. Recientemente la empresa invirtió en la compra de un segundo motogenerador para la generación adicional de 1 MWH [106].



Inicio de la separación de residuos valorizables. Fotografía: GIZ México.

## Mitigación de GEI

El proyecto estima una reducción de 797,500 toneladas de CO<sub>2</sub>eq durante un período de 10 años, iniciando en 2009 [74].

Fue acreedor de 12,501 bonos de carbono, mediante The Climate Action Reserve, convirtiendo a este sitio en el primer relleno sanitario en el país en obtener bonos de carbono mediante el Protocolo de California [106].

## Aspectos financieros

La compañía estableció una cuota promedio de 180 pesos por tonelada procesada [106].

# RELLENO SANITARIO DE SALTILLO COAHUILA



## Energía

El proyecto está registrado ante la CRE con el número E/958/AUT/2012 bajo la modalidad de autoabastecimiento [54], con una capacidad instalada permitida de 2.122 MW, una generación de energía eléctrica de 16.73 GWh/año y un consumo estimado de 7.99 millones de m³/año.

La energía eléctrica producida es empleada en el alumbrado público del municipio. En el año 2011, el consumo de energía en alumbrado público de la ciudad de Saltillo promedió 3232 MWh mensuales. El proyecto pretende cubrir hasta un 45% del total de la energía requerida para dicho fin [31].

## Mitigación de GEI

De acuerdo al documento de diseño de proyecto, con nombre Lorean Saltillo's Landfill Gas to Energy Project, mitigará 58,928 toneladas de CO<sub>2</sub>eq durante un período de 10 años; pese a ello, este proyecto no ha logrado ser registrado ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) [19].

El relleno cuenta con una superficie de 60 hectáreas y recibe diariamente 600 toneladas de residuos. La composición de los residuos corresponde en promedio a 54.4% de materia orgánica, 16.7% de subproductos reciclables y 28% a productos no reciclables [32]. El relleno sanitario inició operaciones en el año 1991 y se estima que su clausura será en el 2022 [19].

El promotor del proyecto es la compañía privada mexicana Lorean Energy Group, quien ganó en 2011 la concesión por 21 años para operar la extracción del CH<sub>4</sub> y la producción de energía eléctrica con base en los desechos [64].

## Aspectos financieros

El costo total de la implementación del proyecto ascendió a los 76 millones de pesos, considerando una capacidad de 2.0 MW, de esta inversión, el 91.7% corresponde a construcción y adecuación de infraestructura y el resto a costos financieros [31].

En 2014 Lorean Energy Group, obtuvo del Banco de Desarrollo de América del Norte (BDAN) un crédito por 38 millones. El mecanismo de pago se estructuró conforme a los ingresos generados por el suministro de electricidad, con base en el precio establecido en los contratos de prestación de servicios entre la empresa y el Municipio de Saltillo [31].



Colocación de membrana para contención de lixiviados en Relleno Sanitario de Saltillo. Fotografía: Infonor Diario Digital, www.infonor.com.mx.



# RELLENO SANITARIO MOMPANÍ QUERÉTARO



Cuenta con una superficie de 40 hectáreas y es operado por Proactiva Medio Ambiente México, a través de una concesión otorgada para el período 1996-2025 por el ayuntamiento de Querétaro.

Cubre las necesidades de los habitantes del municipio de Querétaro recibiendo aproximadamente 750 toneladas diarias de residuos domésticos [20].

En el año 2011, el municipio le otorgó a la empresa Tecnología del Medio Ambiente de Querétaro –conformada a su vez por las empresas Proactiva Medio Ambiente México y Eolicia Biogas Borealia Energy—la concesión para desarrollar un proyecto de MDL para extracción de biogás y generación de electricidad [20].

## Energía

El proyecto está registrado ante la CRE bajo la modalidad de autoabastecimiento con el permiso número E/962/AUT/2012, con una capacidad autorizada de 2.746 MW, una estimación de producción de energía eléctrica de 24 GWh/año y un consumo de 12.6 millones de m³/año de biogás. De acuerdo al permiso, la electricidad generada abastecerá en un inicio al municipio de Querétaro y en una etapa posterior a las siguientes empresas: Proactiva de Medio Ambiente, Eolicia, Beneficios Medioambientales Energéticos, y CPA Desarrollos Energéticos Sustentables [55].



Bandas de separación del relleno sanitario de Mompaní.
Fotografía: Periódico Ketzalkoatl (www.periodicoketzalkoatl wordpress.com), www.ketzalkoatl.com

## Mitigación de GEI

El proyecto estima una reducción de 505,846 toneladas de CO<sub>2</sub>eq a lo largo del período de acreditación para el funcionamiento del proyecto (2012-2019), la estimación de reducción es de 72,264 toneladas anuales de CO<sub>2</sub>eq [20].

### Aspectos financieros

No hubo inversión pública en el proyecto, por lo que Tecnología del Medio Ambiente de Querétaro fue responsable de todas las inversiones y los gastos de funcionamiento necesarios para llevarlo a cabo dentro del marco del MDL [20].

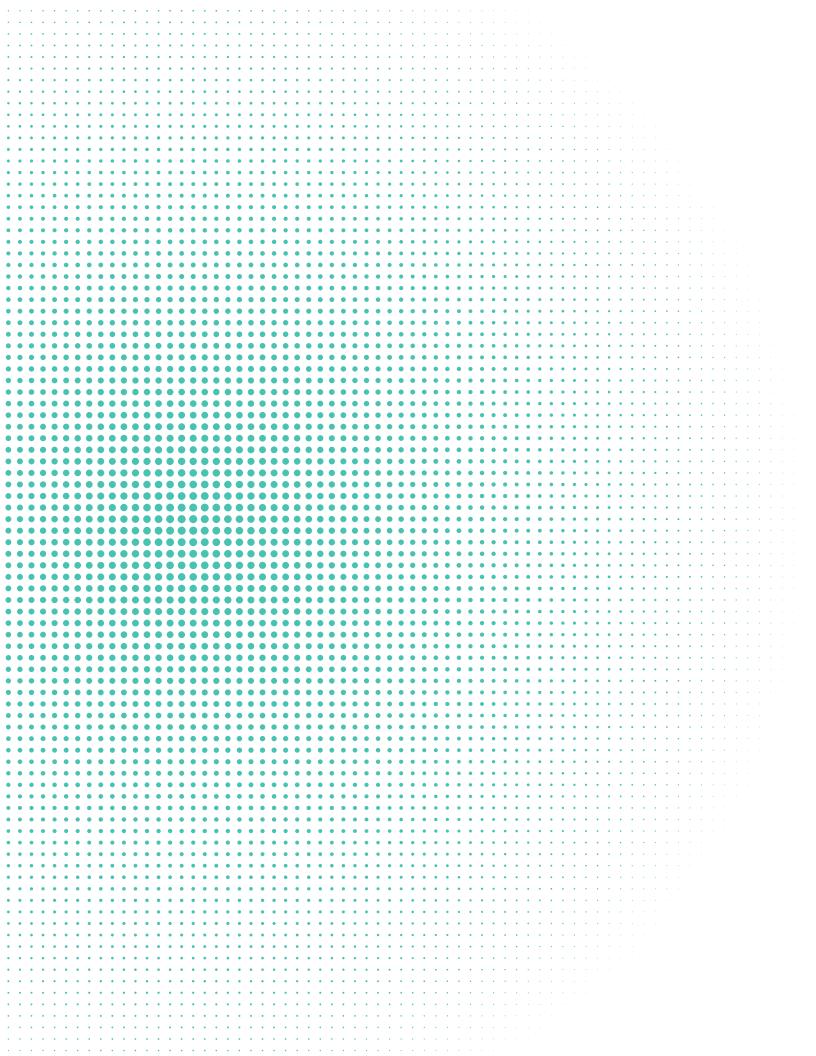
Se estimó que el proyecto dará al municipio un beneficio de más de 94.5 millones de pesos, mediante un ahorro del 9% sobre la tarifa de alumbrado público y una ganancia del 35% por bonos de carbono [87].

TABLA 3 Resumen Rellenos Sanitarios

Nombre del relleno	Salinas Victoria	Ciudad Juárez	San Nicolás	Durango
Compañía generadora de energía	Bioenergía de Nuevo León (Benlesa)	Transformadora de Energía Eléctrica de Juárez	Sociedad Autoabastecedora de Energía Verde de Aguascalientes	Ener-G
Modalidad	COG	AUT	AUT	PP
Capacidad autorizada (MW)	16.96	6.4	3.20	1.6
Energía autorizada (GWh/año	133.713	39.24	21.52	12
Consumo biogás (miles de m³/año)	83,157	13,811	10,556	6000
Ciudad o municipio y estado	Monterrey, Nuevo León	Cd. Juárez, Chihuahua	Aguascalientes, Aguascalientes	Durango, Durango
Operador del Relleno	Simeprode	Biogás de Juárez	Ayuntamiento	Ayuntamiento
Basura (t/día)	5000	1200	914	400
Mitigación GEI estimada (tCO <sub>2</sub> eq/año)	225,323	160,361	162,593	83,340
Financiamiento	MDL, BM, Privado	COCEF y BDAN; MDL	MDL, Privado	MDL, Privado

Nombre del relleno	Puerto de Chivos	La Perseverancia	Saltillo	Querétaro
Compañía generadora de Energía	Energreen	Energía Renovable De Cuautla	Lorean Energy Group	TMQ Generación Energía Renovable
Modalidad	PP	COG	AUT	AUT
Cap. Autorizada (MW)	0.6	1.065	2.122	2.746
Energía autorizada (GWh/año	4.8	6.5	16.73	24.055
Consumo biogás (miles de m³/año)	3040	2000	7992	12,614
Ciudad o municipio y estado	Atizapán, Estado de México	Cuautla, Morelos	Saltillo, Coahuila	Mompaní, Querétaro
Operador del Relleno	Ayuntamiento	Operadora de Ferrocarril y Rellenos Sanitarios	Ayuntamiento	Proactiva
Basura (t/día)	500	800	600	750
Mitigación GEI estimada (tCO <sub>2</sub> eq/año)	79,873	79,750	58,928	72,264
Financiamiento	MDL, Privado	NA	BDAN	MDL, Privado

Fuente: Elaboración propia.



## Tecnología en breve

Muchas actividades humanas hacen que la contaminación del agua sea casi inevitable, ello destaca la importancia de implementar procesos para el saneamiento del agua residual; por otro lado, los lodos producidos durante dichos procesos son altamente contaminantes y deben ser tratados antes de su disposición final, esto tiene un alto impacto en el costo de operación de la PTAR y también de inversión (hasta el 40% del total) [116].

Una forma sustentable de tratar los lodos residuales es mediante la biodigestión anaeróbica, ya que los subproductos de ese proceso, el biogás y el digestato, se valoran como energía, así como la materia contenida en los lodos. Por lo general, antes de ser llevados al biodigestor, los lodos pasan por un proceso de espesamiento con el fin de aumentar el contenido de sólidos secos y con ello disminuir la energía necesaria para alcanzar la temperatura de operación del biodigestor [8].

El sistema de tratamiento de lodos residuales con biodigestión anaeróbica (GRÁFICO 17) consiste en:

- Tratamiento preliminar.
- Tratamiento primario (físico y/o químico).
- Tratamiento secundario (biológico).
- Tratamiento terciario (generalmente físico y/o químico).
- Tratamiento y disposición de lodos. [116]

Un punto a considerar es que las características del agua residual y la calidad requerida del efluente determinarán el tipo de tratamiento, mientras que la cantidad de lodos residuales obtenida y sus características dependen del tipo de tratamiento recibido, por ejemplo:

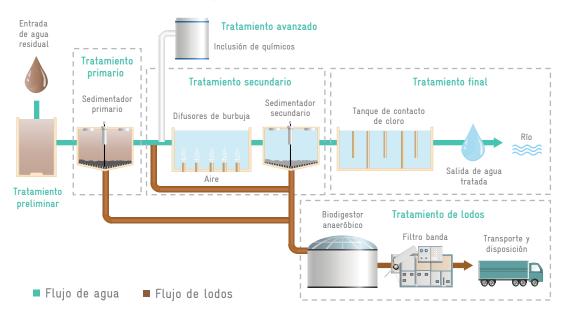
- Lodo primario: Se obtiene por sedimentación de la materia en suspensión durante el tratamiento primario y tiene un alto contenido de materia orgánica biodegradable.
- Lodo secundario (lodo activado): Se obtiene por sedimentación durante el tratamiento biológico y su contenido biodegradable suele ser un poco menor al del lodo primario [8].

Un biodigestor de lodos de PTAR consiste generalmente en un reactor continuamente agitado, funcionando a temperaturas entre 35 y 39°C y con un tiempo de retención hidráulico de aproximadamente 20 días. Mediante el aprovechamiento del biogás generado con sistemas de cogeneración, como el mostrado en el **GRÁFICO 18**, se puede generar electricidad, la cual puede cubrir parte o la totalidad de los requerimientos energéticos de la PTAR. Por otro lado, el calor generado puede ser usado en un proceso interno o externo de la planta que necesite energía calorífica, tal como el calentamiento del digestor, el secado de los lodos estabilizados o en algún proceso industrial cercano a la PTAR. De esa forma se permite fomentar la autonomía energética de la PTAR y un manejo sustentable de la misma [8].

Los lodos que han sido sometidos a un proceso de estabilización (dependiendo de su calidad) se pueden convertir en composta a través de un proceso aerobio, en el cual la oxidación microbiana reduce el volumen de la materia orgánica, produciendo principalmente CO<sub>2</sub> y vapor de agua; dicha composta puede ser usada para el mejoramiento del suelo agrícola y forestal. La NOM-004-SEMARNAT-2002 determina los posibles usos que se le pueden dar: mejoramiento de suelos, usos agrícolas, usos urbanos con o sin contacto público directo, entre otros [135].

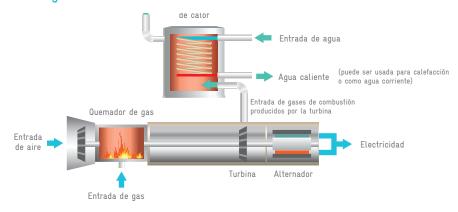
A pesar de que las PTAR son un servicio necesario para evitar daños a la salud y al ambiente, también generan impactos ambientales que necesitan ser identificados para tomar decisiones responsables, por esto se necesitan herramientas –como el análisis de ciclo de vida (ACV)– que puedan ayudar a evaluar dichos impactos, desde la extracción de materia prima hasta la disposición final de los residuos [109].

GRÁFICO 17 Esquema del tratamiento de aguas residuales en una PTAR con proceso de lodos activados.



Fuente: adaptado de [59].

GRÁFICO 18 Sistema de cogeneración.



Fuente: adaptado de [91].

## Tratamiento de aguas residuales en México

En México, las tecnologías para el tratamiento de aguas residuales son en su mayoría lagunas de estabilización, lodos activados y reactores anaeróbicos de flujo ascendente, también llamados UASB por sus siglas en inglés (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*).

Las 709 PTAR que usan el proceso de lodos activados reciben aproximadamente el 60% del volumen de aguas residuales tratadas. Existen, en menor medida, tanques sépticos, humedales, tanques Imhoff, lagunas aireadas y similares. En ciertos tratamientos, debido a la descomposición de la materia orgánica en zonas anaeróbicas, se emiten a la atmósfera de forma descontrolada grandes cantidades de CH<sub>4</sub> junto con sulfuro de hidrógeno, sin ser recolectadas, lo que resulta en emisiones de GEI con un alto potencial de calentamiento global, también llamadas GWP por sus siglas en inglés (*Global Warming Potential*) [41] [95].

Afortunadamente se percibe una ligera tendencia de aumento en el tratamiento de aguas residuales, por ejemplo, en el año 2010, cerca del 45% de estas aguas fueron tratadas y en 2014 el 49%. El panorama general en 2015 mostró que se generaron un total de 7.23 km³ de aguas residuales, cuya carga contaminante total se estimó en 1.95 millones de toneladas de DBO<sub>5</sub>, de estas el 57% fueron tratadas en las 2477 PTAR municipales en operación [35] [37] [38].

## PTAR con lodos activados y biodigestión anaeróbica en México

En México, la mayoría de las PTAR emplean la biodigestión aeróbica como proceso de estabilización de los lodos, sin embargo, últimamente se han construido o están en etapa de construcción, plantas con biodigestión anaeróbica y aprovechamiento de biogás para generación de energía eléctrica y térmica. Para este capítulo se realizó una revisión de la información técnica disponible de las PTAR con estas características, para ello, se tomó como referencia el INERE del IMTA [95].

También se realizó una actualización de datos de las siguientes plantas, en aspectos como el tipo de tratamiento de agua y lodos residuales, la generación de energía, el ámbito financiero y la mitigación de GEI, expresada en CO<sub>2</sub>eq):

- PTAR Agua Prieta, en Zapopan, Jal.
- PTAR Dulces Nombres, en Pesquería, N.L.
- PTAR Norte, en General Escobedo, N.L.
- PTAR León, en León, Gto.
- PTAR El Ahogado, en Tlajomulco de Zúñiga, Jal.
- PTAR San Pedro Mártir, en Santiago de Querétaro, Qro.
- PTAR Principal, en Saltillo, Coah.
- PTAR Atotonilco, en Atotonilco de Tula, Hgo.
- PTAR Hermosillo, en Hermosillo, Son.
- PTAR Villa de Álvarez, en Villa de Álvarez, Col.
- PTAR La Purísima, en Purísima del Rincón, Gto.

En el **GRÁFICO 19** se muestra la ubicación de las mencionadas PTAR con sistema de biodigestión anaeróbica de lodos residuales, en donde muchas utilizan el biogás como fuente de energía limpia.

GRÁFICO 19 Distribución en México de las PTAR con biodigestión anaeróbica de lodos residuales y potencial para generación de energía



Fuente: Elaboración propia.

# PTAR AGUA PRIETA JALISCO



Se inauguró en 2014 calculando que con esta PTAR se sanearía el 79% de todas las aguas residuales de la Zona Metropolitana de Guadalajara. En ese entonces se estimó que la calidad de agua que se generaría, luego del proceso de tratamiento, tendría resultados de 75 mg/l de SST y de 75 mg/l de DBO en su efluente, calidad suficiente para utilizarse en la agricultura [88].

Esta planta fue diseñada para tratar 8500 l/s, sin embargo, en 2015 tuvo un caudal de operación de únicamente 4357 l/s, con un afluente que presentaba resultados de 316 mg/l de SST y de 271 mg/l de DBO [95]



Vista de una sección de la PTAR Agua Prieta Fotografía: www.jalisco.gob.mx

## Mitigación de GEI

En un año y tres meses de operación se estimó que la reducción de emisiones equivale a 29,647 toneladas de CO<sub>2</sub>eq [82].

## Energía

La CRE le otorgó el permiso E/1111/GEN/2014 bajo la modalidad de generación. La capacidad autorizada de generación es de 11.41 MW, en tanto que la producción estimada de electricidad es de 87.44 GWh/año [58].

El biogás generado permite cubrir hasta el 90% de la energía requerida para el funcionamiento de la PTAR [117], lo que en el año 2014 representaba un ahorro mensual de 12 millones de pesos [24].

En el 2014 se estimó que el costo del metro cúbico de agua tratada que sanea esta planta sería de apenas 98 centavos [24].

## Aspectos financieros

La obra costó 3258 millones de pesos, 49% de esta cantidad fue financiada por el gobierno federal vía el Fondo Nacional de Infraestructura (Fonadin), en tanto que el 51% fue cubierta por la iniciativa privada [24].

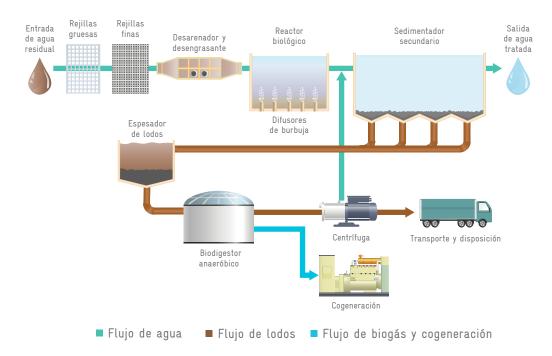
#### Tratamiento de lodos

- Tratamiento preliminar por medio de rejillas.
- Tratamiento primario convencional con adición de cloruro férrico y un polímero que remueve por gravedad la materia en suspensión.
- Tratamiento secundario que consiste en un reactor biológico con tecnología de lodos activados.
- Clarificador secundario y tratamiento de los lodos residuales producidos.

El proceso integra las siguientes etapas: espesamiento de lodos con filtro de banda, estabilización por medio de biodigestión anaeróbica y deshidratación. Los lodos digeridos son finalmente dispuestos en un relleno sanitario [95]. **GRÁFICO 20**.

La biodigestión anaeróbica de los lodos se da en condiciones mesofílicas y cuenta con seis digestores con un volumen de 14,000 m³ cada uno [117].

#### GRÁFICO 20



# PTAR DULCES NOMBRES NUEVO LEÓN



Esta PTAR es operada por Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey y su función es tratar aguas provenientes de la Zona Metropolitana de Monterrey.

Tiene capacidad para tratar hasta 7500 l/s y en 2016 su caudal de operación fue de 6270 l/s, lo que la convirtió en una de las plantas más grandes de México. Su afluente tiene una carga de 531 mg/l de SST y de 362 mg/l de DBO debido a los efluentes de la zona industrial. Después del tratamiento, los resultados del efluente de la planta son de 25.7 mg/l de SST y de 9.4 mg/l de DBO [95].

## Energía

Según el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), el potencial de producción de biogás a partir de lodos residuales generados en la planta es de 68,388 m³/día [95].

En 1997, la CRE le otorgó el permiso E/56/AUT/97 bajo la modalidad de autoabastecimiento y el registro muestra a esta PTAR en estatus operativo. La capacidad autorizada de generación es de 9.2 MW, en tanto que el volumen para la producción de electricidad autorizada es de 40.2 GWh/año [58].

Cuenta con cuatro biodigestores y fue diseñada para una producción de 44,500 m³/día de CH4 [125].

Cabe destacar que debido a que su equipo de cogeneración no es operable, la planta no está produciendo electricidad con sus lodos y el biogás producido solo se está quemando.



Vista de una sección de la PTAR Dulces Nombres. Fotografía: © 2018 Iberdrola, S.A.

## Mitigación de GEI

Por producir energía para su propio uso, se estimó que tiene un potencial de reducción de emisiones de GEI de aproximadamente 24,683 toneladas de CO<sub>2</sub>eq/año [95].

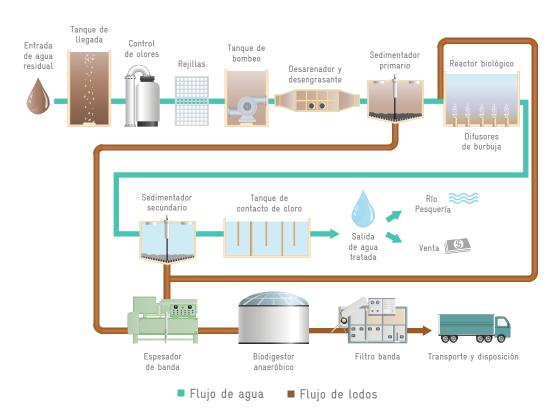
#### Aspectos financieros

La planta tuvo un costo aproximado de 469.4 millones de dólares y fue financiada por el Banco Interamericano de Desarrollo y el Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos (Banobras) [126].

#### **Tratamiento**

- Tratamiento preliminar de rejillas y desarenadores.
- Tratamiento primario convencional (sedimentador primario).
- Tratamiento secundario con lodos activados usando oxígeno puro y clarificador secundario. Durante el tratamiento de los lodos residuales, los lodos son estabilizados mediante biodigestión anaeróbica, el biogás es acumulado en un gasómetro de doble membrana y posteriormente se proyecta usarlo para la generación de energía, la cual se podría consumir internamente.
- Los lodos digeridos son deshidratados en ocho filtros prensa de banda, para ser dispuestos posteriormente en un relleno de lodos ubicado en los terrenos adyacentes a la PTAR.
- El agua tratada es desinfectada con cloro antes de ser descargada en el Río Pesquería, aunque una parte es usada dentro de la planta para usos no potables [125]. GRÁFICO 21.

#### GRÁFICO 21



# PTAR NORTE NUEVO LEÓN



Esta planta inicio con una capacidad máxima para tratar 3000 l/s y en 2017 una ampliación permitió una capacidad instalada de 4000 l/s [42].

Actualmente es operada por Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (SADM) y cuenta con un caudal de operación de 2562 l/s [127].

Es una de las plantas de saneamiento con estabilización anaeróbica de lodos más grandes de México. Las aguas tratadas provienen de la Zona Metropolitana de Monterrey y tienen una carga de 519 mg/l de SST y de 410 mg/l de DBO, con resultados después de tratamiento de 19.7 mg/l de SST y de 8 mg/l de DBO [127].

## Aspectos financieros

Se invirtieron 171.7 millones de pesos en la ampliación de la planta realizada en 2017, de los cuales 103 millones son de aportación federal y 68.7 de aportación estatal [42].

## Energía

En 1997, la CRE le otorgó el permiso E/59/AUT/97 bajo la modalidad de autoabastecimiento, según datos de ese año, la capacidad autorizada era de 1.6 MW, en tanto que el volumen para la producción de electricidad era de 14.02 GWh/año [49].

De acuerdo al IMTA, el potencial de producción de biogás a partir de lodos residuales generados en la planta es de 29,924 m<sup>3</sup>/día [95].

La planta no está produciendo energía eléctrica con sus lodos, solo hay quema de biogás.



Vista aérea de una sección de la PTAR Norte. Fotografía: Asociación Nacional de Empresas de Agua y Saneamiento (ANEAS).

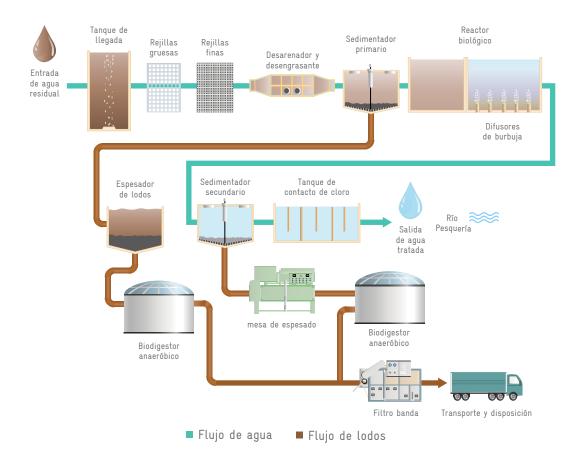
## Mitigación de GEI

Según estimaciones del IMTA, al generar energía eléctrica para sus propios usos tiene un potencial de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>eq de 10,799 toneladas de CO<sub>2</sub>eq/año [95].

#### **Tratamiento**

- Tratamiento preliminar (rejillas y desarenadores).
- Sedimentación primaria.
- Proceso secundario de desnitrificación y de lodos activados, así como desinfección del efluente.
- El proceso de tratamiento de los lodos residuales consiste en el espesamiento de los mismos, estabilización mediante biodigestión anaeróbica y una etapa de deshidratación.
- Los lodos son transportados a un relleno ubicado en la PTAR Dulces Nombres. GRÁFICO 22.

#### GRÁFICO 22



# PTAR LEÓN GUANAJUATO





Tanque de desulfurización en PTAR León. Fotografía: Leticia Llamas.

## Mitigación de GEI

Según las estimaciones del IMTA [95], la PTAR León tiene un potencial de reducción de emisiones de 6521 toneladas de CO<sub>2</sub>eq/año, al sustituir su consumo de energía en la planta con lo generado por la cogeneración mediante sus lodos.

Esta planta trata aguas residuales provenientes del sector industrial del municipio de León, en específico de la producción de cuero curtido de la industria zapatera y peletera.

La empresa operadora de la planta por un período de 10 años (del 2010 al 2020) es Ecosys III. El organismo operador es Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de León (SAPAL).

Esta PTAR fue diseñada con una capacidad de tratamiento de 2500 l/s y en en 2015 manejó un caudal de operación de 1463 l/s, recibiendo un afluente de 560 mg/l de SST y de 482 mg/l de DBO [95].

La GIZ, a través del Programa EnRes, brindó asesoría técnica en 2017 con el fin de acompañar la ingeniería, ejecución y arranque de la desulfurización biológica y los nuevos motogeneradores, producto de la ampliación de la planta.

#### Aspectos financieros

Ecosys III planea amortizar su inversión mediante los ahorros que obtendrá por la disminución de hasta el 75% de energía eléctrica que actualmente le es provista por la CFE. A su vez, el organismo operador SAPAL aportará recursos económicos para la generación de biogás, que servirá para la realización de estudios ambientales. Al término de la concesión, la infraestructura pasará a formar parte del patrimonio activo de SAPAL, organismo operador de agua municipal. Una inversión de 23.4 millones de pesos englobó la construcción y el equipamiento de la planta [133].

#### Energía

En 2011, la CRE otorgó el permiso E/887/AUT/2011 bajo la modalidad de autoabastecimiento, generando energía eléctrica y energía térmica. La capacidad autorizada de generación es de 1.75 MW en tanto que el volumen para la producción de electricidad es de 12.14 GWh/año [58].

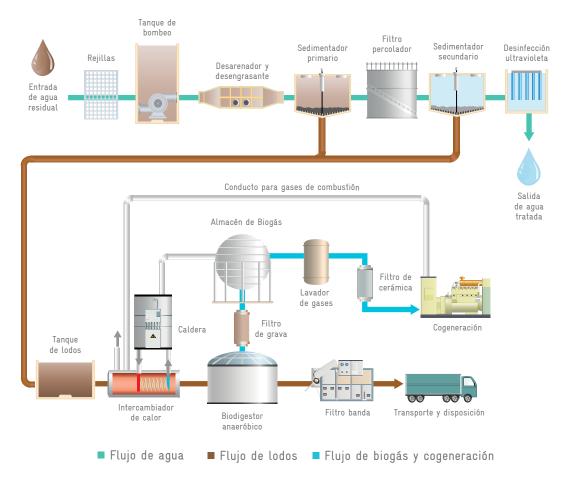
El aprovechamiento de la energía térmica proveniente de la combustión del biogás en calderas y el sistema de cogeneración, permiten la sustitución del gas licuado de petróleo (gas LP), normalmente usado como fuente de energía térmica en la planta. Además, la electricidad generada con el biogás en el sistema de cogeneración permite cubrir parte de la demanda en energía eléctrica de la planta y sustituir la electricidad distribuida por la CFE.

#### **Tratamiento**

Cuenta con un módulo de desbaste en el cual, las aguas industriales reciben un pretratamiento, un tratamiento físico-químico y un tratamiento biológico; posteriormente, se dirigen a la PTAR municipal para continuar con su saneamiento [132]:

- Tratamiento preliminar (rejillas y desarenador).
- Tratamiento primario convencional.
- Tratamiento secundario con filtro percolador y sedimentador secundario.
- Tratamiento terciario consistente en desinfección con cloro.
- El tratamiento de los lodos se realiza mediante la estabilización con biodigestión anaeróbica y una producción de biogás de aproximadamente 12,450 m³/día.
- El biogás es almacenado en dos tanques de 1000 m³ uno de metal y otro de doble membrana.
- El biogás resultante es enviado al motor de combustión interna para generar energía.
- Los lodos digeridos son deshidratados en filtros prensa de banda, para ser dispuestos posteriormente en un relleno sanitario [95]. GRÁFICO 23.

#### GRÁFICO 23



# PTAR EL AHOGADO JALISCO



Esta PTAR entró en operación en el año 2012 y es operada por las empresas Atlatec y Servicios de Agua Trident, S.A. de C.V.

Esta planta trata el 20% de las aguas residuales de la Zona Metropolitana de Guadalajara, en particular aguas residuales de la zona sur y sur oriente de la ciudad [11].

Fue diseñada para captar 2250 l/s y en 2015 ya reportaba un caudal de operación de 2249 l/s, con un afluente de 280 mg/l de SST y de 205 mg/l de DBO [95].

## Aspectos financieros

La inversión total para esta planta fue de 858.9 millones pesos, de los cuales, 410.4 fueron aportados por el Fonadin y el resto por el sector privado [34].

## Energía

En 2011, la CRE le otorgó el permiso E/885/COG/2011 bajo la modalidad de cogeneración. La capacidad autorizada de generación es de 2.83 MW, en tanto que el volumen para la producción de electricidad es de 10.11 GWh/año [58].

De acuerdo al IMTA [95] se generan 1'686,519 kWh/mes de electricidad, que es más del 60% de la energía eléctrica que consume la planta.

El potencial de producción de biogás a partir de lodos residuales generados en la planta es de 19,195 m<sup>3</sup>/día [95].



PTAR El Ahogado.
Fotografía: Comisión Estatal del Agua de Jalisco, www.ceajalisco.gob.mx.

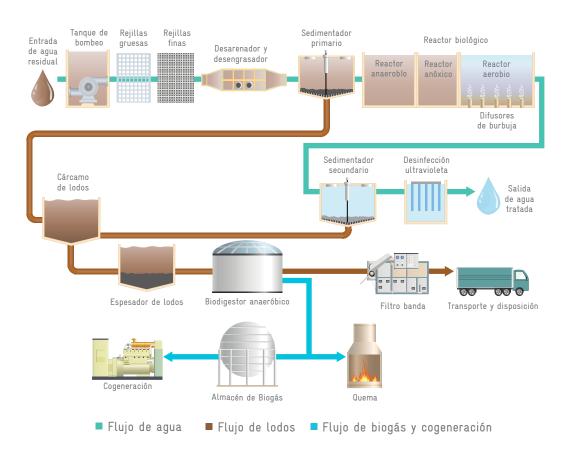
## Mitigación de GEI

La reducción de emisiones de esta planta en tres años y nueve meses de operación equivale a 58,376 toneladas de  $CO_2$ eq [82].

#### **Tratamiento**

- Tratamiento preliminar (rejillas, desarenador y desengrasador).
- Sedimentación primaria, la remoción de nitrógeno y fósforo a través de reactores biológicos en un proceso de tres etapas (anaeróbica, anóxica y aeróbica).
- Sedimentación secundaria.
- Desinfección con luz ultravioleta.
- Espesamiento mediante la adición de polímeros, biodigestión anaeróbica en la cual se genera biogás y finalmente deshidratación en filtros banda.
- Después de su estabilización por biodigestión son enviados a un monorelleno [95]. GRÁFICO 24.

#### GRÁFICO 24



# PTAR SAN PEDRO MÁRTIR QUERÉTARO



Esta PTAR inició operaciones en el año 2010 y es operada por la empresa Atlatec, S.A. de C.V.

Trata aguas provenientes del drenaje municipal, que son conducidas por gravedad hacia la planta por los emisores Norte, Sur, San Miguel Carrillo y San Pedro Mártir; además recibe agua de los colectores Benito Juárez, Don Manuel y Santa María Magdalena [123].

Esta planta cuenta con una capacidad de 750 l/s y en 2015 tuvo un caudal de operación de 630 l/s [95]. Los reportes de ese año muestran un afluente con una carga de 295 mg/l de SST y de 480 mg/l de DBO [95] dando resultados de 75 mg/l de SST y de 75 mg/l de DBO en su efluente [36]. El agua tratada es reutilizada en la industria y en la agricultura, además del riego de áreas verdes [122].

## Aspectos financieros

La inversión para la construcción de la infraestructura ascendió a más de 370 millones de pesos, de los cuales 94 millones fueron aportados por CONAGUA y el resto por la iniciativa privada [122].

## Energía

El permiso de la CRE se otorgó bajo la modalidad de cogeneración mediante el permiso E/854/COG/2010. La capacidad autorizada de generación es de 1.05 MW, en tanto que la producción autorizada de electricidad es de 8.41 GWh/año [58]. El proceso de cogeneración contempla la generación de energía eléctrica y térmica secundaria, así como el aprovechamiento del calor de los gases provenientes del escape del motogenerador, que son utilizados para el calentamiento del agua mediante un intercambiador de calor; el agua es utilizada en el mantenimiento de la temperatura de los digestores anaeróbicos de lodos en los que se produce el biogás [53].

## Mitigación de GEI

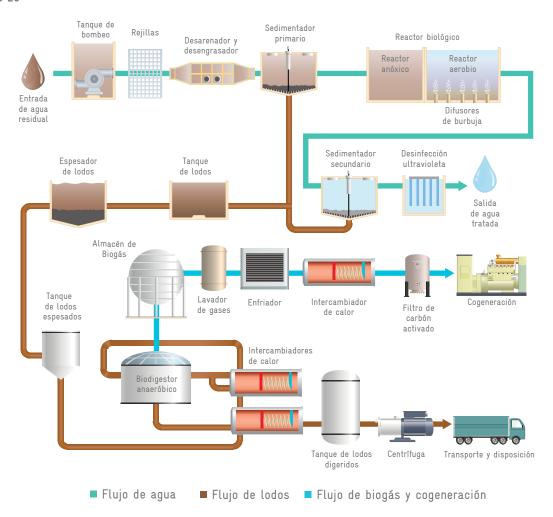
Según las estimaciones del IMTA, esta planta tiene un potencial de reducción de emisiones de 3056 toneladas de CO<sub>2</sub>eq/año, al sustituir su consumo energético por la energía eléctrica producida mediante biogás [95].

#### **Tratamiento**

- Tratamiento preliminar de rejillas y desarenador.
- Sedimentador primario.
- Tratamiento secundario con lodos activados
- Sedimentador secundario
- Desinfección con luz ultravioleta.
- El tratamiento de lodos sigue un espesado y posteriormente un proceso de biodigestión anaeróbica en condiciones termofilicas, se deshidratan por medio de una centrífuga y finalmente se disponen en campos agrícolas.

El potencial de producción de biogás a partir de lodos residuales generados en la planta es de 9018 m³/día [95]. La ventaja del digestor termofílico (55-58°C) reside en la reducción de sólidos suspendidos volátiles hasta en 56%, lo que genera una mayor producción de biogás [123]. **GRÁFICO 25**.

#### GRÁFICO 25



## PTAR PRINCIPAL COAHUILA



Esta planta entró en operación en el año 2008 con el fin de recibir aguas domésticas e industriales provenientes de la ciudad de Saltillo [107]. Es operada por la empresa Ideal Saneamiento de Saltillo, también conocida como ISASAL.

Esta PTAR se diseñó para tratar 1200 l/s. Su caudal de operación en 2015 fue de 980 l/s y su afluente presentaba una carga de 351 mg/l de SST y de 440 mg/l de DBO [95]. Se estableció el objetivo de garantizar valores menores de 40 mg/l de SST y de 44 mg/l de DBO para el efluente, no obstante, se reportó valores de hasta 87 mg/l de DBO [107].

## Aspectos financieros

La planta requirió una inversión de 436 millones de pesos y para recuperarla se consideró la venta del agua tratada a la industria [63].



PTAR Principal.

Fotografía: Asociación Nacional de Empresas de Agua y Saneamiento (ANEAS).

## Mitigación de GEI

Esta planta tiene un potencial de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>eq de 4504 toneladas de CO<sub>2</sub>eq/año [95].

## Energía

El permiso de la CRE se otorgó bajo la modalidad de cogeneración con el número E/1103/COG/2013. La capacidad autorizada de generación es de 0.86 MW, en tanto que el volumen para la producción de electricidad es de 6.76 GWh/año [58]. Según una estimación de 2016, la autosuficiencia energética esperada para la planta es de un 70% a 80%, gracias al uso del biogás en un sistema de cogeneración [131].

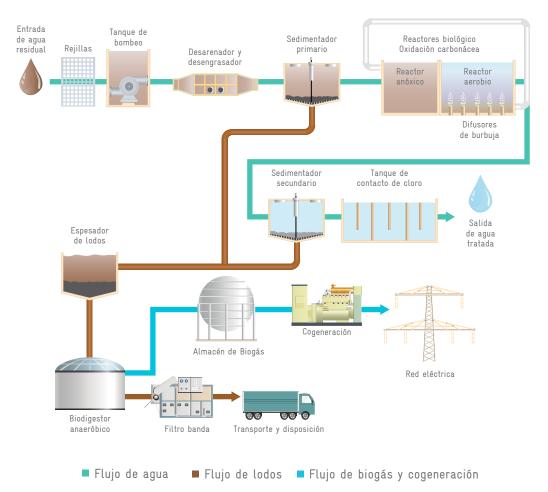
#### **Tratamiento**

Cuenta con diferentes niveles de tratamiento:

- Preliminar con rejilla y desarenador, clarificadores primarios, cinco trenes de tratamiento biológico con lodos activados y un clarificador secundario cada uno.
- Después de la etapa de cloración, el efluente secundario se descarga al arroyo La Encantada.
- La planta también cuenta con un sistema adicional de tratamiento terciario con capacidad para tratar 150 l/s del efluente secundario clorado, el cual se planea destinar a reúso industrial [107].

El tratamiento de los lodos consiste en la estabilización mediante biodigestión anaeróbica. Los dos digestores de 9354 m³ cada uno, son operados en condiciones mesofílicas y mezclados por medio de la recirculación del gas producido. El potencial de producción de biogás a partir de lodos residuales generados en la planta es de 14,210 m³/día [95]. Adicionalmente, la planta cuenta con un filtro banda para la deshidratación de los lodos digeridos [107]. GRÁFICO 26.

#### GRÁFICO 26



#### PTAR ATOTONILCO HIDALGO



Es la PTAR más grande de México. Es operada por el consorcio empresarial Aguas Tratadas del Valle de México, el cual diseño y construyó el proyecto y la manejará por un período de 22 años [94].

Se diseñó para tratar hasta un máximo de 50,000 l/s en temporada de lluvias. Los reportes de 2015 presentaron un caudal medio diario de entre 35,000 l/s y 42,000 l/s [1]. En periodo de estiaje el análisis del afluente fue de 250 mg/l de SST y de 250 mg/l de DBO, con resultados de 40 a 70 mg/l de SST y de 30 a 35 mg/l de DBO en su efluente. En época de lluvia el análisis del afluente fue de 400 mg/l de SST y de 200 mg/l de DBO, con resultados de 45 a 75 mg/l de SST y de 30 a 35 mg/l de DBO en su efluente [71].

Esta planta se proyectó para tratar el 60% de las aguas residuales de la Ciudad de México para posteriormente utilizarlas para diversos objetivos, entre los que se encuentran el riego de cultivos y la mejora de calidad de vida de los habitantes del Valle del Mezquital, en Hidalgo [40].



Vista parcial PTAR Atononilco. Fotografía: www.gob.mx

# Energía

El permiso de la CRE se otorgó bajo la modalidad de generación con el número E/1002/GEN/2013. La capacidad autorizada de generación es de 32.6 MW, en tanto que la producción de electricidad asciende a 200.6 GWh/año [58]. Se espera que cubra la demanda en electricidad de la planta hasta por el 62%, usando el biogás producido durante el tratamiento de los lodos residuales [43].

# Mitigación de GEI

El saneamiento de dichas aguas residuales, permitirá disminuir las emisiones de GEI hasta en 145,000 toneladas anuales de CO<sub>2</sub>eq [44].

## Aspectos financieros

La inversión requerida para la construcción de la planta ascendió a 9389 millones de pesos, el 20% fue cubierto por la empresa Aguas Tratadas del Valle de México, el 48.9% por el apoyo financiero del Fonadin y el 31.02% restante, por créditos bancarios provistos por Banobras, Banorte, Banamex, Santander y Scotiabank [94].

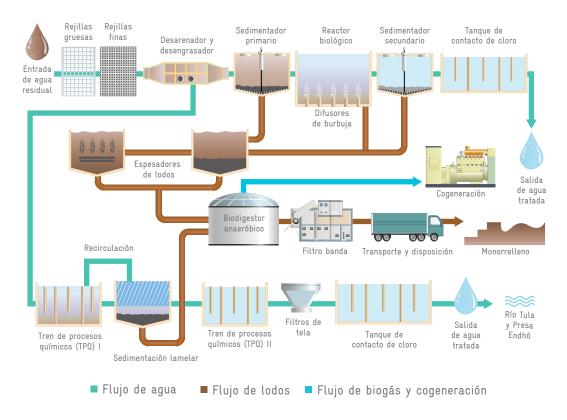
#### **Tratamientos**

La planta ha sido diseñada con dos trenes de tratamiento simultáneos:

- Tren Biológico Convencional (TBC), que sirve para el saneamiento de las aguas residuales (caudal medio de 27.6 m³/s). Consta de un tratamiento preliminar (rejillas y desarenadores), sedimentación primaria, tratamiento secundario con lodos activados, sedimentación secundaria y desinfección con cloro.
- Tren de Tratamiento Físico-Químico (TFQ), que sirve para sanear las aguas durante la época de lluvias (caudal medio de 14.4 m³/s) [1]. Consta de tratamiento preliminar, sedimentación con coagulación/floculación y desinfección con cloro [1].
   GRÁFICO 27.

El tren de tratamiento de lodos cuenta con el espesamiento de lodos, biodigestión anaeróbica en condiciones mesofílicas y deshidratación de los lodos digeridos. La biodigestión anaeróbica se lleva a cabo en 30 biodigestores de 13,000 m³ cada uno, mientras que los lodos digeridos son deshidratados con centrífugas y depositados en el monorelleno de la planta [1].

#### GRÁFICO 27



# PTAR HERMOSILLO SONORA



Fue diseñada para tratar 2500 l/s e inició operaciones en diciembre de 2016. Se adjudicó un contrato de servicios a la empresa Tiar Hermosillo, S.A.P.I de C.V., con un período autorizado de operación de 19 años [144a].

Esta planta alcanza una cobertura del 100% del volumen de aguas residuales generadas en el municipio. En 2011 se estableció que el agua tratada cumplirá con la NOM-003-SEMARNAT-1997, para uso del público con contacto directo, dando resultados de 20 mg/l de SST y de 20 mg/l de DBO en su efluente, con el fin de ser utilizada para el riego agrícola, recargas de acuífero y usos urbanos [30].

## Aspectos financieros

Se realizó una inversión total de 1119 millones de pesos. El 48% de dicha inversión se obtuvo a través de créditos del BDAN y del Banco del Bajío, el 24% con un subsidio del Fonadin y el 28% restante fue aportado por la empresa Tiar Hermosillo como capital de riesgo [144a].



Vista de la PTAR Hermosillo. Fotografía: www.gob.mx

## Energía

Se planea alcance los 1650 kW, que serán destinados para cubrir entre el 40% y 60% de los requerimientos de energía eléctrica de la planta.

## Mitigación de GEI

Sin determinar.

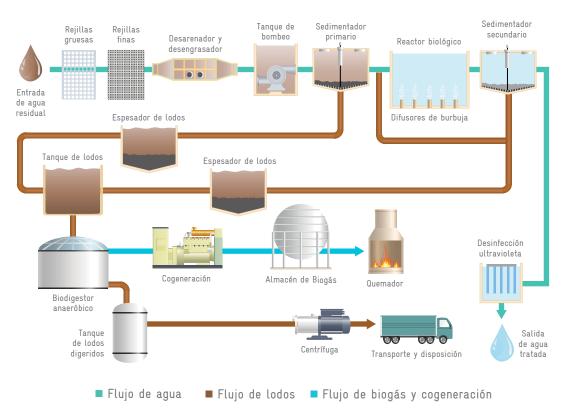


#### **Tratamiento**

- Cuenta con un tratamiento preliminar, con un desbaste grueso y fino, así como desengrasado y desarenado.
- Posteriormente un tratamiento primario en sedimentadores.
- El agua residual pasa al tratamiento secundario en reactores biológicos y después a sedimentadores secundarios para pasar al sistema final de desinfección con luz ultravioleta [30].

En el caso del tratamiento de lodos, pasarán por un espesador de lodos previo a su entrada al reactor anaeróbico, en donde se obtendrá el biogás, luego a una centrífuga para ser llevados a disposición final [30]. **GRÁFICO 28**.

#### GRÁFICO 28



Fuente: adaptado de [95].

El agua residual tratada es utilizada para el riego agrícola y se suministran 100 lps, en promedio, a una laguna recreativa ubicada al noroeste de la planta, misma que forma parte del proyecto municipal denominado Parque Metropolitano. Se contempla utilizar parte del caudal del agua tratada en recargas de acuíferos y usos urbanos [NUEVA NOTA].

Proyección de caudales del agua residual tratada y su reuso:

Volumen tratado: 78.8 millones de m³/año

Uso agrícola: 45.34 millones de m³/año

Uso recreativo (Parque Metropolitano): 6 millones de m<sup>3</sup>/año

Otros usos: 27.5 millones de m³/año (recarga de acuífero, industria, usos urbanos, etcétera)

# PTAR VILLA DE ÁLVAREZ COLIMA





Clarificador secundario de la PTAR Villa de Álvarez. Fotografía: IBTech.

Esta PTAR inició operaciones en 2007 con una capacidad máxima de 800 l/s y una ampliación posterior le permitió llegar a1200 l/s. En 2016 se reportó que trataba un caudal de 850 l/s con una carga en su afluente de 130 mg/l de SST y 150 mg/l de DBO [95].

El agua tratada en esta planta cumple con la calidad que establece la NOM-001-SEMARNAT-1996 para que pueda ser descargada en ríos o estuarios, ya que da resultados de 30 mg/l de SST y de 30 mg/l de DBO en su efluente [78].

## Aspectos financieros

La ampliación de la planta, para llevarla de 800 l/s a 1200 l/s y el sistema de biodigestión anaeróbica de los lodos, requirieron una inversión de 246 millones de pesos, de los cuales el 70% fueron financiados por CONAGUA y el resto por el gobierno del Estado, a través de la Comisión Intermunicipal de Agua Potable y Alcantarillado de Colima y Villa de Álvarez, Colima [78].

#### Energía

Esta planta tiene una generación de 3000 m³/día de biogás por la biodigestión anaeróbica de sus lodos primarios y una generación de energía de 257 kWh/h [95].

### Mitigación de GEI

Según estimaciones esta PTAR tiene un potencial de reducción de emisiones de 1633 toneladas de CO<sub>2</sub>eq/año, al sustituir su consumo energético por la electricidad producida del biogás que genera [95].

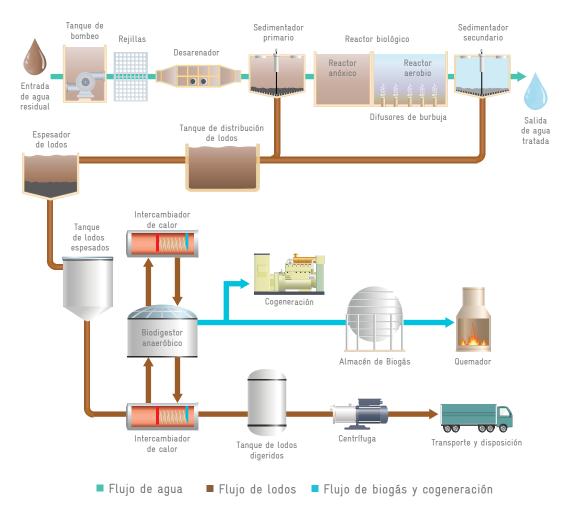
#### **Tratamiento**

En el tratamiento preliminar esta PTAR cuenta con rejillas gruesas, además de un desarenador.

Posteriormente cuenta con un sedimentador primario y tres tanques de aireación, después el agua residual pasa a un sedimentador secundario, y finalmente el agua se envía a un río [95].

El tren de tratamiento de lodos es diferente para los distintos tipos de lodos, los secundarios y del tanque de aireación son espesados y transportados a campos de cultivo; mientras que los primarios son tratados por vía anaeróbica, generando el biogás [95] **GRÁFICO 29**.

### GRÁFICO 29



Fuente: adaptado de [95].

# PTAR LA PURÍSIMA GUANAJUATO



Esta PTAR fue diseñada para tratar 250 l/s. En 2015, su caudal de operación fue de 141 l/s, con una carga en su afluente de 190 mg/l de SST y de 266 mg/l de DBO [95].

Las aguas residuales tratadas son mayoritariamente devueltas a los cauces y se usan para el riego de cultivos [81].

En 2014 se inauguró el sistema de cogeneración de electricidad de esta planta [81].

## Aspectos financieros

La inversión para su construcción y operación ascendió a 115.9 millones de pesos que fueron provistos por el Fondo Metropolitano desde la etapa de diseño del proyecto hasta su operación, además, el sistema de cogeneración permite reducir costos de hasta 2 millones de pesos por la producción de energía [81].

## Energía

Posee un sistema de cogeneración de electricidad y el biogás es aprovechado para generar 4838 kW/día y así, abastecer una parte de los motores de la planta y suministrar energía calorífica para el calentamiento de los digestores [81].

## Mitigación de GEI

De acuerdo a estimaciones tiene un potencial de reducción de emisiones de 440.17 toneladas anuales de  $CO_2$ eq [95].



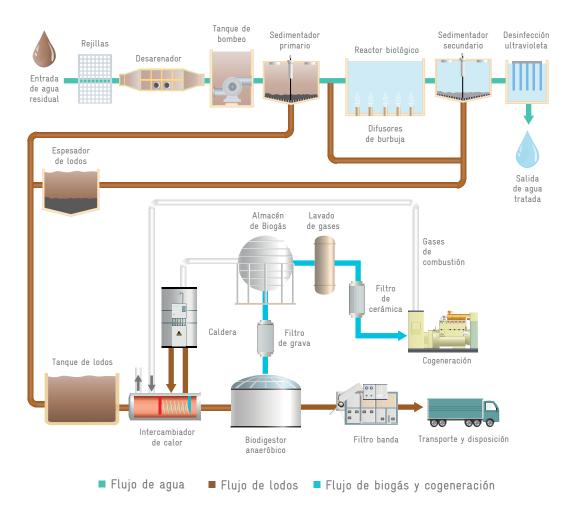
Vista de una sección de la PTAR La Purísima.
Fotografía: IBTech.

#### **Tratamiento**

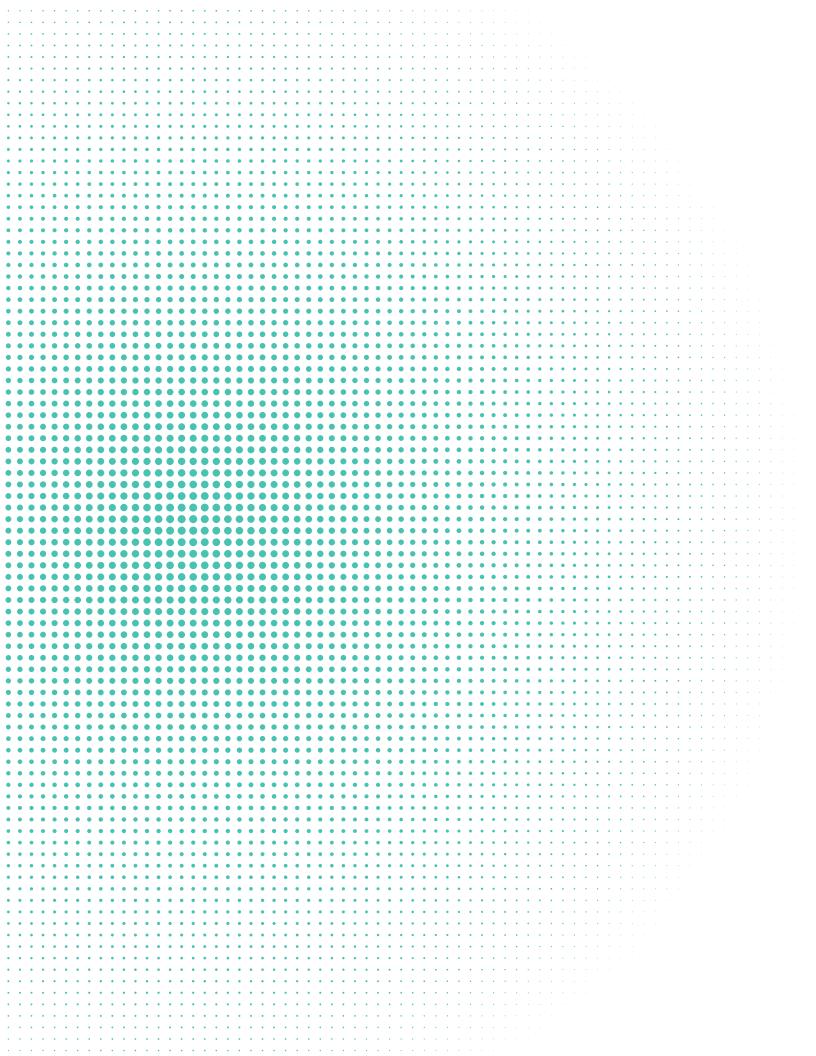
- Esta PTAR cuenta con rejillas gruesas y medianas, además de un desarenador en el tratamiento preliminar. En el tratamiento primario cuenta con un sedimentador primario.
- En el tratamiento secundario el agua residual pasa a los reactores biológicos, después a un sedimentador secundario, finalmente la desinfección se lleva a cabo con luz ultravioleta para poderse verter a un río [95].

En el tren de tratamiento de lodos, los lodos secundarios son espesados y junto con los primarios son llevados al digestor anaeróbico, previo a esto, los lodos son expuestos a aire caliente proveniente de la combustión del CH<sub>4</sub> producido [95]. **GRÁFICO 30**.

#### GRÁFICO 30



Fuente: adaptado de [95].



En México se generan anualmente 44.6 Mt de residuos sólidos urbanos [102], de las cuales podrían usarse hasta 14 Mt con fines de aprovechamiento energético, lo que representa una gran área de oportunidad en cuanto al potencial de energía que puede ser producida con las tecnologías mencionadas en esta publicación. México cuenta con un potencial técnico de generación energética de hasta 29 PJ dependiendo del uso que se le dé al biogás para aprovecharlo energéticamente [110a].

Así mismo, el país adquirió en la COP21 el compromiso para 2030, de reducir su generación de GEI asociados al sector residuos en 28.6% y 65% en la generación eléctrica a partir de fuentes fósiles; por lo que es necesario dar mayor impulso a las tecnologías de aprovechamiento energético de residuos mediante los instrumentos financieros y jurídicos existentes, así como mejorar y vincular las regulaciones que se encarguen de fomentar este tipo de proyectos.

El aprovechamiento energético de residuos demuestra ser una opción viable y sostenible para la gestión de residuos urbanos, llegando a reducir las emisiones de GEI hasta en 1.9 Mt CO<sub>2</sub>eq al año por generación eléctrica, además de tener un potencial de mitigación indirecto de 11.7 Mt CO<sub>2</sub>eq por lograr evitar llevar a disposición final 14 Mt de residuos orgánicos [110a].

Entre los múltiples beneficios asociados a la implementación del aprovechamiento energético de residuos, se encuentran:

- La optimización del manejo y gestión integral de los residuos.
- La diversificación de fuentes de energía sustituyendo combustibles fósiles.
- La disminución de residuos llevados a disposición final.

Este último factor alarga la vida útil del relleno sanitario y genera beneficios indirectos, como evitar el deterioro de la salud de la población cercana a los sitios de disposición final o disminuir la proliferación de plagas y de vectores biológicos. También genera un ahorro económico para el municipio, al reducir los gastos de gestión de los residuos.

A pesar de que algunos proyectos han enfrentado dificultades para su continuidad, operación o mantenimiento, todos han tenido un gran impacto para el aprendizaje que involucra a las autoridades, en especial para crear un vínculo con ellas para analizar el potencial de expansión de las tecnologías y áreas de oportunidad para mejorarlos.

Varios proyectos se encuentran bajo un modelo de asociación público-privada, esto ha permitido superar algunas barreras que usualmente se enfrentan para el aprovechamiento energético de los residuos, entre estas barreras destacan la corta duración de los periodos de gobernanza municipal, los trámites para la formalización de los proyectos y la disponibilidad de los recursos financieros.

Los objetivos de implementar el aprovechamiento energético de residuos son transitar hacia una economía circular que reduzca la necesidad de extraer recursos naturales y minimizar al máximo la generación de residuos que contaminen el aire, el agua o el suelo. El modelo de economía circular construye los cimientos de un sistema innovador, de una resiliencia a largo plazo; a la par que disminuye impactos negativos, además de favorecer el comercio y las oportunidades económicas [66a] [112].

México avanza, ha expedido un marco normativo con el que introduce una reforma en su mercado energético y define las condiciones para la promoción de las energías limpias o renovables. Estas reformas facilitan la participación de diferentes generadores en el mercado de energía y promueven un esquema enfocado en crear un mercado de energías limpias o renovables [3]; sin embargo, se debe trabajar en la inclusión del aprovechamiento energético en la cadena de valor de la gestión de residuos, así como en la responsabilidad extendida del productor y enfocar las políticas públicas hacia una economía circular [104].

- [1] Acciona Agua (s/f). EDAR Atotonilco. Consultado el 31 de enero de 2018 en: http://www.acciona-agua.com/es/areas-de-actividad/proyectos/dc-de-plantas-de-tratamiento-de-agua/edar/atotonilco/
- [2] Agencia Reforma (2012, Septiembre 21). *Generarán energía eléctrica con basura*. El Mañana. Consultado el 15 de enero del 2018 en: <a href="http://www.elmanana.com/generaranenergiaelectricaconbasura-1780407.html">http://www.elmanana.com/generaranenergiaelectricaconbasura-1780407.html</a>
- [3] Alarcón, Pablo, Correal, Magda, Villegas, Felipe, Rebollo, Daniel, Laguna, Andrea y Acosta, Salvador. (2017, Julio). *Análisis de instrumentos de política pública para estimular la valorización energética de residuos urbanos en México y propuestas para mejorarlos y ampliarlos*. GIZ México. Consultado el 17 de agosto de 2018 en: <a href="https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/275833/ENRES\_ANALISIS\_DE\_INSTRUMENTOS\_10\_2017\_\_4MB\_.pdf">https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/275833/ENRES\_ANALISIS\_DE\_INSTRUMENTOS\_10\_2017\_\_4MB\_.pdf</a>
- [4] Aldaz, Phenélope. (2016, Octubre 17). Exporta CDMX nopal de alta calidad a Europa y EU. El Universal. Consultado el 27 de febrero del 2018 en: http://www.eluniversal.com.mx/articulo/metropoli/cdmx/2016/10/17/exporta-cdmx-nopal-de-alta-calidad-europa-y-eu
- [5] Arvizu Fernández, J., Huacuz-Villamar, J., Saldaña-Méndez, J. (2006). Evaluación del potencial energético de los rellenos sanitarios. Revista AIDIS de Ingenieria y Ciencias Ambientales, Investigación, desarrollo y práctica. Volumen 1, Número 1. Consultado el 15 de enero del 2018 en: <a href="http://www.journals.unam.mx/index.php/aidis/article/view/14446/13781">http://www.journals.unam.mx/index.php/aidis/article/view/14446/13781</a>
- [6] Ayuntamiento Constitucional de Atlacomulco 2013-2015. (2013, Junio). Centro de Operación y Manejo Integral de Residuos Sólidos Urbanos. Intermunicipalidad Región II Atlacomulco. Consultado el 27 de febrero del 2018 en:

  https://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwi0vIDsmZzYAhWGPiYKHTXNCC80FggpMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.ipomex.org.mx%2Fipo%2Farchivos%2FdownloadAttach%2F466338.web%3Bjsessionid%3DDF67716D3DD572BA9DB6C15879801369&usg=A0vVaw1\_B180Btuengf-wGYwbm9B
- [7] Ayuntamiento Constitucional de Atlacomulco. (2013, Diciembre 13). Comunicado no. 72- Atlacomulco será punta de lanza con su Centro de operación y manejo integral de residuos sólidos urbanos. IPOMEX. Consultado el 27 de febrero del 2018 en: http://www.ipomex.org.mx/ipo/archivos/downloadAttach/239331.web;jsessionid
- [8] Bachmann, Nathalie, Jansen, J., Baxter, David, Bochmann, Günther y Montpart, Nuria. (2015). Sustainable Biogas Production in Municipal Wastewater Treatment Plants. IEA Bioenergy. Consultado el 15 de enero de 2018 en: <a href="https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/sustainable-biogas-production-municipal-wastewater-treatment-plants">https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/sustainable-biogas-production-municipal-wastewater-treatment-plants</a>
- [9] BENLESA. (2007). Monterrey III: Proyecto de ampliación de generación de energía eléctrica a través de la basura. Consultado el 6 de marzo de 2018 en: <a href="http://www.cca.org.mx/ps/funcionarios/muniapp/descargas/Documentos\_de\_apoyo/otros/Benlesa-Simeprode\_Proyecto\_Mty\_III.pdf">http://www.cca.org.mx/ps/funcionarios/muniapp/descargas/Documentos\_de\_apoyo/otros/Benlesa-Simeprode\_Proyecto\_Mty\_III.pdf</a>
- [10] Biogás de Juárez. (2007). PROCESOS-FASE I: Extracción y Quema de Biogás. Consultado el 15 de enero del 2018 en: <a href="http://bva.colech.edu.mx/xmlui/bitstream/handle/1/1447/en017.pdf?sequence=1">http://bva.colech.edu.mx/xmlui/bitstream/handle/1/1447/en017.pdf?sequence=1</a>
- [11] BNamericas (s/f). Planta de Tratamiento de Aguas Residuales El Ahogado.

  Consultado el 29 de enero de 2018 en:

  <a href="https://www.bnamericas.com/project-profile/es/el-ahogado-wastewater-treatment-plant-ptar-el-ahogado">https://www.bnamericas.com/project-profile/es/el-ahogado-wastewater-treatment-plant-ptar-el-ahogado</a>
- [12] Calderón Hinojosa, Felipe. (2011, Mayo 20). El Presidente Calderón Durante la Inauguración de la Planta Biogás de Juárez. Presidencia de la República. Consultado el 15 de enero del 2018 en: <a href="http://calderon.presidencia.gob.mx/2011/05/el-presidente-calderon-durante-la-inauguracion-de-la-planta-biogas-de-juarez/">http://calderon.presidencia.gob.mx/2011/05/el-presidente-calderon-durante-la-inauguracion-de-la-planta-biogas-de-juarez/</a>
- [13] Camacho, Zósimo. (s/f). *Holcim Apasco: cementera sustentable*. Revista Fortuna. Negocios. Consultado el 9 de enero de 2018 en: <a href="http://www.revistafortuna.com.mx/opciones/archivo/2005/junio/html/negocios/holcim.htm">http://www.revistafortuna.com.mx/opciones/archivo/2005/junio/html/negocios/holcim.htm</a>

- [14] Cantera, Sara. (2016, Julio 21). Holcim crea empresa de reciclaje de residuos. El Universal. Transición 2018. Consultado el 9 de enero de 2018 en: <a href="http://www.eluniversal.com.mx/articulo/cartera/finanzas/2016/07/21/holcim-crea-empresa-de-reciclaje-de-residuos">http://www.eluniversal.com.mx/articulo/cartera/finanzas/2016/07/21/holcim-crea-empresa-de-reciclaje-de-residuos</a>
- [15] Castells, Xavier E. (2012, Octubre 10). Valoración de residuos procedentes de grandes industrias: Reciclaje de residuos industriales. Ediciones Díaz de Santos. Consultado el 15 de enero del 2018 en: <a href="https://books.google.com.mx/books?id=P--\_o0y7iq8C&dq">https://books.google.com.mx/books?id=P--\_o0y7iq8C&dq</a>
- [16] CDM. (2006, Mayo 2). Project 0425: Aguascalientes EcoMethane Landfill Gas to Energy Project. CMNUCC. Consultado el 15 de enero del 2018 en: https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/DNV-CUK1146574758.66/view
- [17] CDM. (2007, Octubre 11). Project 1307: Durango EcoMethane Landfill Gas to Energy Project. CMNUCC. Consultado el 15 de enero del 2018 en: http://cdm.unfccc.int/Projects/DB/SGS-UKL1187967518.97/view
- [18] CDM. (2009, Febrero 6). Project 2186: Monterrey II LFG to Energy Project. CMNUCC. Consultado el 15 de enero del 2018 en: https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/TUEV-SUED1218649599.31/view
- [19] CDM. (2011, Noviembre 20). Lorean Saltillo's Landfill Gas to Energy Project. CMNUCC. Consultado el 15 de enero del 2018 en: <a href="https://cdm.unfcoc.int/Projects/Validation/DB/2MHFYFV1REDWGGVHCI5590VT8FMMAZ/view.html">https://cdm.unfcoc.int/Projects/Validation/DB/2MHFYFV1REDWGGVHCI5590VT8FMMAZ/view.html</a>
- [20] CDM. (2012, Julio 10). *Project 6867: Querétaro landfill-gas-to-energy project*. CMNUCC. Consultado el 15 de enero del 2018 en: <a href="https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/TUEV-RHEIN1343246958.89/view">https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/TUEV-RHEIN1343246958.89/view</a>
- [21] CDM. (2013, Marzo 13). Project 1123: Ciudad Juarez Landfill Gas to Energy Project. CMNUCC. Consultado el 15 de enero del 2018 en: <a href="https://cdm.unfocc.int/Projects/DB/TUEV-SUED1179241731.11/view?cp=1">https://cdm.unfocc.int/Projects/DB/TUEV-SUED1179241731.11/view?cp=1</a>
- [22] CDM. (2013, Junio 11). Project 9686: Puerto Chivos Landfill Gas Project. CMNUCC. Consultado el 15 de enero del 2018 en: https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/TUEV-RHEIN1373959704.23/view
- [23] CDM. (2014, Octubre 14). *Project 10102: Merida Municipal Solid Waste to Energy.* CMNUCC. Consultado el 27 de febrero del 2018 en: <a href="https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/DNV-CUK1420812458.26/view">https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/DNV-CUK1420812458.26/view</a>
- [24] CEA Jalisco. (2014, Julio 22). *Agua Prieta, una obra histórica para Jalisco*. Boletín No. 111. Consultado el 25 de enero de 2018 en: <a href="http://www.ceajalisco.gob.mx/notas/2014/bol111\_agua\_prieta.html">http://www.ceajalisco.gob.mx/notas/2014/bol111\_agua\_prieta.html</a>
- [25] CEMBUREAU. EU. (2009, Enero 1). Sustainable cement production co-processing of alternative fuels and raw materials in the European cement industry. CTCN, Climate Technology Centre & Networks. Connecting Countries to Climate Technology Solutions. Consultado el 9 de enero de 2018 en: <a href="https://www.ctc-n.org/resources/sustainable-cement-production-co-processing-alternative-fuels-and-raw-materials-european">https://www.ctc-n.org/resources/sustainable-cement-production-co-processing-alternative-fuels-and-raw-materials-european</a>
- [26] CEMEX. (2014, Abril 4). CEMEX en México Combustibles Alternos FIRSU.
  Consultado el 9 de enero de 2018 en:
  <a href="https://www.youtube.com/watch?v=8v0F530TBa0">https://www.youtube.com/watch?v=8v0F530TBa0</a>
- [27] CEMEX. (2014, Junio 9). Reconocen estrategia ambiental de CEMEX México.

  Consultado el 20 de diciembre de 2017 en:

  https://www.cemexmexico.com/hu/-/reconocen-estrategia-ambiental-de-cemex-mexico
- [28] Cerbón, Mónica. (2015, Octubre 20). En tres años, no ha recibido municipio regalías por venta de biogás. La Jornada Aguascalientes. Sociedad y Justicia. Consultado el 15 de enero del 2018 en: <a href="http://www.lja.mx/2015/10/en-tres-anos-no-ha-recibido-municipio-regalias-por-venta-de-biogas/">http://www.lja.mx/2015/10/en-tres-anos-no-ha-recibido-municipio-regalias-por-venta-de-biogas/</a>

- [29] Clemente Reyes, Abel y Estradas Romero, Ricardo. (2015, Octubre 8). Planta de Biodigestión Atlacomulco, Estado de México. Foro Internacional 2015 Valorización Energética de Residuos Urbanos Experiencias y estrategias globales. Consultado el 27 de febrero del 2018 en: <a href="http://foroenres2015.mx/20\_0810\_ForoEnRes\_Abel\_Clemente.pdf">http://foroenres2015.mx/20\_0810\_ForoEnRes\_Abel\_Clemente.pdf</a>
- [30] COCEF. (2011, Marzo 8). Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza Proyecto de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Ciudad de Hermosillo, Sonora. Consultado el 31 de enero de 2018 en: http://server.cocef.org/Certproj/Spa/BD%202011-08%20Hermosillo%20WWTP%20 Certification%20Document%20\_Span\_.pdf
- [31] COCEF. (2013, Mayo 5). Propuesta de Certificación y Financiamiento: Proyecto de Lorean para convertir biogás a energía en el relleno sanitario de Saltillo, Coahuila. Consultado el 15 de enero del 2018 en: <a href="http://server.cocef.org/CertProj/Spa/BD%202013-14%20Saltillo%20LFG%20Project%20Proposal%20(Span)\_REV.pdf">http://server.cocef.org/CertProj/Spa/BD%202013-14%20Saltillo%20LFG%20Project%20Proposal%20(Span)\_REV.pdf</a>
- [32] COCEF e Incremi. (s/f). Estudio de factibilidad para el aprovechamiento del metano en el relleno sanitario municipal de Saltillo, Coahuila. Consultado el 15 de enero del 2018 en: https://www.globalmethane.org/Data/221\_INFORME\_FINAL\_SALTILLO.pdf
- [33] COEES. Sonora. (s/f). Guía para solicitar permisos de generación, exportación e importación de energía eléctrica. Consultado el 15 de enero del 2018 en: http://www.coees.sonora.gob.mx/images/descargas/Energias-Renovables/Guia-para-solicitar-permisos-de-Generacion,-Exportacion-e-Importacion-de-Energia-Electrica.pdf
- [34] CONAGUA. (2011, Febrero 14). Proyectos estratégicos de agua potable, drenaje y saneamiento. Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento, Gerencia de Estudios y Proyectos de agua potable y redes de alcantarillado. Consultado el 29 de enero de 2018 en: <a href="http://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/infraestructurahidraulica/">http://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/infraestructurahidraulica/</a> presentaciones\_2008/SeguimientoPNI\_14-02-11.pdf
- [35] CONAGUA. (2012). Atlas del Agua en México 2012. Edición SEMARNAT. Consultado el 15 de enero de 2018 en: <a href="http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGP-36-12.pdf">http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGP-36-12.pdf</a>
- [36] CONAGUA. (2016, Abril). Anexo técnico del Programa Tratamiento de Aguas Residuales (PROSAN): Incentivos al tratamiento de aguas residuales; Ejercicio fiscal 2016. Consultado el 19 de julio de 2018 en: <a href="https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/106202/ATECPROSANINC20160R0.pdf">https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/106202/ATECPROSANINC20160R0.pdf</a>
- [37] CONAGUA. (2015, Diciembre). Atlas del Agua en México 2015. Edición SEMARNAT. Consultado el 15 de enero de 2018 en: http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/ATLAS2015.pdf
- [38] CONAGUA. (2016, Octubre). Atlas del Agua en México 2016. Edición SEMARNAT. Consultado el 15 de enero de 2018 en: <a href="http://201.116.60.25/publicaciones/AAM\_2016.pdf">http://201.116.60.25/publicaciones/AAM\_2016.pdf</a>
- [39] CONAGUA. (2016, Octubre). Estadísticas del Agua en México, Edición 2016. SEMARNAT. Consultado el 9 de enero de 2018 en: http://201.116.60.25/publicaciones/eam\_2016.pdf
- [40] CONAGUA. (2016, Octubre 19). Planta de tratamiento de aguas residuales Atotonilco participa en Reto Mundial del Agua 2016. World Water Challenge 2016. Gobierno Federal. Consultado el 31 de enero de 2018 en: https://www.gob.mx/conagua/articulos/planta-de-tratamiento-de-aguas-residuales-atotonilco-participa-en-reto-mundial-del-agua-2016?idiom=es
- [41] CONAGUA. (2016, Noviembre). Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento, Edición 2016. SEMARNAT. Consultado el 16 de enero de 2018 en: http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/184667/DSAPAS\_2016\_web\_Parte1.pdf

- [42] CONAGUA. (2017, Diciembre 08). CONAGUA y Gobierno de Nuevo León firman plan hídrico para incrementar abasto de agua. Comunicado de prensa No. 748-17. Consultado el 29 de enero de 2018 en: <a href="https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/279306/Comunicado\_de\_Prensa\_748-17.pdf">https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/279306/Comunicado\_de\_Prensa\_748-17.pdf</a>
- [43] CONAGUA, Prensa. (2014, Marzo 9). 85% de avance en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, Atotonilco. Gobierno Federal. Consultado el 31 de enero de 2018 en:

  https://www.gob.mx/conagua/prensa/85-de-avance-en-la-planta-de-tratamiento-de-aguas-residuales-atotonilco
- [44] CONAGUA, SEMARNAT (s/f). *Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Atotonilco*. Consultado el 31 de enero de 2018 en: <a href="http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAPDS-19-11.pdf">http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAPDS-19-11.pdf</a>
- [45] Cooperativa La Cruz Azul, S.C.L. (2008, Julio). Comunicación sobre el progreso: El Pacto Mundial / Julio 2008. Consultado el 9 de enero de 2018 en: https://www.unglobalcompact.org/system/attachments/4012/original/COP.pdf?1262614939
- [46] Cooperativa La Cruz Azul, S.C.L. (2017). Comunicación sobre el progreso 2016. Edición Enero-Diciembre 2016. Consultado el 27 de febrero de 2018 en: https://cementocruzazul.com.mx/wp-content/uploads/2018/02/COP-2016-2017.pdf
- [47] Coordinación General de Cambio Climático y Desarrollo Bajo en Carbono, SEMARNAT. (2018). *Emisión Nacional de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero*. INECC. Consultado el 24 de enero de 2018 en: <a href="http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/compartidos/pdf/COM\_EMISCO2.pdf">http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/compartidos/pdf/COM\_EMISCO2.pdf</a>
- [48] Corona Zúñiga, Iván. (2007, Diciembre). *Biodigestores. Monografia*. Tesis Ingeniería Industrial. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería. Consultado el 27 de febrero del 2018 en: <a href="http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/bitstream/handle/231104/362/Biodigestores.pdf?sequence=1&isAllowed=y">http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/bitstream/handle/231104/362/Biodigestores.pdf?sequence=1&isAllowed=y</a>
- [49] CRE. (1997, Agosto 15). Título de permiso de autoabastecimiento de energía eléctrica- Número E/059/AUT/97- Otorgado a Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, Institución Pública Descentralizada del Gobierno del Estado de Nuevo León "Planta Norte". Consultado el 2 de marzo de 2018 en: www.cre.gob.mx/documento/permiso/electricidad/E-59-AUT-97.pdf
- [50] CRE. (2002, Octubre 23). Título de permiso de cogeneración de energía eléctrica-Número E/217/COG/2002- Otorgado a Bioenergía de Nuevo León, S.A. de C.V. Consultado el 15 de enero del 2018 en: <a href="http://www.cre.gob.mx/documento/permiso/electricidad/E-217-COG-2002.pdf">http://www.cre.gob.mx/documento/permiso/electricidad/E-217-COG-2002.pdf</a>
- [51] CRE. (2009, Junio 11). Título de permiso de autoabastecimiento de energía eléctrica- Número E/825/AUT/2009- Otorgado a Transformadora de Energía Eléctrica de Juárez, S.A. de C.V. En términos de la Resolución Núm. RES/121/2009. Consultado el 15 de enero del 2018 en. http://www.cre.gob.mx/documento/permiso/electricidad/E-825-AUT-2009.pdf
- [52] CRE. (2010, Marzo 25). Título de permiso de autoabastecimiento de energía eléctrica- Número E/847/AUT/2010- Otorgado a Sociedad Autoabastecedora de Energía Verde de Aguascalientes, S. de R.L. de C.V. En términos de la Resolución RES/073/2010. Consultado el 15 de enero del 2018 en: http://www.cre.gob.mx/documento/permiso/electricidad/E-847-AUT-2010.pdf
- [53] CRE. (2010, Junio 3). Título de permiso de cogeneración de energía eléctrica-Número E/854/COG/2010- Otorgado a Atlatec, S.A. de C.V. En términos de la Resolución RES/152/2010. Consultado el 30 de enero de 2018 en: www.cre.gob.mx/documento/permiso/electricidad/E-854-C0G-2010.pdf
- [54] CRE. (2012, Noviembre 1). Título de permiso de autoabastecimiento de energía eléctrica- Número E/958/AUT/2012- Otorgado a Lorean Energy Group, S.A.P.I. de C.V. En términos de la Resolución RES/398/2012. Consultado el 15 de enero del 2018 en: http://www.cre.gob.mx/documento/permiso/electricidad/E-958-AUT-2012.pdf

- [55] CRE. (2012, Noviembre 22). Título de permiso de autoabastecimiento de energía eléctrica- Número E/962/AUT/2012- Otorgado a TMQ Generación Energía Renovable, S.A.P.I. de C.V. En términos de la Resolución RES/423/2012. Consultado el 15 de enero del 2018 en: http://www.cre.gob.mx/documento/permiso/electricidad/E-962-AUT-2012.pdf
- [56] CRE. (2013, Abril 11). Título de permiso de pequeña producción de energía eléctrica. Número E/991/PP/2013- Otorgado a ENER-G, S.A. de C.V. En términos de la Resolución RES/129/2013. Consultado el 15 de enero del 2018 en: <a href="http://www.cre.gob.mx/documento/permiso/electricidad/E-991-PP-2013.pdf">http://www.cre.gob.mx/documento/permiso/electricidad/E-991-PP-2013.pdf</a>
- [57] CRE. (2013, Octubre 3). Título de permiso de pequeña producción de energía eléctrica. Número E/1033/PP/2013- Otorgado a Énergreen Energía PI, S.A. de C.V. En términos de la Resolución RES/394/2013. Consultado el 15 de enero del 2018 en: <a href="http://www.cre.gob.mx/documento/permiso/electricidad/E-1033-PP-2013.pdf">http://www.cre.gob.mx/documento/permiso/electricidad/E-1033-PP-2013.pdf</a>
- [58] CRE. (2016). Tabla de Permisos de Generación e Importación de Energía Eléctrica administrados al 30 de junio de 2016. Consultado el 26 de enero de 2018 en: <a href="http://www.cre.gob.mx/documento/1814.xlsx">http://www.cre.gob.mx/documento/1814.xlsx</a>
- [59] Csegrecorder. (2013). *Planta de tratamiento de aguas residuales*. Consultada en: <a href="http://csegrecorder.com/assets/images/features/2013-09-science-break-02.jpg">http://csegrecorder.com/assets/images/features/2013-09-science-break-02.jpg</a>
- [60] Dávila, José L. (2009, Marzo 26). Biogas de Rellenos Sanitarios Generalidades. Methane to Markets. Consultado el 15 de enero del 2018 en: <a href="https://www.globalmethane.org/documents/events\_land\_20090326\_landfill-26mar09\_landfill\_gas\_collection\_systems\_jose\_luis\_davila.pdf">https://www.globalmethane.org/documents/events\_land\_20090326\_landfill-26mar09\_landfill\_gas\_collection\_systems\_jose\_luis\_davila.pdf</a>
- [61] Deublein, Dieter y Steinhauser, Angelika. (2008). Biogas from waste and renewable resources: An Introduction. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA. Consultado el 15 de enero de 2018 en: http://www.zorg-biogas.com/upload/book\_biogas\_plant.pdf
- [62] Diario de Yucatán. (2014, Septiembre 30). Se inaugura planta de reciclaje y generación de energía. Mérida. Medio Ambiente. Consultado el 27 de febrero del 2018 en: http://yucatan.com.mx/merida/medio-ambiente-merida/se-inaugura-planta-de-reciclaje-y-generacion-de-energia
- [63] El Diario de Coahuila. (2009, Febrero 27). Limpia Saltillo casi 100% del agua residual; Lo aplaude el presidente Calderón. El Diario de Coahuila, Locales. Consultado el 30 de enero de 2018 en: http://www.eldiariodecoahuila.com.mx/locales/2009/2/27/limpia-saltillo-casi-100-agua-residual-aplaude-presidente-calderon-129632.html
- [64] El Diario de Coahuila. (2011, Septiembre 28). Lorean Energy generará electricidad en Saltillo. El Diario de Coahuila, Locales. Consultado el 15 de enero del 2018 en: <a href="http://www.eldiariodecoahuila.com.mx/locales/2011/9/28/lorean-energy-generara-electricidad-saltillo-255618.html">http://www.eldiariodecoahuila.com.mx/locales/2011/9/28/lorean-energy-generara-electricidad-saltillo-255618.html</a>
- [65] El Siglo de Durango. (2013, Julio 26). *Producirán electricidad de la basura*. Consultado el 15 de enero del 2018 en: <a href="http://www.elsiglodedurango.com.mx/noticia/451796.produciran-electricidad-de-la-basura.html">http://www.elsiglodedurango.com.mx/noticia/451796.produciran-electricidad-de-la-basura.html</a>
- [66] El Siglo de Durango. (2014, Septiembre 15). Durango recibe Premio al Gobierno Local Sustentable 2014. Consultado el 15 de enero del 2018 en: https://www.elsiglodedurango.com.mx/noticia/541661.durango-recibe-premio-al-gobierno-local-sustentable-2014.html
- [66a] Ellen MacArthur Foundation. (2017). Concept. What is a circular economy? A framework for an economy that is restorative and regenerative by design. Overview. Circular Economy. Consultado el 17 de mayo de 2018 en: <a href="https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/overview/concept">https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/overview/concept</a>
- [67] EPA, COCEF e ICMA. (2011). Guía para el Aprovechamiento o Quema del Biogás en Rellenos Sanitarios. Consultado el 15 de enero del 2018 en: http://www.icmaml.org/wp-content/uploads/2014/07/Guia-Aprovechamiento-o-Quema-Biogas-EPA-COCEF-ICMA-Septiembre-2011.pdf

- [68] Fideicomiso de Riesgo Compartido. Blog. (2016, Agosto 3). Sistemas de Biodigestión. Gobierno de México. Consultado el 27 de febrero del 2018 en: <a href="https://www.gob.mx/firco/articulos/sistemas-de-biodigestion?idiom=es">https://www.gob.mx/firco/articulos/sistemas-de-biodigestion?idiom=es</a>
- [69] FIRCO. (2012). Diagnóstico General de la Situación Actual de los Sistemas de Biodigestión en México. SAGARPA. Consultado el 27 de febrero del 2018 en: http://ecotec.unam.mx/Ecotec//wp-content/uploads/Diagnostico-Nacional-de-los-Sistemas-de-Biodigestion.pdf
- [70] Flores Vargas, R. (2008, junio 14). Unen esfuerzos UAEM y Atizapán de Zaragoza Relleno con futuro. Poder EdoMex. Consultado el 15 de enero del 2018 en: http://poderedomex.com/notas.asp?id=31929
- [71] FuturENVIRO. (2015, Noviembre). *PTAR Atotonilco (México D.F.) La planta de tratamiento de aguas residuales más grande de América Latina*. Edición Especial. Consultado el 31 de enero de 2018 en: <a href="http://www.futurenviro.com/digital-versions/REP2015/Atotonilco/files/assets/common/downloads/PTAR%20Atotonilco%20.pdf">http://www.futurenviro.com/digital-versions/REP2015/Atotonilco/files/assets/common/downloads/PTAR%20Atotonilco%20.pdf</a>
- [72] Gamboa Castañeda, Silvia. (2010, Abril 5). Número y localización de rellenos sanitarios, tiraderos de basura controlados, cantidad anual de basura que se deposita en los sitios y en caso de realizarse quemas de basura, número de eventos, duración y la cantidad de basura que se estima quemada anualmente. Secretaría de Servicios Públicos y Ecología. Consultado el 15 de enero del 2018 en: <a href="http://eservicios.aguascalientes.gob.mx/transparencia/TransparenciaSolicitudes/solicitudes/archivos/00008736\_05042010\_RESA.DOC">http://eservicios.aguascalientes.gob.mx/transparencia/TransparenciaSolicitudes/solicitudes/archivos/00008736\_05042010\_RESA.DOC</a>
- [73] Gibbs, Michael J., Soyka, Peter y Conneely, David. (2001). *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories CO2 Emissions from Cement Production*. IPCC. Consultado el 9 de enero de 2018 en: <a href="https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/">https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/</a>
- [74] Global Methane Initiative. (s/f). Preliminary Assessment for Landfill Biogas Project Opportunity: Cuautla-Morelos Landfill. Consultado el 15 de enero del 2018 en: <a href="https://www.globalmethane.org/projects/projectDetail.aspx?lD=239">https://www.globalmethane.org/projects/projectDetail.aspx?lD=239</a>
- [75] Gobierno de la República. (2015). *Intended Nationally Determined Contribution*. México. Consultado el 24 de enero de 2018 en: <a href="https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/162973/2015\_indc\_ing.pdf">https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/162973/2015\_indc\_ing.pdf</a>
- [76] Gobierno de la República. (2017). *Programa Especial de la Transición Energética* 2017-2018. Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018. Consultado en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/213322/PETE.pdf
- [77] Gobierno del Estado de Aguascalientes. (2009). Sistema de Indicadores Ambientales del Estado de Aguascalientes. SEMARNAT. Consultado el 15 de enero del 2018 en: <a href="http://www.aguascalientes.gob.mx/imae/Pdf/SistemaIndicadoresAmbientales.pdf">http://www.aguascalientes.gob.mx/imae/Pdf/SistemaIndicadoresAmbientales.pdf</a>
- [78] Gobierno del Estado de Colima. (2013, Marzo 22). Entrega MAM ampliación de la PTAR de Colima y VdeA. Consultado el 1 de febrero de 2018 en: https://gobiernocolima.blogspot.mx/2013/03/entrega-mam-ampliacion-de-la-ptar-de. html
- [79] Gobierno del Estado de Chihuahua. (2011, Junio 8). Foro: Soluciones para el desarrollo de energía renovable y eficiencia energética en regiones fronterizas. Consultado el 15 de enero del 2018 en: <a href="http://bva.colech.edu.mx/xmlui/bitstream/handle/1/1431/en015.pdf?sequence=1">http://bva.colech.edu.mx/xmlui/bitstream/handle/1/1431/en015.pdf?sequence=1</a>
- [80] Gobierno del Estado de Durango. (2016, Octubre 10). Necesario reducir y reciclar basura en Durango: SRNyMA. Consultado el 15 de enero del 2018 en: http://www.durango.gob.mx/noticias/necesario-reducir-y-reciclar-basura-en-durango-srnyma/
- [81] Gobierno del Estado de Guanajuato. (2014, Marzo 22). Inaugura El Gobernador, Miguel Márquez, El Sistema De Cogeneración De Energía De La Planta De Tratamiento De Aguas Residuales. Comunicación Social de Gobierno. Consultado el 1 de febrero de 2018 en:

- http://noticias.guanajuato.gob.mx/2014/03/inaugura-el-gobernador-miguel-marquez-el-sistema-de-cogeneracion-de-energia-de-la-planta-de-tratamiento-de-aguas-residuales/
- [82] Gobierno del Estado de Jalisco. (2016, Marzo 7). *Plantas de tratamiento han dejado de emitir casi 90 mil toneladas de dióxido de carbono.* Consultado el 25 de enero de 2018 en: <a href="http://www.jalisco.gob.mx/es/prensa/noticias/36462">http://www.jalisco.gob.mx/es/prensa/noticias/36462</a>
- [83] Gobierno Municipal Heroica Ciudad Juárez. (2015, Agosto 18). *Acta de Reunión de la Comisión de Ecología y Protección Civil del Día 18 de Agosto del 2015*. Consultado el 15 de enero del 2018 en: <a href="http://www.juarez.gob.mx/2015cf/transparencia/docs.php?file=13804560">http://www.juarez.gob.mx/2015cf/transparencia/docs.php?file=13804560</a>
- [83a] González Valenzuela, Manuel. (2015, abril 21). PTAR Atotonilco, La cuarta planta de tratamiento más grande del mundo. Tratamiento del Agua. ENEXIO 2H Water Technologies GmbH. Consultado el 15 de enero de 2018 en: <a href="http://www.tratamientodelagua.com.mx/ptar-atotonilco/">http://www.tratamientodelagua.com.mx/ptar-atotonilco/</a>
- [84] Grupo Funcional Desarrollo Económico. (2013). *Informe del Resultado de la Fiscalización Superior de la Cuenta Pública 2013*. SEMARNAT. Consultado el 27 de febrero del 2018 en: <a href="http://www.asf.gob.mx/Trans/Informes/IR2013i/Documentos/Auditorias/2013\_0162\_a.pdf">http://www.asf.gob.mx/Trans/Informes/IR2013i/Documentos/Auditorias/2013\_0162\_a.pdf</a>
- [85] H. Ayuntamiento de Atizapán de Zaragoza. (2009). 3er Informe de Gobierno. Consultado el 15 de enero del 2018 en:

  https://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=11&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiqufjU1YfYAhUTwWMKHUYLDesOFghiMAo&url=http%3A%2F%2Fwww.ipomex.org.mx%2Fipo%2Farchivos%2FdownloadAttach%2F12487.web%3Bjsessionid%3D636D06A637DF5842CA2C2825CC7232CD&usg=A0vVaw209AhS3YpTZm0wrtxa7iJK
- [86] H. Ayuntamiento de Atizapán de Zaragoza. (2017, Marzo 21). Invierte Atizapán de Zaragoza Más de 28MDP en Construcción de Macro Celda Sanitaria. Consultado el 15 de enero del 2018 en: https://www.atizapan.gob.mx/comunicacion-institucional/boletines/208-macro-celda-sanitaria
- [87] H. Ayuntamiento de Querétaro. (2010, Diciembre 14). Acuerdo Relativo al Aprovechamiento y Explotación del Biogás. Consultado el 15 de enero del 2018 en: http://compilacion.ordenjuridico.gob.mx/obtenerdoc.php?path=/Documentos/ESTADO/OUERETARO/TODOS%20LOS%20MUNICIPIOS/o1529823.doc&nombreclave=o1529823.doc
- [88] Hernández Márquez, Sergio. (2014, Julio 22). Inauguran la planta de tratamiento más grande de México. Verdebandera Periodismo Ambiental. Consultado el 23 de enero de 2018 en: <a href="http://verdebandera.mx/inauguran-en-guadalajara-la-planta-de-tratamiento-de-aguas-negras-mas-grande-del-pais/">http://verdebandera.mx/inauguran-en-guadalajara-la-planta-de-tratamiento-de-aguas-negras-mas-grande-del-pais/</a>
- [89] Hernández Rodríguez, Carol. (2009, Octubre 15). Captura y aprovechamiento del biogas de los rellenos sanitarios "San Nicolás" y "Las Cumbres" del municipio de Aguascalientes, Aguascalientes, México. Institute for Research and Debate on Governance. Consultado el 15 de enero del 2018 en: <a href="http://www.institut-gouvernance.org/en/analyse/fiche-analyse-441.html">http://www.institut-gouvernance.org/en/analyse/fiche-analyse-441.html</a>
- [90] Herrera, Edna. (2016, Abril 18). *Coprocesamiento, el camino a la sustentabilidad*. El Economista. Consultado el 9 de enero de 2018 en: https://www.eleconomista.com.mx/empresas/Coprocesamiento-el-camino-a-la-sustentabilidad-20160418-0047.html
- [91] Hildebrandt Gruppe (2015, Octubre 19). 4 Métodos de microcogeneración para edificios. Eficiencia Energética. Chile. Consultado el 19 de Julio de 2018 en: <a href="http://www.hildebrandt.cl/4-metodos-de-microcogeneracion-para-edificios/">http://www.hildebrandt.cl/4-metodos-de-microcogeneracion-para-edificios/</a>
- [92] Holcim. (2012). 4° Informe de Desarrollo Sustentable. Holcim México. Consultado el 9 de enero de 2018 en: https://www.holcim.com.mx/sites/mexico/files/atoms/files/cuarto\_informe\_de\_desarrollo\_sustentable\_holcim\_mexico.pdf
- [93] Holcim. (2015). *Ecoltec*. Consultado el 9 de enero de 2018 en: https://www.holcim.com.mx/geocycle

- [94] ICA Infraestructura (2013, Junio 5). *Planta de tratamiento de aguas residuales* "Atotonilco". Consultado el 31 de enero de 2018 en: <a href="http://www.cg-la.com/documents/LALF11/presentations/6.4.13StrategicAtotonilco.pdf">http://www.cg-la.com/documents/LALF11/presentations/6.4.13StrategicAtotonilco.pdf</a>
- [95] IMTA. (2016). Revisión y actualización del potencial de biomasa para generación de energía eléctrica a partir de plantas de tratamiento de aguas residuales presentado en el Inventario Nacional de Energías Renovables (INERE). Subcoordinación de Tratamiento de Aguas Residuales-Coordinación de Tratamiento y Calidad. México.
- [96] INECC. (2012). Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de Residuos 2012-Versión extensa. México. Consultado el 9 de enero de 2018 en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/187440/diagnostico\_basico\_ extenso\_2012.pdf
- [97] INECC. (2015). Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 2013. México. Consultado el 9 de enero de 2018 en: <a href="https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/110175/CGCCDBC\_2015\_Tabla\_inventario\_nacional\_GEyCEI\_2013.pdf">https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/110175/CGCCDBC\_2015\_Tabla\_inventario\_nacional\_GEyCEI\_2013.pdf</a>
- [98] INECC. (2015). Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 2015. México. Consultado el 16 de julio de 2018 en: https://datos.gob.mx/busca/dataset/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-ycompuestos-de-efecto-invernadero-inegycei
- [99] INECC. (2015, Mayo). Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero. Información de Interés Nacional. Consideraciones Metodológicas 1990-2012 y 2013. México. Consultado el 9 de enero de 2018 en: <a href="http://www.snieg.mx/DocAcervoINN/documentacion/inf\_nvo\_acervo/snigma/Inv\_Nal\_Gas\_Comp\_Efect\_Inver/IIN\_INEGEI\_1990-2013\_CN%202013\_%20Con\_Meto.pdf">http://www.snieg.mx/DocAcervoINN/documentacion/inf\_nvo\_acervo/snigma/Inv\_Nal\_Gas\_Comp\_Efect\_Inver/IIN\_INEGEI\_1990-2013\_CN%202013\_%20Con\_Meto.pdf</a>
- [100] INECC. (2018). Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero. México. Consultado el 9 de julio de 2018 en Tabla del INEGyCEI 1990 2015. Consultado en agosto de 2018 en: <a href="https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero">https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero</a>
- [101] INECC y SEMARNAT. (2015). Primer Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Consultado el 9 de enero de 2018 en: <a href="https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/40746/2015\_bur\_mexico.pdf">https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/40746/2015\_bur\_mexico.pdf</a>
- [102] INEGI. (2017). Anuario estadístico y geográfico de los Estados Unidos Mexicanos 2017. Consultado el 2 de octubre de 2018 en: <a href="http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva\_estruc/AEGEUM\_2017/702825097912.pdf">http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva\_estruc/AEGEUM\_2017/702825097912.pdf</a>
- [103] Instituto de Investigaciones Eléctricas. (2012, Octubre). *Guía de Usuario-Generación de electricidad mediante residuos sólidos urbanos*. Comisión Federal de Electricidad. Consultado el 15 de enero del 2018 en: <a href="http://www.olade.org/realo/docs/doc\_106229\_20170612115908.pdf">http://www.olade.org/realo/docs/doc\_106229\_20170612115908.pdf</a>
- [104] Jensen Velasco, Andrés. (2016, Octubre). Potencial para la valorización energética de residuos urbanos en México a través del coprocesamiento en hornos cementeros. EnRes. GIZ México. Consultado el 28 de febrero de 2018 en: <a href="https://www.giz.de/en/downloads/giz2016-es-EnRes-Potencial\_para\_la\_valorizacion\_energetica.pdf">https://www.giz.de/en/downloads/giz2016-es-EnRes-Potencial\_para\_la\_valorizacion\_energetica.pdf</a>
- [105] La Coperacha. (2015, Julio 20). *La Cruz Azul, a limpiar Morelos*. Consultado el 9 de enero de 2018 en: <a href="http://www.lacoperacha.org.mx/cruz-azul-limpiar-morelos.php">http://www.lacoperacha.org.mx/cruz-azul-limpiar-morelos.php</a>
- [106] La Perseverancia. (2018). Operadora de Ferrocarril y Manejo de Rellenos S.A de C.V. Consulta directa a personal del relleno sanitario.
- [107] Larr. (2010). Proyecto COAH-2010-C14-149646: Plan integral de reúso de las aguas residuales municipales tratadas (ARMT) de Saltillo, Ramos Arizpe y Arteaga-Anexo A: Información de la Planta Tratadora de Aguas Residuales (PTAR)

- Principal de Saltillo. Consultado el 30 de enero de 2018 en: http://www.larr.mx/02%20InformacionPTAR%20PrincipaSaltillo.pdf
- [108] Ley General de Cambio Climático. DOF 06/Junio/2012. http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC\_130718.pdf
- [109] López Hernández, Jorge E., Ramírez Higareda, Benly L., Gomes Cabral, Carolina B., y Morgan-Sagastume, Juan M. (2017, Julio). *Guía Técnica para el Manejo y Aprovechamiento de Biogás en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales.* EnRes. GIZ México. Consultado el 2 de marzo de 2018 en: <a href="https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/265430/Guia\_lodos\_2017.pdf">https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/265430/Guia\_lodos\_2017.pdf</a>
- [110] Martínez Arce, Evelyn, Daza, Diego, Tello-Espinoza, Pilar, Soulier-Faure, Martín y Terraza, Horacio. (2010). *Regional Evaluation on Urban Solid Waste Management in Latin America and the Caribbean: 2010 Report.* Consultado el 9 de enero de 2018 en: <a href="https://publications.iadb.org/handle/11319/3286">https://publications.iadb.org/handle/11319/3286</a>
- [110a] Mediavilla Merchán, Víctor. (2017). Waste-to-Energy in Mexico. EnRes. GIZ México. Consultado el 19 de julio de 2018 en: <a href="https://www.giz.de/de/downloads/giz2017-en-waste-to-energy.pdf">https://www.giz.de/de/downloads/giz2017-en-waste-to-energy.pdf</a>
- [111] Milenio Digital. (2017, Junio 21). En Milpa Alta ahora producen electricidad con nopales. Milenio Digital, Estados. Consultado el 27 de febrero del 2018 en:

  <a href="http://www.milenio.com/df/milpa\_alta-nopal-biodigestor-energia\_electrica-biogas-suema-ciudad\_de\_mexico-df\_0\_977902458.html">http://www.milenio.com/df/milpa\_alta-nopal-biodigestor-energia\_electrica-biogas-suema-ciudad\_de\_mexico-df\_0\_977902458.html</a>
- [112] Mutz, Dieter, Hengevoss, Dir., Hugi, Christoph y Gross, Thomas. (2017, Mayo). Opciones para el aprovechamiento energético de residuos en la gestión de residuos sólidos urbanos, Guía para los Responsables de la Toma de Decisiones en Países en vías de Desarrollo y Emergentes. GIZ. Consultado el 15 de enero de 2018 en: https://www.giz.de/en/downloads/Guia%20GIZ%202017%20WasteToEnergy%20-%20SP.pdf
- [113] Nissan News.com. (2012, Marzo 22). El Ayuntamiento de Aguascalientes, ENER-G y Nissan inauguran la generación de energía eléctrica limpia a partir de biogás en el relleno sanitario San Nicolás. Nissan. Sala de Prensa Oficial. Consultado el 15 de enero de 2018 en: http://nissannews.com/es-MX/nissan/mexico/releases/1c8d0075-808a-4717-b8be-ad4c7db0e3ec?la
- [114] Nissan News.com. (2013, Agosto 27). Nissan Mexicana contribuye en la expansión de la huella verde de la compañía en el mundo. Nissan. Sala de Prensa Oficial. Consultado el 15 de enero de 2018 en: http://nissannews.com/es-MX/nissan/mexico/releases/nissan-mexicana-contribuye-enla-expansi-n-de-la-huella-verde-de-la-compa-a-en-el-mundo
- [115] Noreña, Daniela. (2017, Junio 28). Saneamiento de las aguas residuales de la ciudad de Hermosillo PTAR Hermosillo. Colegio de Sonora. Consultado el 31 de enero de 2018 en:

  http://sitios.colson.edu.mx/baam/saneamiento-de-las-aguas-residuales-de-la-ciudad-de-hermosillo-ptar-hermosillo/
- [116] Noyola, Adalberto, Morgan Sagastume, Juan M., y Güereca, Leonor P. (2013). Selección de Tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales: Guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas. México: Universidad Nacional Autónoma de México. Consultado el 15 de enero de 2018 en: <a href="https://www.globalmethane.org/documents/Seleccion-de-Tecnologias-para-el-Tratamiento-de-Aguas-Residuales-Municipales.pdf">https://www.globalmethane.org/documents/Seleccion-de-Tecnologias-para-el-Tratamiento-de-Aguas-Residuales-Municipales.pdf</a>
- [117] Obrasweb. (2015). Obra del Año 2015: PTAR Agua Prieta. Consultado el 25 de enero de 2018 en: <a href="http://www.obrasweb.mx/obra-del-ano/2014/10/15/ptar-agua-prieta-ica">http://www.obrasweb.mx/obra-del-ano/2014/10/15/ptar-agua-prieta-ica</a>
- [118] Pérez Abuin, Ramiro. (2014, Octubre 27). Entrevista con Ramiro Pérez Abuin del centro de generación de energía "La Perseverancia". Consultado el 15 de enero de 2018 en: <a href="https://www.youtube.com/watch?v=vTqib6w3vVw">https://www.youtube.com/watch?v=vTqib6w3vVw</a>

- [119] Pino Pérez, Fabián. (2013, Septiembre 28). Asociación Público-Privada entre Bioeléctrica S.A. de C.V. y el Gobierno del Estado de Nuevo León "Bioenergía de Nuevo León S.A. de C.V.". IDB-ITESM. Consultado el 15 de enero de 2018 en: <a href="https://docplayer.es/34673375-Asociacion-publico-privada-entre-bioelectrica-s-a-de-c-v-y-el-gobierno-del-esta-do-de-nuevo-leon-bioener-gia-de-nuevo-leon-s-a-de-c-v-html">https://docplayer.es/34673375-Asociacion-publico-privada-entre-bioelectrica-s-a-de-c-v-y-el-gobierno-del-esta-do-de-nuevo-leon-bioener-gia-de-nuevo-leon-s-a-de-c-v-html</a>
- [120] Plataforma Mexicana de Carbono. (2016). Proyectos de Carbono: Destrucción de óxido nitroso en Lázaro Cárdenas. Consultado el 15 de enero de 2018 en: <a href="http://www.mosquito.mx/webclientes/Mexico2final/relleno-sanitario-de-ciudad-juarez.html">http://www.mosquito.mx/webclientes/Mexico2final/relleno-sanitario-de-ciudad-juarez.html</a>
- [121] PNUMA. (2011). Directrices técnicas sobre el coprocesamiento ambientalmente racional de los desechos peligrosos en hornos de cemento. Conferencia de las Partes en el Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación Décima reunión. UNEP/CHW.10/6/Add.3/Rev.1. Cartagena, 2011. Consultado el 09 de enero de 2018 en: <a href="http://www.basel.int/Portals/4/Basel%20Convention/docs/pub/techguid/cement/06a3r1s.pdf">http://www.basel.int/Portals/4/Basel%20Convention/docs/pub/techguid/cement/06a3r1s.pdf</a>
- [122] Presidencia de la República. (2011, Octubre 25). Con la PTAR San Pedro Mártir, la ciudad de Querétaro trata todas sus aguas negras. Comunicado 363/11. Consultado el 30 de enero de 2018 en: <a href="http://calderon.presidencia.gob.mx/2011/10/con-la-ptar-san-pedro-martir-la-ciudad-de-queretaro-trata-todas-sus-aguas-negras/">http://calderon.presidencia.gob.mx/2011/10/con-la-ptar-san-pedro-martir-la-ciudad-de-queretaro-trata-todas-sus-aguas-negras/</a>
- [123] Promotora Ecológica San Pedro Mártir S.A. de C.V. (2010). *Manifestación de impacto ambiental de la etapa de operación de la planta de tratamiento de aguas residuales "San Pedro Mártir"*. Consultado el 30 de enero de 2018 en: <a href="http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/qro/estudios/2010/220E2010HD036.pdf">http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/qro/estudios/2010/220E2010HD036.pdf</a>
- [124] Quezada Barrón, Manuel. (2009, Julio 20). CRE otorga permisos a Biogas de Juárez para generar electricidad en base a gas metano. Luz verde a energía verde. Consultado el 15 de enero de 2018 en: <a href="http://intrabecc.cocef.org/programs/intranetnotasperiodico/uploadedFiles/luzverdeaaenrgiaverdebiogas.pdf">http://intrabecc.cocef.org/programs/intranetnotasperiodico/uploadedFiles/luzverdeaaenrgiaverdebiogas.pdf</a>
- [125] Robinson, Dwight, White, James y González, Reinaldo. (s/f). *Planta de Tratamiento de Aguas Residuales "Dulces Nombres", Monterrey, Mexico.* Burns & McDonnell Engineering Company. Consultado el 26 de enero de 2018 en: http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/aresidua/mexico/01222e14.pdf
- [126] SADM. (2011). Antecedentes de Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey.

  Gobierno del Estado de Nuevo León. Consultado el 26 de enero de 2018 en: <a href="https://www.sadm.gob.mx/PortalSadm/jsp/seccion.jsp?id=143&sadm=28">https://www.sadm.gob.mx/PortalSadm/jsp/seccion.jsp?id=143&sadm=28</a>
- [127] SADM. (2018). Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey. Consulta directa a personal de planta operadora.
- [128] Salazar García, Juan. (2017, Agosto 16). *Certifica la ONU a la empresa Biogas*. Periódico El Mexicano. Consultado el 15 de enero de 2018 en: <a href="https://www.periodicoelmexicano.com.mx/local/certifica-la-onu-a-la-empresa-biogas">https://www.periodicoelmexicano.com.mx/local/certifica-la-onu-a-la-empresa-biogas</a>
- [129] Saldaña Méndez, Jaime L. (2009, Junio 25). "Bioenergía de Nuevo León, S.A. de C.V.: Una asociación público-privada exitosa". BENLESA. Biogás para la generación distribuida. Consultado el 15 de enero de 2018 en: <a href="http://www.cre.gob.mx/documento/1530.pdf">http://www.cre.gob.mx/documento/1530.pdf</a>
- [130] Saldaña Méndez, Jaime L. (2011, Septiembre). Emission Sources and Mitigation Strategies Implemented in Selected Regions. Convirtiendo Metano en Energía. Planta de Energía Cero Carbono. Consultado el 15 de enero de 2018 en: <a href="http://www.mce2.org/SLCFWorkshop/docs/(Saldana)%20Taller%20de%20Ciencia%20y%20Politica%20(Mexico%20DF%20Sep.%202011).pdf">http://www.mce2.org/SLCFWorkshop/docs/(Saldana)%20Taller%20de%20Ciencia%20y%20Politica%20(Mexico%20DF%20Sep.%202011).pdf</a>
- [131] Sánchez Banda, Felipe. (2016, Agosto 17). *Generan energía con biogás en Saltillo*. Agencia Informativa Conacyt. Consultado el 30 de enero de 2018 en:

- http://www.conacytprensa.mx/index.php/tecnologia/energia/9601-generan-energia-conbiogas-en-saltillo
- [132] SAPAL. (2014). Proyectos prioritarios Saneamiento. Consultado el 29 de enero de 2018 en: www.sapal.gob.mx/proyectosprioritarios/saneamiento
- [133] SAPAL. (2018). Sistema de cogeneración de energías. Consultado el 19 de julio de 2018 en: http://www.sapal.gob.mx/servicios/saneamiento
- [134] Schnurer, H. (2015). Panorama del aprovechamiento energético de residuos:
  Factores de éxito en Alemania. Foro Internacional 2015: Valorización Energética
  de Residuos Urbanos. Experiencias y estrategias globales. Consultado el 29 de
  enero de 2018 en:
  <a href="https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/foro-internacional-2015-yalorizacion-energetica-de-residuos-urbanos">https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/foro-internacional-2015-yalorizacion-energetica-de-residuos-urbanos</a>
- [135] SEMARNAT. (2003, Agosto 15). NORMA Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental.- Lodos y biosólidos.-Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación. http://dof.gob.mx/nota\_detalle.php?codigo=691939&fecha=15/08/2003
- [136] SEMARNAT. (2013, Junio). Gestión de Residuos en Municipios Costeros Turísticos. Consultado el 28 de febrero de 2018 en: www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Gestionintegralderesiduos.pdf
- [137] SEMARNAT. (2017, enero 10). Residuos Sólidos Urbanos (RSU): Información sobre residuos solidos urbanos. Portal en Internet SEMARNAT. Consultado el 19 de julio de 2018 en: <a href="https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/residuos-solidos-urbanos-rsu">https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/residuos-solidos-urbanos-rsu</a>
- [138] Senado de la República. (2010, Julio 28). *Gaceta de la Comidión Permanente Gaceta LXI/1SPR-13/26048*. Consultado el 15 de enero de 2018 en: <a href="http://www.senado.gob.mx/64/gaceta\_comision\_permanente/documento/26048">http://www.senado.gob.mx/64/gaceta\_comision\_permanente/documento/26048</a>
- [139] Senado de la República. (2012). *Gaceta del Senado Gaceta LXI/3SPO-378/34777*. Consultado el 15 de enero de 2018 en: <a href="http://www.senado.gob.mx/64/gaceta\_del\_senado/documento/34777">http://www.senado.gob.mx/64/gaceta\_del\_senado/documento/34777</a>
- [140] SENER. (2015). Inventario Nacional de Energías Renovables. Consultado el 15 de enero de 2018 en: <a href="https://dgel.energia.gob.mx/inel/">https://dgel.energia.gob.mx/inel/</a>
- [141] SENER. (2017). Reporte de Avance de Energías Limpias 2016. Consultado el 21 de enero de 2018 en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/232624/Informe\_Renovables\_2016\_12062017.pdf
- [142] SIMEPRODE. (2006, Agosto 3). Sistema Integral para el Manejo Ecológico y Procesamiento de Desechos- Organismo Público Descentralizado del Gobierno de Nuevo León. Gobierno de Nuevo León. Consultado el 15 de enero de 2018 en: http://www2.inecc.gob.mx/descargas/colimatico/bioenergia\_12\_j\_fernandez.pdf
- [143] Sinembargo.mx. Por EFE. (2017, Mayo 24). Autoridades de la CDMX inauguran biodigestor para eliminar residuos orgánicos. Consultado el 27 de febrero del 2018 en: http://www.sinembargo.mx/24-05-2017/3224463
- [144] Strippel, Florian, Findeisen, Clemens, Hofmann, Frank, Wagner, Lucas y Wilken, David. (2016, Mayo). *Biowaste to Biogas*. Fachverband Biogas. Consultado el 22 de enero de 2018 en: <a href="http://biowaste-to-biogas.com/Download/biowaste-to-biogas.pdf">http://biowaste-to-biogas.com/Download/biowaste-to-biogas.pdf</a>

- [144a] Tiar Hermosillo, S.A.P.I. de C.V. (2018). Empresa operadora del servicio de agua de Hermosillo. Consulta directa a personal de operación de la planta.
- [145] Thurgood, Maggie. (1998). Decision-Makers guide to Solid Waste Landfills. World Bank, World Health Organization, Swiss Agency for Development and Cooperation, and Swiss Center for Development Cooperation in Technology and Management. Consultado el 15 de enero de 2018 en: http://documents.worldbank.org/curated/en/814611468765273519/pdf/multi-page.pdf
- [146] Torres-Rojas, Enrique. (2014, Octubre 2). El nuevo competidor en la industria cementera. Forbes México. Negocios. Consultado el 09 de enero de 2018 en: http://www.forbes.com.mx/el-nuevo-competidor-en-la-industria-cementera/
- [147] Trejo, Guillermina. (2014, Noviembre 11). *Genera Atizapán energía de basura*. Periódico Reforma. Ciudad. Consultado el 15 de enero de 2018 en: http://www.reforma.com/aplicacioneslibre/articulo/default.aspx?id=390060&md5=34fcd8 d4282025c7d614ddc4e432a71e&ta=0dfdbac11765226904c16cb9ad1b2efe
- [148] Valencia Juliao, Hugo. (2017, Noviembre 9). Primera planta de valorización de residuos orgánicos en la CDMX. CONACYT Agencia Informativa. Consultado el 27 de febrero del 2018 en: <a href="http://conacytprensa.mx/index.php/ciencia/ambiente/16392-planta-valorizacion-residuos-organicos-cdmx">http://conacytprensa.mx/index.php/ciencia/ambiente/16392-planta-valorizacion-residuos-organicos-cdmx</a>
- [149] Vélez Flores, Edson. (2011, Agosto 17). Invierte la cementera Cruz Azul 14 mdd en horno de combustibles. El Independiente de Hidalgo. Consultado el 9 de enero de 2018 en: https://www.elindependientedehidalgo.com.mx/hemeroteca/2011/08/32033
- [150] Vita, Israel. (2017, Agosto 4). ¿A dónde se va la basura que saca de su casa? ABC noticias.mx. Consultado el 15 de enero de 2018 en: https://www.periodicoabc.mx/a-donde-se-va-la-basura-que-saca-de-su-casa/87841
- [151] Waste Management World. (2013, Enero 30). Second Landfill Gas to Energy Project for ENER-G in Mexico. Consultado el 15 de enero de 2018 en: https://waste-management-world.com/a/second-landfill-gas-to-energy-project-for-ener-g-in-mexico
- [152] Wellinger, Arthur, Murphy, Jerry y Baxter, David. (2013, Febrero 19). The Biogas Handbook: Science, production and applications. Reino Unido: Woodhead Publishing Limited. https://www.elsevier.com/books/the-biogas-handbook/wellinger/978-0-85709-498-8



















© 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 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