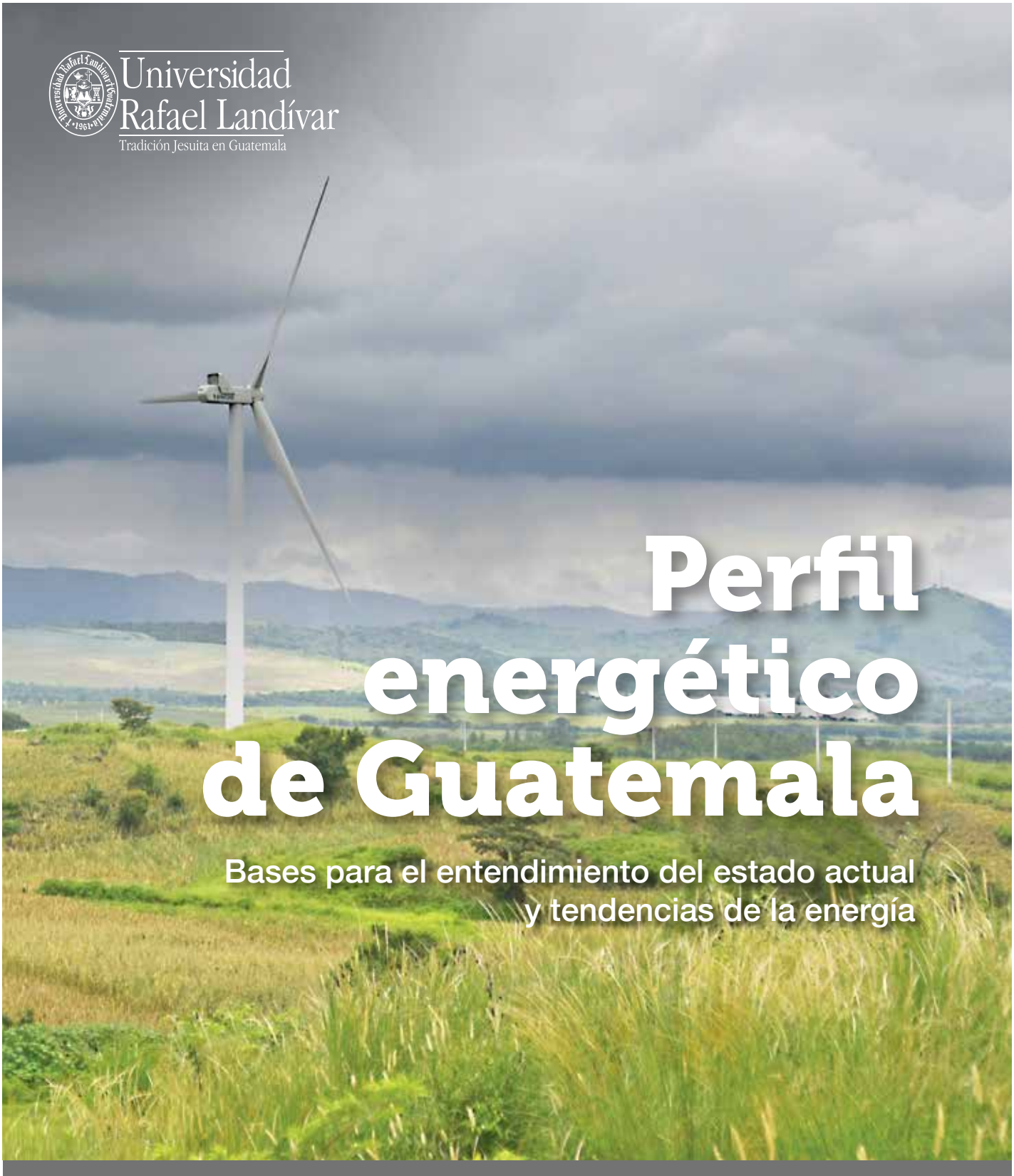


Universidad Rafael Landívar
Tradición Jesuita en Guatemala

Perfil energético de Guatemala

Bases para el entendimiento del estado actual y tendencias de la energía

incyt
Instituto de investigación y proyección sobre ciencia y tecnología

VRIP
VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y PROYECCIÓN

Perfil energético de Guatemala

Bases para el entendimiento del estado actual y tendencias de la energía

incyt
Instituto de investigación y proyección sobre ciencia y tecnología

VRIP
VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y PROYECCIÓN

Universidad Rafael Landívar
Tradición Jesuita en Guatemala

Guatemala, junio 2018

Universidad Rafael Landívar

Autoridades institucionales relacionadas con el informe

Vicerrector de Investigación y Proyección
Dr. José Juventino Gálvez Ruano

Director del Instituto de Investigación y Proyección sobre Ciencia y Tecnología (Incyt)
Dr. Juan Carlos Rosito Monzón

Créditos de la publicación

Coordinación general del informe
Dr. Juan Carlos Rosito Monzón (2018)
Dra. Ana Cecilia Zurita Fuentes (2017)

Coordinador técnico del informe e investigador principal
M.Sc. Edgar Eduardo Sacayón Madrigal

Apoyo editorial:
Mgtr. Cecilia Cleaves y Licda. Isabel Aguilar

Investigadores involucrados del Incyt:
M.Sc. Michelle Tercero, Ing. Sara Fuentes, Ing. Jose Luis Méndez

Contribuciones:
M.Sc. Aída Lorenzo y M.Sc. Luis Polanco

Asesores técnicos:
Dr. Mario Santizo y M.Sc. Nancy Chacón

Colaboradores:
Br. Laura Figueroa y Br. Santos D. Méndez

Incyt URL (Instituto de Investigación y Proyección sobre Ciencia y Tecnología de la Universidad Rafael Landívar). (2018). *Perfil energético de Guatemala: Bases para el entendimiento del estado actual y tendencias de la energía*. Guatemala: Autor

Arte gráfico: Alexander Mérida

Universidad Rafael Landívar
Campus central, Vista Hermosa III, zona 16
Edificio TEC, 5to nivel
Apartado postal 39-C, ciudad de Guatemala, 01016
Guatemala
Correo electrónico: incyt@url.edu.gt
PBX: 2426-2626
Sitio web: www.incyt.org - www.url.edu.gt

ÍNDICE

Presentación 13

Resumen ejecutivo 15

Abstract 17

Siglas y Acrónimos 19

Introducción 23

1. Marco conceptual y metodológico para el análisis de la sostenibilidad energética 27

1.1 Introducción 27
1.2 Concepto de sostenibilidad y su aplicación al *Perfil energético de Guatemala* 27
1.3 Marcos conceptuales y metodológicos para el análisis de sostenibilidad 29
1.4 Análisis de sostenibilidad energética 31
1.5 Estudios sobre sostenibilidad energética en Guatemala 35
1.6 Introducción al marco de análisis de sostenibilidad de ciclo de vida 37
1.6.1 Definición de alcance y objetivo 37
1.6.2 Inventario del ciclo de vida (ICV) 38
1.6.3 Evaluación de impacto del ciclo de vida (EICV) 38
1.6.4 Interpretación de resultados 39
1.7 Referencias bibliográficas 40

2. Panorama energético de Guatemala 2001-2016 45

2.1 Introducción: La situación energética de Guatemala 2001-2016 45
2.2 Suministro de energía primaria 45
2.2.1 ¿Qué es la energía primaria? 45
2.2.2 Suministro de energía primaria en Guatemala 46
2.3 Consumo energético por tipo de combustible 48
2.4 Demanda energética por sector 49
2.5 Indicadores de rendimiento energético 50
2.5.1 Producción y consumo energético per cápita 50
2.5.2 Uso energético por unidad de producto interno bruto (PIB) 50
2.5.3 Consumo de electricidad por habitante 52

2.6 Indicadores económicos por producción de energía eléctrica 53
2.6.1 Precio *spot* 53
2.7 Balance energético 2016 54
2.8 El Sistema Nacional Interconectado 58
2.8.1 Potencia instalada 2001-2016 58
2.8.2 Generación anual 2001-2016 59
2.8.3 Cobertura eléctrica en Guatemala 59
2.8.4 Generación anual en Guatemala en 2016 61
2.8.5 Participación de energía renovable en el SNI en 2016 61
2.8.6 Variación estacional del SNI en 2016 61
2.8.7 Importación y exportación del SNI 62
2.8.8 Red de transmisión y distribución del SNI 62
2.8.9 Generación distribuida renovable 63
2.8.10 Usuario autoproductor con excedentes de energía (UAEE) 65
2.9 Conclusiones 66
2.10 Recomendaciones 67
2.11 Referencias bibliográficas 67

3. Recursos energéticos no renovables 71
3.1 Introducción 71
3.2 Petróleo 71
3.2.1 Reservas de petróleo en Guatemala 72
3.2.2 Exploración de petróleo en Guatemala 75
3.2.3 Producción de petróleo en Guatemala 76
3.2.4 Características fisicoquímicas del petróleo nacional 78
3.2.5 Importación de hidrocarburos en Guatemala 78
3.3 Gas natural 79
3.3.1 Características del gas natural 79
3.3.2 Reservas de gas natural en Guatemala 79
3.4 Carbón mineral 80
3.4.1 Características del carbón mineral 80
3.4.2 Clasificación del carbón mineral 80
3.4.3 Depósitos de carbón en Guatemala 81
3.5 Generación de energía con combustibles fósiles 83
3.5.1 Plantas térmicas de carbón en Guatemala 83
3.5.2 Motores reciprocantes de combustión interna 84
3.5.3 Turbinas de gas 84
3.5.4 Propiedades fisicoquímicas de los combustibles fósiles 86

3.6 Conclusiones 88
3.7 Recomendaciones 88
3.8 Referencias bibliográficas 89

4. Recursos energéticos renovables 93
4.1 Introducción 93
4.2 Biomasa 94
4.2.1 Características 94
4.2.2 Potencial de biomasa forestal (leña) en Guatemala 95
4.2.3 Generación de electricidad con biomasa (cogeneración) 96
4.2.4 Etanol 98
4.2.5 Biodiésel 103
4.2.6 Biogás 104
4.3 Energía solar 105
4.3.1 Características de la energía solar 105
4.3.2 Potencial solar de Guatemala 108
4.3.3 Generación de electricidad con energía solar 113
4.4 Energía eólica 116
4.4.1 Características de la energía eólica 116
4.4.2 Potencial eólico en Guatemala 116
4.4.3 Generación de electricidad con energía eólica 117
4.5 Energía geotérmica 119
4.5.1 Características 119
4.5.2 Potencial geotérmico de Guatemala 120
4.5.3 Generación de electricidad con energía geotérmica 122
4.6 Energía hidroeléctrica 123
4.6.1 Características 123
4.6.2 Potencial hidroeléctrico de Guatemala 123
4.6.3 Generación de electricidad con hidroeléctricas 124
4.6.4 Conflictividad social asociada a proyectos hidroeléctricos 128
4.7 Conclusiones 131
4.8 Recomendaciones 132
4.9 Referencias bibliográficas 133

5. Análisis de sostenibilidad ambiental del Sistema Nacional Interconectado 139
5.1 Introducción 139
5.2 Análisis del ciclo de vida del Sistema Nacional Interconectado 139
5.2.1 Fase 1: definición de alcances y objetivos 140
5.2.2 Fase 2: análisis del inventario 142
5.2.3 Fase 3: evaluación de impactos 147
5.2.4 Fase 4: interpretación de resultados 160
5.3 Análisis de huella de agua 162
5.3.1 Evolución del concepto de huella de agua 163
5.3.2 Terminología asociada al concepto de huella de agua 164
5.3.3 Metodología de huella de agua según la Norma ISO 14046:2014 166
5.3.4 Huella de agua del Sistema Nacional Interconectado 174
5.4 Conclusiones 179
5.5 Recomendaciones 180
5.6 Referencias bibliográficas 180
Consideraciones finales 185

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Marco socioecológico según Omstrom	30
Figura 2	Análisis de sostenibilidad de ciclo de vida	31
Figura 3	Marco de referencia para el análisis de la sostenibilidad de sistemas energéticos con una perspectiva de ciclo de vida en sus tres dimensiones	35
Figura 4	Etapas de un análisis de ciclo de vida	37
Figura 5	Esquema de intercambios ambientales durante el ciclo de vida de un producto o servicio	38
Figura 6	Evaluación de potenciales impactos ambientales durante etapas intermedias y finales de la ruta causa-efecto	39
Figura 7	Suministro de energía primaria (KBEP) en Guatemala para el periodo 2001-2016	46
Figura 8	Consumo energético por combustible (KBEP) en Guatemala durante el periodo 2001-2006	47
Figura 9	Demanda energética por sector (KBEP) en Guatemala durante el periodo 2001-2016	48
Figura 10	Consumo de combustible por sector (KBEP) en Guatemala durante 2016	49
Figura 11	Producción y consumo energético per cápita (BEP/hab) en Guatemala durante el periodo 2001-2016	51
Figura 12	Producción y consumo energético por unidad de producto interno bruto en KBEP, por millones de dólares a precios constantes de 2001	51
Figura 13	Consumo de electricidad por habitante (kWh/hab) en Guatemala durante el periodo 2001-2016	52
Figura 14	Precio spot en el mercado de oportunidad (USD/MWh) en Guatemala durante el periodo 2000-2016	53
Figura 15	Diagrama de Sankey del balance energético en millones de barriles equivalentes de petróleo (MBEP) para 2016	57
Figura 16	Potencia instalada de placa (MW) para generación de electricidad en Guatemala durante el período 2001-2017	58
Figura 17	Generación anual de energía eléctrica (GWh) en Guatemala durante el periodo 2001-2016	59
Figura 18	Matriz de electricidad del SNI en Guatemala para 2016	61
Figura 19	Composición de fuentes energéticas en el SNI de Guatemala durante 2016 (%)	61
Figura 20	Variación estacional del SNI de Guatemala durante 2016 (GWh)	62
Figura 21	Potencia instalada de UAEE por distribuidora (MW)	65
Figura 22	Producción de petróleo en Guatemala	76
Figura 23	Producción nacional de petróleo por zona de extracción	77
Figura 24	Importación de hidrocarburos en Guatemala durante el periodo 2001-2016 en millones de barriles	79
Figura 25	Rutas de aprovechamiento de la biomasa	95
Figura 26	Proceso de producción de etanol	99

Figura 27 Planta de deshidratación de frutas, ubicada en el departamento de El Progreso 107

Figura 28 Generación anual de energía eléctrica por sistema solar fotovoltaica 115

Figura 29 Potencia instalada de generadores a partir de energía solar en Guatemala 116

Figura 30 Sistema de producción para 1 kWh de electricidad de bajo voltaje (110-240V), que se distribuye a usuarios domésticos en Guatemala 141

Figura 31 Contribución porcentual de los sistemas de generación en cada categoría de impacto, en la cadena de suministro de electricidad en Guatemala (2016) 151

Figura 32 Procesos que contribuyen con la categoría potencial de acidificación (AP), en kg SO_2 eq/kWh, por la cadena de suministro de electricidad en Guatemala (2016) 152

Figura 33 Procesos que contribuyen en la categoría de Potencial de calentamiento global (GWP 100), en kg de CO2 eq/kWh, por la cadena de suministro de electricidad en Guatemala (2016) 153

Figura 34 Procesos que contribuyen al potencial de agotamiento abiótico de recursos minerales (ADP Elements), en kg de Sb eq/kWh, en la cadena de suministro de electricidad en Guatemala (2016) 153

Figura 35 Procesos que contribuyen con el potencial de agotamiento abiótico de recursos fósiles (ADP Fossil), en MJ/kWh, por la cadena de suministro de electricidad en Guatemala (2016) 154

Figura 36 Procesos que contribuyen al Potencial de Eutrofización (EP), en kg PO_4 eq/kWh, en la cadena de suministro de electricidad en Guatemala (2016) 154

Figura 37 Procesos que contribuyen al Potencial de Toxicidad de Ecosistemas de Agua Dulce (FAETP), en kg 1,4-diclorobenceno eq/kWh, por la cadena de suministro de electricidad en Guatemala (2016) 155

Figura 38 Procesos que contribuyen al Potencial de Toxicidad Humana (HTP), en kg 1,4-diclorobenceno eq/kWh, por la cadena de suministro de electricidad en Guatemala (2016) 155

Figura 39 Procesos que contribuyen al Potencial de Toxicidad de Ecosistemas Marinos (MAETP), en kg 1,4-diclorobenceno eq/kWh, por la cadena de suministro de electricidad en Guatemala (2016) 156

Figura 40 Procesos que contribuyen con el Potencial de Deterioro de la Capa de Ozono, en kg CF-11 eq/kWh, en el suministro de electricidad en Guatemala (2016) 156

Figura 41 Procesos que contribuyen al Potencial de Formación Fotoquímica de Ozono (POCP), en kg etileno eq/kWh, por el suministro de electricidad en Guatemala (2016) 157

Figura 42 Procesos que contribuyen a la categoría de Potencial de Toxicidad de Ecosistemas Terrestres (TETP), en kg 1,4-diclorobenceno eq/kWh, por la cadena de suministro de electricidad en Guatemala (2016) 157

Figura 43 Procesos que contribuyen al uso de suelo (LU-C), en m_2-año/kWh, en la cadena de suministro de electricidad en Guatemala (2016) 158

Figura 44 Potencial de Calentamiento Global (GWP 100), en kg CO_2 eq/kWh y su variación estacional durante el año 2016 158

Figura 45 Composición porcentual de tres escenarios del SNI. El escenario actual usa la composición del SNI en el 2016. El escenario 4 usa el modelo descrito por la CNEE (2012) y el escenario de incremento de energía no renovable es hipotético 159

Figura 46 Potencial de Calentamiento Global (GWP 100) en kg de CO_2 eq/kWh, de los tres escenarios del 2026, propuestos en la categoría de cambio climático 160

Figura 47 Esquema para categorizar el uso de agua dulce dentro de la huella hídrica 166

Figura 48 Esquema general para el análisis del inventario de la huella de agua 168

Figura 49 Mapa global con factores de caracterización de escasez de agua a nivel de sub-cuencas 173

Figura 50 Huella de agua para 1 kWh, con los indicadores de escasez Aware, Ecotoxicidad Acuática (Método UseTox), Toxicidad de Ecosistemas de Agua Dulce (Método CML) y Eutrofización de Agua Dulce (Método ReCiPe) 178

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Balance energético de 2016 (KBEP) en Guatemala	55
Tabla 2	Kilómetros de línea de transmisión por agente transportista en el SNI	63
Tabla 3	Generación distribuida renovable operando en Guatemala en el 2015 (MW)	64
Tabla 4	Potencia instalada de UAEE distribuidora en MW, 2017	65
Tabla 5	Potencia instalada de UAEE con energía solar fotovoltaica	66
Tabla 6	Contratos de exploración petrolera vigentes en Guatemala	76
Tabla 7	Contratos de explotación petrolera en Guatemala	76
Tabla 8	Plantas de generación de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles en Guatemala	85
Tabla 9	Propiedades físicoquímicas del carbón, búnker C y diésel	86
Tabla 10	Cogeneradores con biomasa de bagazo de caña de azúcar en Guatemala (2015)	97
Tabla 11	Capacidad instalada de producción diaria de etanol en litros	100
Tabla 12	Plantas de energía solar en Guatemala en 2016	113
Tabla 13	Potencia instalada de generadores a partir de energía solar en Guatemala	115
Tabla 14	Plantas geotérmicas en Guatemala en el 2016	122
Tabla 15	Plantas hidroeléctricas en Guatemala al 2016	126
Tabla 16	Conflictos sociales y ambientales asociados a proyectos hidroeléctricos en Guatemala	129
Tabla 17	Parámetros y suposiciones para la elaboración del modelo ACV del Sistema Nacional Interconectado	148
Tabla 18	Categorías de impacto que conforman la línea base del método CML 2001	149
Tabla 19	Impactos ambientales del ciclo de vida por el suministro de 1 kWh de electricidad de bajo voltaje, en el territorio de Guatemala en 2016	150
Tabla 20	Flujos elementales presentes en la base de datos *Ecoinvent 3.2* para la cuantificación la huella de agua	167
Tabla 21	Resultados del inventario de ciclo de vida para los flujos hídricos, del Sistema Nacional Interconectado, para 1 kWh de electricidad en Guatemala	175
Tabla 22	Cuantificación del uso, pérdidas evaporativas, degradación y consumo de agua por cada kWh que se suministra en el territorio de Guatemala, usando valores por defecto de la base de datos *Ecoinvent 3.2*	176
Tabla 23	Cuantificación del uso, consumo y pérdidas evaporativas por consumo de 1 kWh en el territorio de Guatemala, sin considerar pérdidas evaporativas de represas hidroeléctricas	176

ÍNDICE DE MAPAS

Mapa 1	Índices de cobertura eléctrica de Guatemala en 2016	60
Mapa 2	Cuencas petroleras, exploración y explotación de petróleo en Guatemala	73
Mapa 3	Provincias geológicas del Caribe según el Servicio Geológico de los Estados Unidos	74
Mapa 4	Depósitos de carbón mineral en Guatemala	82
Mapa 5	Plantas térmicas que operan con combustibles fósiles en Guatemala. Potencia instalada representada por tamaño de círculo	87
Mapa 6	Ubicación de las plantas de producción de etanol en Guatemala	101
Mapa 7	Potencial solar promedio anual, por irradiación normal directa en Guatemala	110
Mapa 8	Potencial solar promedio anual, basado en la irradiación horizontal global	111
Mapa 9	Potencial solar promedio anual por irradiación compensada con ángulo de inclinación	112
Mapa 10	Plantas solares en Guatemala	114
Mapa 11	Potencial eólico y capacidad instalada a partir de energía eólica en Guatemala	118
Mapa 12	Potencial geotérmico y plantas instaladas en Guatemala	121
Mapa 13	Disponibilidad hídrica de Guatemala a nivel de cuencas	125
Mapa 14	Plantas instaladas de energía hidroeléctrica en Guatemala	127
Mapa 15	Conflictos por generación hidroeléctrica en Guatemala	130

Presentación

El objetivo central del sistema de investigación, proyección e incidencia de la Universidad Rafael Landívar (URL), conducido por la Vicerrectoría de Investigación y Proyección (VRIP), es la búsqueda de soluciones efectivas y duraderas que contribuyan a mejorar la vida y el entorno de las personas más vulnerables, procurando así transitar hacia una sociedad más equitativa. Para tal pretensión la VRIP se ampara en el conocimiento riguroso y agudo de las distintas causas directas y fuerzas impulsoras que producen y reproducen la injusticia y las desigualdades, socavan la libertad y la dignidad de las personas, fragmentan la sociedad y deterioran los ecosistemas.

En este contexto, el Instituto de Investigación y Proyección sobre Ciencia y Tecnología (Incyt) impulsa investigaciones sobre la energía en Guatemala que incluyen los ámbitos de generación, distribución, consumo, potencial y sostenibilidad energética. Este conocimiento constituye un aporte fundamental para abordar los crecientes desafíos vinculados al bienestar de la población y la revitalización del ambiente natural en el país.

La energía, de una manera muy simple, se puede definir como una propiedad de la materia para hacer un trabajo (generar cambios), lo cual va desde la interacción entre moléculas y la transferencia de calor, hasta el movimiento de cuerpos, entre otros.

Desde una visión antropocéntrica, las propiedades y el aprovechamiento de la energía son imprescindibles para garantizar la sobrevivencia y el desarrollo de una sociedad moderna. Los usos de la energía son numerosos; entre ellos puede mencionarse la generación de calor en el hogar, la preparación de alimentos, el transporte y la construcción, la iluminación de ciudades, el funcionamiento de escuelas, hospitales, ciudades, etc.

Tal es el grado de importancia de la energía que el impresionante desarrollo tecnológico y el crecimiento económico de la humanidad en los últimos siglos, observado desde la revolución industrial a mediados del siglo XVIII, no serían viables sin el aprovechamiento de diversas formas de energía.

Como se sabe, durante los últimos siglos la provisión de energía requerida por hogares y sectores productivos ha estado basada en el consumo de combustibles fósiles. Esto ha conducido a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera en niveles considerados críticos. Se estima que más de dos tercios de GEI emitidos en los últimos doscientos cincuenta años están vinculados con el uso de dichos combustibles. Como consecuencia, se ha alterado significativamente la atmósfera de la Tierra (el cambio climático abrupto y la contaminación); conduciendo a la humanidad a afrontar algunos de los mayores retos de su historia: la adaptación y la sobrevivencia.

Además, en los países que son clasificados como de "ingresos altos o intermedios", tal como Guatemala, el conocimiento adecuado del sector energético, la activación de políticas de Estado y la planificación técnica debidamente sustentada, son críticos para asegurar el acceso a recursos energéticos de los diferentes sectores productivos y sociales. Solo mediante el conocimiento científico es posible atender de manera adecuada y oportuna el aumento creciente de la demanda de energía, de tal manera que sea más eficiente, económicamente accesible y menos contaminante.

Asimismo, el conocimiento profundo y detallado de los recursos energéticos en países con altos niveles de pobreza —el caso de Guatemala, con más de la mitad de la población en esta condición— se considera fundamental para promover políticas de abastecimiento universal y superar las denominadas "trampas de la pobreza".

Los principales desafíos de la pobreza que es necesario atender, más allá de los ingresos o capacidades de consumo, están ligados a las dimensiones de la educación, salud, agua, alimentación, hábitat y energía. Como es evidente, en los esfuerzos por combatir la pobreza la seguridad energética es fundamental para satisfacer otras dimensiones del bienestar humano, tal como la seguridad hídrica, la seguridad alimentaria, hábitat, saneamiento, trabajo, salud y educación.

El presente *Perfil energético de Guatemala* (*Pegua*) pone a disposición del sector académico, público, privado y gestores del desarrollo en general, un referente de alto rigor científico para la generación, perfeccionamiento o evaluación de políticas e instrumentos que promuevan el abastecimiento universal y equitativo de energía limpia de manera eficiente y sostenible. Basados en metodológicas rigurosas ofrecemos conclusiones y recomendaciones encaminadas a iluminar la transición desde formas insostenibles de desarrollo hacia uno verdadero.

Finalmente, no podemos dejar de mencionar que entre los principales alcances del presente trabajo se encuentra el apoyo decidido a iniciativas internacionales de desarrollo sostenible, entre las que destacan los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), promovidos por las Naciones Unidas.

De manera muy especial también se atiende el llamado del Papa Francisco, explícito en la carta encíclica "*Laudato si*" respecto a "un nuevo diálogo sobre el modo como estamos construyendo el futuro del planeta". La encíclica, tras reconocer la grave problemática ecológica y social de la Tierra —lo cual es ampliamente respaldado por científicos—, plantea que "el desafío urgente de proteger nuestra casa común incluye la preocupación de unir a toda la familia humana en la búsqueda de un desarrollo integral [basado en el equilibrio de objetivos sociales, económicos y ambientales], pues sabemos que las cosas pueden cambiar".

Dr. Juventino Gálvez
Vicerrector de Investigación y Proyección
URL

Dr. Juan Carlos Rosito
Director del Instituto de Investigación y
Proyección sobre Ciencia y Tecnología (Incyt)
URL

Resumen ejecutivo

Con el fin de enfrentar los desafíos de seguridad energética y desarrollo energético sostenible de Guatemala, el Instituto de Investigación y Proyección sobre Ciencia y Tecnología (Incyt), desarrolló el *Perfil energético de Guatemala (Pegua)*.

La metodología de elaboración del *Pegua* incluyó tres etapas principales. La primera consistió en la recopilación exhaustiva de información de fuentes primarias del sector energético de Guatemala, esto para el período 2001 al 2016. Las principales fuentes son reportes anuales e informes estadísticos del Ministerio de Energía y Minas (MEM), la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE) y el Administrador del Mercado Mayorista (AMM). Con esta información integrada se procedió a desarrollar y organizar marcos analíticos y bases de datos. Posteriormente se analizó e interpretó el estado situacional e histórico de la energía en Guatemala, con énfasis en el suministro, consumo, demanda, balance y rendimiento.

En la segunda se cuantificaron los recursos energéticos del país, tanto renovables como no-renovables. Esta información fue mapeada y se desarrolló un sistema de información geográfico de recursos energéticos de Guatemala. Este fue fundamental para el análisis de la localización, potencial cuantitativo y análisis de fuentes y flujos de estos recursos. Es destacable que como un subproducto del *Pegua* se tiene disponible en internet un centro de visualización de datos de energía (www.incyt.org).

En la tercera etapa, se realizó un análisis detallado de ciclo de vida y huella de agua del Sistema Nacional Interconectado (SNI) siguiendo las normas ISO 14040, 14044 y 14046. Es importante mencionar que la metodología de análisis de ciclo de vida, está siendo utilizada como el estándar internacional para evaluar el desempeño ambiental de sistemas de producción. Tanto la implementación de la metodología, el establecimiento de línea base y la definición de indicadores (adecuados al entorno guatemalteco) no tiene precedentes. En tal sentido este se constituye en un aporte significativo para el análisis de la sostenibilidad del sector energético, el cual es importante seguir desarrollando.

De acuerdo con el análisis de la información, a continuación, se presentan algunos resultados destacables. El consumo energético se ha incrementado en un 38% desde 2001 al 2016. El consumo energético per cápita (4.41 bep/hab) es mayor que la producción energética per cápita (3.87 bep/hab) lo que significa que el país es un importador neto de energía. La intensidad energética, o sea el consumo energético por unidad de PIB, ha venido reduciéndose levemente. Esto evidencia que el desacoplamiento energético de las actividades productivas no es lo suficientemente acelerado para un desarrollo tecnológico e industrial.

Los indicadores de suministro de energía primaria y consumo energético demuestran que existe una clara dependencia del consumo de leña como fuente energética primaria. El consumo de esta representa más del 50% de las demandas energéticas del país, y es utilizada, principalmente, para cubrir las necesidades del sector residencial. Esto evidencia altos niveles de insostenibilidad y un bajo desarrollo industrial del país.

La producción de petróleo, que en su mayor proporción se exporta a otros países, ha venido decayendo en los últimos años. La falta de infraestructura para destilar hidrocarburos (diésel y gasolina) y el incremento en generación de energía eléctrica a partir del carbón, ha convertido a Guatemala en un

importador neto de combustibles fósiles. La importación de hidrocarburos satisface las demandas del sector transporte.

El análisis de sostenibilidad ambiental, por medio del estudio de ciclo de vida, proporciona una línea base de 12 indicadores de impacto ambiental que pueden ser utilizados para evaluar el desempeño ambiental del SNI. Estos indicadores permiten trazarse metas en términos de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero y cumplir con los acuerdos globales de mitigación al cambio climático. La huella de carbono por kWh de energía eléctrica suministrada a un consumidor de bajo voltaje fue estimada en 0.418 kg de CO_2 eq. La huella territorial se estimó en 0.08 m^2 de tierra al año por cada kWh y la huella de agua se estimó en 9 lt de agua pura por cada kWh de energía eléctrica.

A pesar que existe un incremento en la generación de electricidad derivado de fuentes energéticas renovables en los útlimos años, estas únicamente se utilizan para cubrir demandas del sector eléctrico. Esto no es suficiente para satisfacer las demandas del sector residencial, el cual depende de la leña para actividades domésticas. El sector del transporte tiene una dependencia neta de combustibles fósiles e hidrocarburos que deben ser importados, lo que pone en riesgo la economía nacional ya que estamos expuestos a los precios internacionales del petróleo. A pesar que existe un gran potencial para aprovechar fuentes energéticas renovables (eólica, solar, geotérmica e hidráulica), únicamente se aprovecha menos del 20% de estas.

Finalmente se presentan varias propuestas que se consideran estratégicas para alcanzar los objetivos de seguridad energética y desarrollo energético sostenible de Guatemala. Entre estas destacan: el desarrollo de marco normativo e incentivos efectivos para la incorporación de energía de fuentes renovables en el Sistema Nacional Interconectado (SIN); el abordaje de los problemas de abastecimiento de combustibles del sector residencial y transporte; y, llenar vacíos importantes de información estratégica para lograr los objetivos de desarrollo energético de Guatemala.

Abstract

With the purpose of facing the energy challenges of the future and securing a sustainable energy supply in Guatemala; the Science and Technology Research Facility (INCYT) at Rafael Landivar University, developed the Guatemala Energy Profile.

The Guatemala Energy profile was developed in three main stages. During the first stage, energy data and statistics were compiled from primary sources which included the Ministry of Mines and Energy (MEM), the Energy Authority (AMM) and the National Electricity Commission (CNEE). This information was used to develop an analytical framework that includes: an energy data base an online visualization center (www.incyt.org) and set of performance indicators for the period of 2001-2016.

During the second stage, we mapped our renewable and non-renewable energy resources and built an energy geographic information system. In addition, we quantified the energy production from fossil and renewable technologies and estimated the energy potential of hydro, solar, wind and geothermal power in the country.

Finally, in the third part, we conducted a life cycle and water footprint assessment of the National Interconnected System (SNI). Life cycle assessment (LCA) under ISO 14040, 14044 and 14046 are being used internationally to benchmark and communicate the environmental performance of production systems. The application of LCA methodology as an analytical framework for energy systems in Guatemala is the first of its kind.

The results from our analysis show that in terms of primary energy, firewood, is the most important resource in the country. Firewood is used to satisfy domestic household demands in rural areas. Energy consumption during the 2001-2016 period, has increased 38%. Indicators like per capita energy consumption (4.41 BOE/hab) and per capita energy production (3.87 BOE/hab) clearly show that local primary energy sources are not enough to satisfy energy demands, and therefore, there is a need to import fossil fuels for the transportation sector. Energy intensity indicators also show that decoupling is low. These indicators are evidence of unsustainable consumption patterns and low technological and industrial development.

Petroleum extraction, which is mostly exported, is decreasing in the las years. The lack of infrastructure for petroleum refinery and the recent increment of fossil fueled electricity generation keeps the country importing fossil fuels. Imports from fossil fuels used mainly in the transport sector, are subject to international oil prices creating high socioeconomic risks.

In recent years, renewables like solar and wind power have increased their participation. The potential resources assessment suggests that, although there are enough resources for a sustainable supply, only 20% of these are being harnessed.

The life cycle assessment of the electricity mix, provides a set of 12 environmental impact indicators that can be used as a benchmark. From these, the carbon footprint of 1 kWh of electricity was estimated at 0.418 kg of CO2-eq; the land footprint was quantified at 0.08 m2 and the water

footprint was estimated at 9 liters of water per kWh. From the whole mix of technologies supplying electricity to the national grid, carbon and fuel oil contribute to more than 60% of the total impacts of each of the environmental impact categories.

As a conclusion, we propose a series of strategies to reach a secure and sustainable energy supply in Guatemala. Amongst them: the development of a regulatory and legal framework to encourage the incorporation of renewable energy into the national interconnected system; acknowledgement of the fuel needs for the transportation and residential sectors; and filling the information gaps to reach energy security goals in Guatemala.

Siglas y Acrónimos

2D	Dos dimensiones
3D	Tres dimensiones
4D	Cuatro dimensiones
ACCV	Análisis de Costos de Ciclo de Vida
ACRG	Asociación de Combustibles Renovables de Guatemala
ACV	Análisis de Ciclo de Vida
ACVC	Análisis del Ciclo de Vida Consecuente
ACVA	Análisis del Ciclo de Vida Atribucional
ACVS	Análisis de Ciclo de Vida Social
ADP	Potencial de Agotamiento Abiótico (ADP por sus siglas en inglés)
ADP Elements	Potencial de Agotamiento Abiótico de Recursos Minerales (ADP por sus siglas en inglés)
ADP Fossil	Potencial de Agotamiento Abiótico de Recursos Fósiles (ADP por sus siglas en inglés)
AMD	Disponibilidad Demanda (AMD por sus siglas en inglés)
AMM	Administrador del Mercado Mayorista
AP	Potencial de Acidificación (AP por sus siglas en inglés)
API	Instituto Americano de Petróleo (API por sus siglas en inglés)
ASCV	Análisis de Sostenibilidad de Ciclo de Vida
ASTM	Asociación Americana de Ensayo de Materiales (ASTM por sus siglas en inglés)
AWARE	Disponibilidad de Agua Remanente (AWARE por sus siglas en inglés)
BM	Banco Mundial
BEP	Barriles Equivalentes de Petróleo
BTU	Unidad Térmica Británica (BTU por sus siglas en inglés)
KBEP	Miles de Barriles Equivalente de Petróleo (KBEP por sus siglas en inglés)
CdTe	Cadmio-Telurio
CFC	Clorofluorocarbono
CIGS	Cobre, Indio, Galio y Selenio
CNEE	Comisión Nacional de Energía Eléctrica
CML	Instituto de Ciencias Ambientales (CML por sus siglas en holandés)
CMMAD	Comisión Mundial para el Medio Ambiente y el Desarrollo
CO	Monóxido de Carbono
CO_2	Dióxido de Carbono
CO_2eq	Dióxido de Carbono Equivalente

CSP	Energía Solar por Concentración (CSP por sus siglas en inglés)
DGH	Dirección General de Hidrocarburos
EICV	Evaluación del Impacto del Ciclo de vida
EP	Potencial de Eutrofización (EP por sus siglas en inglés)
EPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés)
Eq	Equivalente
FEATP	Potencial de Toxicidad Ecosistemas de Agua Dulce (FEATP por sus siglas en inglés)
GDR	Generador Distribuido Renovable
GLP	Gas Licuado del Petróleo
GOES	Satélite Ambiental Geoestacionario Operacional (GOES por sus siglas en inglés)
GW	Giga Watt
GWP	Potencial de Calentamiento Global (GWP por sus siglas en inglés)
H	Hidrógeno
Ha	Hectárea
He	Helio
HTP	Potencial de Toxicidad Humana (HTP por sus siglas en inglés)
IAEA	Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA por sus siglas en inglés)
IEDS	Indicadores Energéticos para el Desarrollo Sostenible
ICV	Inventario del Ciclo de Vida
INE	Instituto Nacional de Estadística
IGH	Irradiación Global Horizontal
ISE	Índice de Sostenibilidad Energética
ISO	Organización Internacional de Estandarización (ISO por sus siglas en inglés)
Kg	Kilogramo
Km	Kilómetro
kVa	Kilo Vatio
LUC	Competición Uso de Suelo (LUC por sus siglas en inglés)
m^2	Metros cuadrados
m^3	Metros cúbicos
MAETP	Potencial de Toxicidad de Ecosistemas Marinos
MARN	Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales
MCDA	Análisis Multi-Criterio (MCDA por sus siglas en inglés)
MEM	Ministerio de Energía y Minas
MJ	Mega Joule
N_2	Nitrógeno

NAMA	Acción de Mitigación Nacionalmente Apropiada (NAMA por sus siglas en inglés)
NOx	Óxidos de Nitrógeno
NREL	Laboratorio de Energía Renovable de Estados Unidos (NREL por sus siglas en ingles)
GEI	Gases de Efecto Invernadero
O_2	Oxígeno
O_3	Ozono
ODP	Potencial de Deterioro de la Capa de Ozono (ODP por sus siglas en inglés)
OEA	Organización de los Estados Americanos
O&M	Operación y mantenimiento
PIB	Producto Interno Bruto
PO43-	Fosfato
POCP	Potencial de Formación Fotoquímica de Ozono (POCP por sus silgas en inglés)
PRONACOM	Programa Nacional de Competitividad de Guatemala
PS	Procesos de Sistema
PU	Procesos Unitarios
PV	Fotovoltaico (PV por sus siglas en ingles)
Sb	Antimonio
SETAC	Sociedad de Toxicología y Química Ambiental (SETAC por sus siglas en inglés)
SIN	Sistema Nacional Interconectado
SO_2	Dióxido de Azufre
SOS	Sistema de Sistemas (SOS por sus siglas en inglés)
STAMP	Evaluación de Sostenibilidad y Principios de Medición (STAMP por sus siglas en inglés)
SWERA	Evaluación de Recursos de Energía Solar y Eólica (SWERA por sus siglas en inglés)
TC	Turbina de Condensación
TE	Turbina de Escape
TETP	Potencial de Toxicidad de Ecosistemas Terrestres
T&D	Transmisión y Distribución
UAEE	Usuario Autoproductor con Excedentes de Energía
Undesa	Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de Naciones Unidas (Undesa por sus siglas en inglés)
UNEP	Programa Ambiental de las Naciones Unidas (UNEP por sus siglas en inglés)
UV	Ultravioleta
UVB	Ultravioleta B (onda media)
VF	Factor de Variabilidad (VF por sus siglas en inglés)
VOCs	Compuestos Orgánicos Volátiles (VOCs por sus siglas en inglés)

WA	Disponibilidad de Agua en la cuenca (WA por sus siglas en inglés)
WEAP	Sistema de Evaluación y Planeación del Agua (WEAP por sus siglas en inglés)
WEC	Consejo Mundial de Energía (WEC por sus siglas en inglés)
WIDSOM	Mapeo General Integrado de Demanda y Oferta de Leña (WIDSOM por sus siglas en inglés)
Wp	Watt pico
WSI	Índice de Estrés Hídrico (WSI por sus siglas en inglés)
WTA	Disponibilidad de Agua (WTA por sus siglas en inglés)
WU	Extracción de Agua en la Cuenca (WU por sus siglas en inglés)
WULCA	Uso de Agua dentro del Análisis de Ciclo de Vida (WULCA por sus siglas en inglés)

Introducción

La presente entrega del *Perfil energético de Guatemala* (*Pegua*), en su segunda edición, la cual fue preparada y publicada entre 2016 y 2018, provee una lectura actualizada de los aspectos clave relativos a la situación de la energía en el país. Los objetivos que orientaron la realización de este esfuerzo son: a) medir, analizar, interpretar y comunicar el estado de la situación de la energía en Guatemala; b) establecer los fundamentos científicos para la formulación o perfeccionamiento del marco político y elementos estratégicos vinculados, con énfasis en la búsqueda del desarrollo sostenible energético del país; c) estimular la adopción de acciones territoriales con escala, continuidad y esfuerzo humano, financiero y físico acorde a las necesidades del sector energético.

Para el cumplimiento de estos objetivos se organizó el trabajo en cuatro grandes componentes. La primera parte, capítulo I, presenta un marco conceptual y metodológico general, el cual es básico para el abordaje, interpretación y análisis de la información sobre la energía en Guatemala. Un aspecto destacable es la descripción de la propuesta metodológica para el análisis de sostenibilidad del sector energético con base en procedimientos estandarizados de ciclo de vida.

La segunda parte, capítulo II, integra y analiza los reportes anuales e informes estadísticos del Ministerio de Energía y Minas (MEM), la Comisión Nacional de Energía Eléctrica de Guatemala (CNEE) y el Administrador del Mercado Mayorista (AMM), para el período que va de 2001 a 2016. Con esta información se elaboraron las bases de datos de energía y se presentan indicadores de suministro, demanda y producción del sector energético.

En la tercera parte, capítulos III y IV, se aborda la cuantificación y mapeo de los recursos energéticos, tanto renovables como no renovables. Resulta destacable haber logrado centralizar información dispersa; además, este es el primer documento académico que ofrece y analiza información sobre el potencial energético de energía no renovable, a saber, derivada de la biomasa, solar, eólica, hidroelectricidad y geotérmica.

En la cuarta parte, capítulo V, se evalúa la sostenibilidad ambiental del Sistema Nacional Interconectado (SNI). En este caso, se presenta el análisis del componente ambiental como un primer paso y como un caso de estudio, ya que un marco analítico de sostenibilidad energética completo deberá incluir las dimensiones sociales y económicas. Esto será desarrollado en futuras presentaciones del *Pegua*.

La energía eléctrica es uno de los principales insumos para otros sistemas productivos. En la actualidad, indicadores como la huella de carbono y la de agua están siendo utilizados para determinar alternativas de producción sostenible. Por lo tanto, presentar información acerca del suministro de electricidad incrementa la precisión en la medición de las huellas ambientales de sistemas productivos del país. Las huellas ambientales son en este momento, la manera en la que las industrias introducen mejoras en la eficiencia ambiental y reducen sus impactos en el uso de los recursos naturales.

En la quinta y última parte se desarrollan las consideraciones finales del *Pegua*, en las cuales se sintetizan e integran los principales hallazgos del estudio. Asimismo, a partir de lo anterior se desarrollan las principales propuestas con énfasis en directrices para llenar los vacíos de información, para alcanzar la seguridad energética y el desarrollo energético sostenible de Guatemala.

1

CAPÍTULO

MARCO CONCEPTUAL Y METODOLÓGICO PARA EL ANÁLISIS DE LA SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA

1. Marco conceptual y metodológico para el análisis de la sostenibilidad energética

Autor: Edgar E. Sacayón

1.1 Introducción

La planificación energética resulta de una compleja interacción de factores: sociales, políticos, tecnológicos, económicos y ambientales (Hadian & Madani, 2015), por lo que es necesario un enfoque de sistemas para evaluar la sostenibilidad energética. Actualmente, uno de los indicadores más utilizados para evaluar la sostenibilidad ambiental es la huella de carbono. Este indicador se enfoca en el área de protección ambiental atmosférica. Muchos esfuerzos se han producido para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y reducir los efectos del cambio climático. Sin embargo, utilizar una sola métrica de evaluación produce un sesgo y subestima otros efectos negativos producidos por la generación de energía tanto renovable como a partir de combustibles fósiles.

Entre los principales alcances de este trabajo está desarrollar un marco de análisis de sostenibilidad energética que incluya las variables y los indicadores más apropiados y, así, puedan ser utilizados por los sectores de la sociedad e incidir en la creación de políticas energéticas y públicas, garantizando la sostenibilidad energética.

1.2 Concepto de sostenibilidad y su aplicación al *Perfil energético de Guatemala*[1]

Cuando en 1987 la Comisión Mundial sobre Ambiente y Desarrollo de la Organización de las Naciones Unidas (Onu) presentó públicamente el *Informe Brundtland* (como aparece citado en el informe *Nuestro futuro común*), cobró notoriedad mundial el concepto de desarrollo sostenible.

Diversas han sido las interpretaciones del concepto, sobre todo cuando se busca hacerlo operativo. Sin lugar a dudas, al dirigirse al funcionamiento de las diversas sociedades del mundo, uno de los elementos que apuntaló este concepto fue la búsqueda de balances, sobre todo porque se hizo hincapié en la interdependencia entre la economía y el medio ambiente, y los profundos impactos que la primera ha venido generando sobre el ambiente, sin que la pobreza en el mundo pudiera erradicarse a ritmos razonables.

Así, el citado informe promulgó la necesidad de gestionar un balance en las dimensiones económica, social, institucional y ambiental. Esto hace referencia a la justa medida para cada dimensión dentro de las realidades diversas de las naciones. La gestión balan-

1 Con base en URL (2015). Política Ambiental de la Universidad Rafael Landívar. Guatemala.

ceada de esas dimensiones debiese conducir a mejores niveles de calidad de vida para las sociedades, sin provocar la degradación irreversible de los ecosistemas.

Es notorio que las sociedades hayan adoptado el discurso del desarrollo sostenible, especialmente en las políticas públicas, donde se suele hacer referencia a las cuatro dimensiones ya referidas. Sin embargo, con frecuencia se utilizan erróneamente los conceptos de desarrollo sostenible, desarrollo y sostenibilidad.

Utilizando el enfoque de sistemas, Gilberto Gallopín, ecólogo argentino, señaló la necesidad de hacer una diferenciación entre los conceptos de desarrollo y sostenibilidad. El primero, señala Gallopín (1994), apunta claramente a la idea de cambio gradual y direccional de una situación, condición o estado. La sostenibilidad, por su parte, denota la capacidad de mantenimiento en el tiempo de una situación, condición o estado. Se refiere, entonces, a una trayectoria. Este es el enfoque que se adopta en el contexto del presente perfil.

Así, la sostenibilidad es un atributo de los sistemas abiertos que tienen interacciones con su exterior. No es un estado fijo de constancia, sino la preservación dinámica de la identidad esencial del sistema, en medio de cambios permanentes. Un número reducido de atributos genéricos puede representar las bases de la sostenibilidad (por ejemplo, la disponibilidad de recursos, la viabilidad de los ecosistemas, etc).

Estos conceptos se han aplicado al propósito central del presente perfil, es decir, se ha tomado en cuenta el enfoque de propiciar que el sistema socioecológico evidencie un desempeño balanceado entre la disponibilidad equitativa de acceso a los servicios de energía para todas las personas y la preservación (incluso restauración) del ambiente natural, incluyendo las propiedades y funciones de los ecosistemas.

Esto significa buscar los mejores "estados", especialmente para los componentes ambientales. Dichos estados de situación deseable constituyen el objeto de la sostenibilidad, o sea, las mejoras alcanzadas en un momento determinado para que esos "componentes ambientales", por ejemplo, sean capaces de sostenerse en el tiempo (sostener una trayectoria cualitativamente creciente).

Ahora bien, la posibilidad de lograr la sostenibilidad en la dimensión o subsistema ambiental depende de la sostenibilidad del "sistema completo". Sin embargo, no se logrará la sostenibilidad ambiental si no se gestionan de manera balanceada y apropiada las otras dimensiones o subsistemas: el social, el económico y el institucional.

Con estos conceptos, es posible concluir que el desarrollo energético sostenible de Guatemala se refiere a un proceso de mejoramiento cuantitativo y cualitativo que puede sostenerse en el tiempo, al menos para las dimensiones señaladas. Este concepto es sistémico, no parcial: el mejoramiento debe ocurrir de manera simultánea para las cuatro dimensiones o subsistemas.

1.3 Marcos conceptuales y metodológicos para el análisis de sostenibilidad

Los marcos conceptuales y metodológicos para evaluar la sostenibilidad se han desarrollado con diferentes enfoques. Estos tienen como propósito evaluar el desempeño de nuestras acciones y proporcionar elementos de análisis a los tomadores de decisiones (Ness *et al.,* 2007). Se clasifican los marcos de análisis de sostenibilidad empleando tres criterios: aquellos que utilizan índices e indicadores; los que evalúan los flujos de materiales y energía desde la perspectiva del ciclo de vida de un producto o servicio; y quienes evalúan los efectos de un cambio en una política pública o implementación de un proyecto. Por lo tanto, no todos los marcos metodológicos que se han desarrollado cumplen con la función de integrar su análisis las dimensiones económicas, sociales y ecológicas. Algunos tienen deficiencias en su resolución temporal (corto y largo plazos), y otros, en su resolución espacial. Debido a esto, Ness *et al.* (2007), sugieren que el marco de evaluación de sostenibilidad deberá ayudar a tomar las acciones correctas, para que los sistemas socioecológicos sean sostenibles a escalas locales y globales, a corto y largo plazos.

Singh, Murty, Gupta & Dikshit (2009) también realizan una revisión exhaustiva de metodologías de evaluación de sostenibilidad, e identifican algunos índices relevantes y los métodos utilizados para construir índices compuestos. El desarrollo de índices de sostenibilidad ha adquirido una gran relevancia en el ámbito político, ya que logran conceptualizar fenómenos relacionados con sistemas sociales, económicos y ecológicos, transmitiendo información compleja de una manera simple a los tomadores de decisiones (Singh, Murty, Gupta & Dikshit, 2009). Para comprender una descripción detallada de los marcos conceptuales y metodológicos que se han sugerido para evaluar la sostenibilidad, se recomiendan los artículos de Parris & Kates (2003), Ness *et al.* (2007) y Singh e*t al.* (2009).

Las herramientas y los marcos metodológicos para evaluar la sostenibilidad dependerán entonces de su aplicación. Consecuentemente, marcos metodológicos para evaluar la sostenibilidad de productos serán muy diferentes a los marcos para evaluar la sostenibilidad de una política pública. Sin embargo, todos deberán atender las tres dimensiones de la sostenibilidad: ambiente, sociedad y economía.

Otra propuesta de un grupo de científicos que ha trabajado en el tema desde los años 90 es utilizar los ocho principios de *Sustainability Assessment and Measurement Principles* (STAMP)[2] para el desarrollo de marcos de análisis de sostenibilidad. Primero, los marcos deben tener la visión de proporcionar bienestar a todas las generaciones presentes y futuras, cuidando la capacidad productiva de la biósfera. Segundo, deben considerar los sistemas económicos, sociales y ecológicos como un conjunto completo, así como todas las dinámicas e interacciones que ocurren entre estos, incluyendo los problemas de gobernanza. Tercero, deben tener un alcance adecuado, que incorpore marcos de tiempo a largo y corto plazos, así como unidades

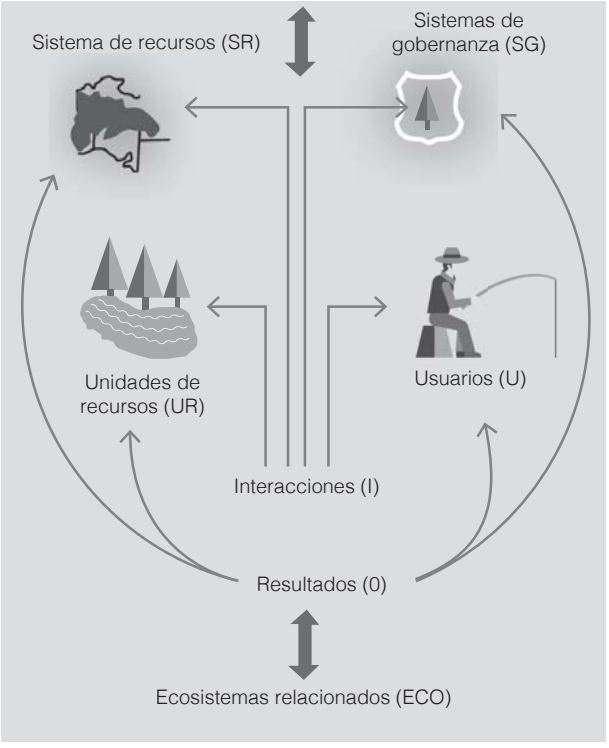
2 STAMP= Principios para la evaluación y medición de la sostenibilidad, por sus siglas en inglés (*Sustainability Assessment and Measurement Principles*).

geográficas relevantes. Cuarto, deben utilizar marcos metodológicos estandarizados para la obtención de indicadores que puedan ser comparados con valores objetivos. Quinto, que los datos y métodos posean transparencia, sean de acceso público, y expliquen todas las suposiciones e incertidumbres asociadas con los resultados de los análisis. Sexto, que puedan ser efectivamente comunicados. Séptimo, que involucren una amplia participación pública reflejando las preocupaciones de la sociedad y sus necesidades. Y por último, que ofrezcan una continuidad en su medición y adaptabilidad a los cambios (Pinter, Hardi, Martinuzzi & Hall, 2012).

Ostrom (2009) propone un enfoque de sistemas y define el sistema socioecológico como área de estudio, el cual se muestra en la figura 1. Para ello, divide su marco en cuatro subsistemas, los cuales a su vez tienen múltiples niveles jerárquicos de variables. Este último propone que, para que cualquier análisis de sostenibilidad sea efectivo, se consideren las múltiples dimensiones, escalas y capas de variables de los factores sociales, económicos y políticos que determinan las acciones de los usuarios. Entre los subsistemas describe los sistemas de recursos, las unidades de los recursos, los sistemas de gobernanza y los usuarios de los recursos.

Figura 1. Marco socioecológico según Omstrom

Detalles de economía, sociedad y política



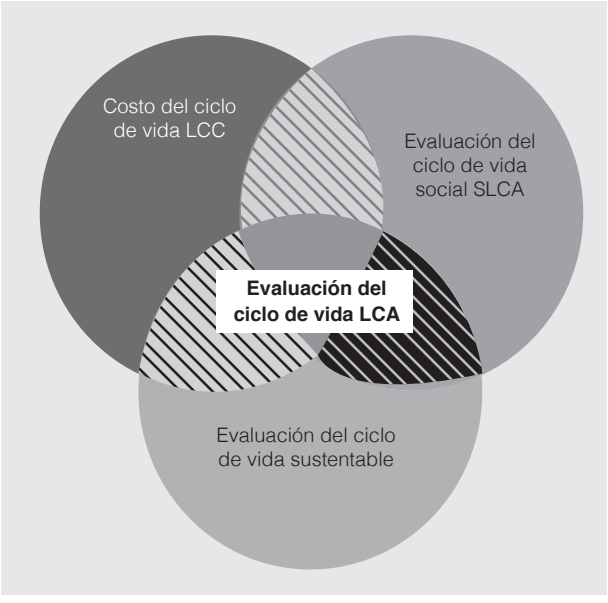
Fuente: Ostrom (2009).

Anteriormente, en Guatemala se ha utilizado un marco conceptual y metodológico basado en los conceptos de ecología de sistemas y sistemas complejos, el cual aborda las relaciones de la sociedad con el medio ambiente (Iarna-URL, 2012). A este marco se le ha denominado Sistema Socioecológico y ha sido

ampliamente discutido (Berkes, Colding & Folke, 2008; Gallopín, 2006; Ostrom, 2009). El sistema socioecológico contiene cuatro subsistemas, los cuales interactúan unos con otros: el institucional, el social, el económico y el subsistema natural. En cada uno se pueden obtener variables e indicadores que permiten identificar las relaciones y flujos de materiales y energía entre ellos.

La UNEP-Setac[3] (2011) ha propuesto un nuevo marco analítico de la sostenibilidad desde la perspectiva de ciclo de vida. El análisis de sostenibilidad de ciclo de vida (ASCV), presentado en la figura 2, ha comenzado a desarrollarse durante la última década y puede ser considerado como la fusión de tres métodos de análisis para la evaluación de sistemas de producción: 1) el análisis de costos de ciclo de vida (ACCV); 2) el análisis de ciclo de vida (ACV), y 3) el análisis de ciclo de vida social (ACVS). El ACCV evalúa el costo económico de un producto o servicio durante todas las etapas de manufactura y es un instrumento para la toma de decisiones que se originó en el área económica. El ACV, por el otro lado, se originó en la escuela de la ecología industrial en los años 90. Este evalúa los impactos ambientales durante la cadena de suministro de un producto. El ACVS es de los métodos más recientes que han surgido en el nuevo milenio y sigue en proceso de investigación y desarrollo. Estos tres métodos se han fusionado para así abordar las tres dimensiones de la sostenibilidad.

Figura 2. Análisis de sostenibilidad de ciclo de vida



Fuente: Elaboración propia

1.4 Análisis de sostenibilidad energética

En términos generales, se entiende el estudio de la sostenibilidad energética como el concepto de la sostenibilidad aplicado a la energía (Rosen, 2009). El uso de la energía y los servicios que ella provee han sido considerados como instrumentos para alcanzar el desarrollo sostenible (Farinelli, 1999). La emisión de gases de efecto invernadero (GEI) procedentes de la generación de energía con combustibles fósiles es parte del problema del cambio climático, por lo que se propone utilizar sistemas energéticos renovables. Sin embargo, explotar fuentes renovables también tiene consecuencias ambientales, económicas y sociales.

La planificación energética resulta de una compleja interacción de factores sociales, políticos, tecno-

3 UNEP-Setac es un consorcio formado por el Programa Ambiental de las Naciones Unidas (UNEP, por sus siglas en inglés) y la Sociedad de Toxicología y Química Ambiental (Setac, por sus siglas en inglés) que promueven el análisis de sistemas de producción desde la perspectiva de ciclo de vida.

lógicos, económicos y ambientales (Hadian & Madani, 2015). Por lo tanto, conceptualizar la sostenibilidad energética y desarrollar un marco de análisis que aborde estas múltiples dimensiones es fundamental para identificar las tecnologías más efectivas en producción de energía y los servicios que estas proporcionan. Hasta el momento no existe una definición universal de sostenibilidad energética, por lo que Rosen (2009) sugiere una provisión de los servicios que la energía provee, para satisfacer las necesidades de todas las personas, ahora y en el futuro, a un costo efectivo y sin ocasionar daños ambientales.

Los marcos metodológicos para el análisis de la sostenibilidad energética se han desarrollado utilizando enfoques de: 1) políticas y planificación; WEC, 2015; Doukas, Papadopoulou, Savvakis, Tsoutsos & Psarras, 2012; Neves & Leal, 2010; Undesa-IEA, 2015; 2) sistemas (Hadian & Madani, 2015; Afgan, Carvalho & Hovanov, 2000; Evans, Strezov & Evans, 2009; Hepbasli, 2008; Liu, 2014) y 3) productos (Santoyo-Castelazo & Azapagic, 2014; Atilgan & Azapagic, 2016). Los primeros abordan el análisis de sostenibilidad energética desde la perspectiva del sistema de producción y usan el marco de ASCV.

La Agencia Internacional de Energía Atómica (2005) utiliza el marco Estado-Presión-Impacto-Respuesta desarrollado por la Comisión de Naciones Unidas para el Desarrollo Sostenible para evaluar políticas a escala de país. Este marco clasifica 31 indicadores en temas y subtemas que abordan las tres dimensiones de la sostenibilidad. Adicionalmente, incluye una dimensión institucional (AIEA, 2005). De manera similar, el Consejo Mundial de Energía (WEC, por sus siglas en inglés)[4] propone evaluar a los países del mundo usando un indicador de sostenibilidad energética denominado "índice del trilema energético".

Este sistema evalúa la posibilidad de proporcionar políticas de energía sostenible en tres dimensiones: 1) seguridad energética, 2) equidad energética y 3) sostenibilidad ambiental. Para el WEC, la seguridad energética involucra la administración adecuada de las fuentes primarias de energía, tanto de fuentes internas como externas; la confiabilidad de la infraestructura y la capacidad de las compañías energéticas de satisfacer las demandas actuales y futuras (WEC, 2016). La equidad energética se refiere a la accesibilidad y asequibilidad de la energía para los diferentes sectores de la población, mientras que la sostenibilidad ambiental se refiere a la consecución de la eficiencia energética y la implementación de fuentes energéticas con bajas emisiones de carbono. El modelo de análisis de sostenibilidad energética del WEC pondera 23 indicadores en un solo indicador.

En contraste, Neves & Leal (2010) proponen que la escala local es clave para el desarrollo de fuentes energéticas sostenibles y su aplicación en la mitigación del cambio climático. Los autores proponen un marco para la evaluación de la sostenibilidad energética compuesto por 18 indicadores que puede ser utilizado como una herramienta de planificación a nivel municipal. Uno de los criterios más relevantes que utilizaron para seleccionar los indicadores fue su aplicabilidad para la

4 Información accesible en: https://www.worldenergy.org/data/trilemma-index/

toma de decisiones en la planificación energética local. De la misma manera, Doukas *et al.* (2012) proponen evaluar la sostenibilidad energética de comunidades rurales utilizando el análisis de componentes principales. Bagliani, Dansero & Puttilli (2010) sugieren que para que exista un desarrollo sostenible debe considerarse la relación entre el territorio y sus fuentes energéticas renovables. Además, proponen que se deben considerar las complejas relaciones socioeconómicas que existen en una región territorial para la explotación sostenible de las fuentes energéticas.

Musango & Brent (2011) plantean que el marco de análisis que utiliza modelos de sistemas dinámicos puede producir información relevante para la creación de políticas públicas. El análisis de sistemas dinámicos es una metodología para evaluar sistemas complejos provenientes de los campos de la ecología industrial, y se basa en modelos matemáticos de circuitos de retroalimentación. A escala de sistemas más complejos, donde se consideran no solo las tecnologías sino también el entorno, se han identificado los factores más importantes que conducirían al desarrollo de sistemas energéticos sostenibles. De una manera pragmática, se ha propuesto que el uso de fuentes y transportadores de energía renovables, un incremento en la eficiencia energética, la reducción de impactos ambientales y una mejora en la aceptabilidad socioeconómica (asequibilidad, equidad y uso del suelo) ayudarían a desarrollar sistemas energéticos sostenibles (Rosen, 2009).

Por otra parte, Hadian & Madani (2015) han sugerido utilizar el marco de "Sistema de Sistemas" para evaluar la sostenibilidad de fuentes de energía renovable y, con esto, reducir los efectos secundarios de la implementación que estas tecnologías verdes producen. Su razonamiento es que a pesar de que las tecnologías renovables tienen menores emisiones de GEI, estas producen otros impactos secundarios como el consumo de agua y uso del suelo. Para no subestimar los impactos secundarios y obtener una visión completa de las repercusiones ambientales y económicas del aprovechamiento de fuentes energéticas renovables, los autores han propuesto utilizar el marco Sistema de Sistemas (SOS, por sus siglas en inglés). Este marco agrega, en un solo índice, las huellas ambientales de varios sistemas que se ven afectados por la implementación de tecnologías energéticas renovables.

En consecuencia, proponen el indicador "huella relativa agregada" para evaluar estos sistemas; es decir, utilizar la huella de carbono (sistema clima), la huella hídrica (sistemas hídricos), uso del suelo (sistema tierra) y el costo de generación de energía (sistema económico) para crear un indicador único que integre todos estos sistemas. Cabe mencionar que estos indicadores utilizan un enfoque de análisis de ciclos de vida que incluye todas las etapas de la producción energética. En el caso de los costos económicos, estos son los costos nivelados, que incluyen el costo capital, el costo de operación y mantenimiento, etc. Para agregar el índice, Hadian & Madani (2015) proponen utilizar un Análisis Multi-criterio (MCDA), que es una metodología diseñada para tomar decisiones cuando existe una variedad de indicadores que no se relacionan entre sí, pero que son de igual importancia para la decisión final.

Entre los marcos metodológicos que evalúan la sostenibilidad directa de las tecnologías de producción de energía se encuentran los trabajos de Afgan *et al.* (2000), quienes fueron unos de los primeros en proponer el desarrollo de indicadores para cuatro categorías: recursos, ambiente, sociedad y economía. Incluso describen las características que estos indicadores deben poseer para ser representativos de la sostenibilidad. Entre estos están: 1) deben reflejar el concepto de sostenibilidad; 2) deben ser medibles como parámetros físicos; 3) integrarán información temporal apropiada; 4) la información debe ser confiable; 5) reflejarán una visión estratégica; 6) informarán sobre la optimización del sistema, y 7) describirán la longevidad del diseño.

Sin embargo, los procedimientos matemáticos para ponderar estos indicadores los hacen sumamente complicados de aplicar. Evans *et al.* (2009) asumen que todos los indicadores tienen igual relevancia para el desarrollo sostenible. Estos autores evaluaron únicamente tecnologías renovables utilizando precio de la electricidad generada, emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) durante el ciclo de vida, disponibilidad de recursos renovables, eficiencia energética de conversión, uso del suelo, consumo de agua e impactos sociales. Como resultado, encontraron que la energía eólica es de las tecnologías con menores impactos sociales, menores emisiones de GEI y menor consumo de agua, en comparación con todas las demás opciones. Pero esta posee una mayor cantidad de suelo y tiene un mayor costo de inversión capital.

Hepbalsi (2008), por otro lado, propone utilizar el análisis de exergía para evaluar el desempeño de diferentes tecnologías. La exergía es una propiedad termodinámica de un sistema que permite evaluar su potencial de producir trabajo energético (Dincer & Rosen, 2012). Sin embargo, el análisis exergético es un área de investigación y desarrollo que hace un poco difícil su interpretación para tomadores de decisiones. Liu (2014), por el otro lado, propone un marco de análisis basado en un indicador general que pondera indicadores básicos, utilizando complejas operaciones aritméticas. Los indicadores básicos están clasificados en tres categorías: ambientales (GEI); económicos (costos netos presentes, retorno de la inversión y tiempo de recuperación de la inversión); y sociales (la cantidad de empleos generados y los residentes beneficiados). Todos ellos, expresados durante el ciclo de vida del proyecto.

Finalmente, algunos estudios han utilizado el enfoque de ciclos de vida para evaluar la sostenibilidad energética desde la perspectiva del producto (Atilgan & Azapagic, 2016; Santoyo-Castelazo & Azapagic, 2014). Este enfoque permite tener una visión de la sostenibilidad de la cadena de suministro y todas las etapas de manufactura, integrando en un marco analítico las tres dimensiones de la sostenibilidad: ambiente, economía y sociedad.

Por ejemplo, Santoyo-Castelazo & Azapagic (2014) evalúan la matriz de energía eléctrica de México y sus futuros escenarios, usando un conjunto de indicadores de ciclo de vida en las tres dimensiones, como lo muestra la figura 3. Estos investigadores agregan una etapa adicional en el análisis al realizar múltiples escenarios de penetración de tecnologías en el futuro. En la última etapa, para evaluar la

multiplicidad de indicadores, utilizan el análisis multicriterio para escoger las alternativas con menores impactos y con mayor aceptación para el desarrollo sostenible. Atilgan & Azapagic (2016) emplean el mismo marco analítico para evaluar la sostenibilidad energética de Turquía.

Figura 3. Marco de referencia para el análisis de la sostenibilidad de sistemas energéticos con una perspectiva de ciclo de vida en sus tres dimensiones

Fuente: Santoyo-Castelazo y Azapagic (2014)

1.5 Estudios sobre sostenibilidad energética en Guatemala

En Guatemala solo se han publicado dos estudios que abordan la sostenibilidad energética desde dos perspectivas distintas. Uno es el trabajo de Meléndez (2014), el cual aborda la sostenibilidad energética del país usando un enfoque bastante similar al del Consejo Mundial de Energía. El otro es el trabajo de Ochaeta (2014), el cual evalúa los escenarios del plan de expansión de generación de energía eléctrica 2014-2028 y considera sus implicaciones para el desarrollo sostenible.

Meléndez (2014) analiza la sostenibilidad energética de Guatemala utilizando 23 indicadores cualitativos: 2 para la dimensión social, 16 para la dimensión económica y 5 para la dimensión ambiental del desarrollo sostenible. Estos indicadores cualitativos, denominados por el autor como IEDS (indicadores energéticos para el desarrollo sostenible) están basados en el marco conceptual del Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas (Undesa-IAEA, 2007) y pretenden dar una idea de la equidad y seguridad al acceso a fuentes de energía, los patrones de uso y producción; y los impactos en la atmósfera, agua y tierra. Adicionalmente, Meléndez (2014) desarrolló un índice de sostenibilidad energética puramente cuantitativo, que resume en un solo parámetro el desempeño energético del país. Este índice, denominado por el

autor índice de sostenibilidad energética (ISE), está basado en la metodología desarrollada por el Consejo Mundial de Energía (WEC, 2015) que, como fue mencionado anteriormente, pondera más de 20 indicadores en tres dimensiones: la seguridad energética, la equidad energética y la sostenibilidad ambiental. Estas tres dimensiones se normalizan en una escala de 1 a 10 con respecto a su desempeño contextual, el cual está determinado por el producto interno bruto per cápita.

Como resultado de su investigación, Meléndez (2014) presenta un panorama general de la situación energética de Guatemala, con un resultado del ISE de 5.68 sobre 10, lo cual posiciona al país en el lugar 69 de 169 países con los que se comparó. El índice de equidad energética, que representa la dimensión social de la sostenibilidad, se encuentra en 4.81 sobre 10. Según Meléndez, el 14.3% de la población no tiene acceso a la electricidad; el 90% de los requerimientos energéticos del sector residencial es abastecido con leña; en las áreas urbanas el gas licuado del petróleo (GLP) representa el 8% de los requerimientos energéticos residenciales, y es uno de los países con menos consumo anual de electricidad per cápita (514.3 kWh/hab) en Latinoamérica.

En términos de la seguridad energética, la cual representa la dimensión económica del desarrollo sostenible (IAEA, 2005; Meléndez, 2014), Guatemala obtiene un índice de 5.51 sobre 10. Meléndez (2014) concluye que el país no ha desacoplado el consumo de energía con la producción económica debido a que no hay normativas para la regulación de la eficiencia energética en los diferentes sectores industriales; no se aprovecha todo el potencial de los recursos energéticos; hay una dependencia de importaciones de productos derivados de petróleo; y el país ha sido afectado por desastres naturales y crisis económicas.

En cuanto a la dimensión ambiental, el país obtiene una calificación de 7.28 de 10, debido a que posee una baja intensidad de emisiones de CO_2; aunque los valores de partículas en suspensión de 75.14 $\mu g/m^3$ para la calidad del aire superan el límite establecido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) de 50 $\mu g/m^3$ para evitar daños a la salud. Estos resultados son muy similares al *ranking* otorgado por el Consejo Mundial de Energía, el cual posiciona a Guatemala en el lugar 58 de 130 países (WEC, 2015). La calificación del indicador de la dimensión ambiental según el WEC (2015) resulta bastante positiva.

El marco de evaluación usado por Ochaeta (2014) es un poco distinto al de Meléndez (2014). Por un lado, Ochaeta (2014) desarrolla inicialmente una evaluación de la seguridad energética considerando los objetivos de la política energética del país, y luego cuantifica aspectos de las dimensiones económicas, sociales y ambientales de los diferentes escenarios de expansión. Como resultados, demuestra que la producción energética con fuentes nativas de energía proporciona una seguridad energética, sin embargo, la adaptabilidad y la suficiencia pueden estar comprometidas por la dominancia de hidroelectricidad en la matriz energética de Guatemala.

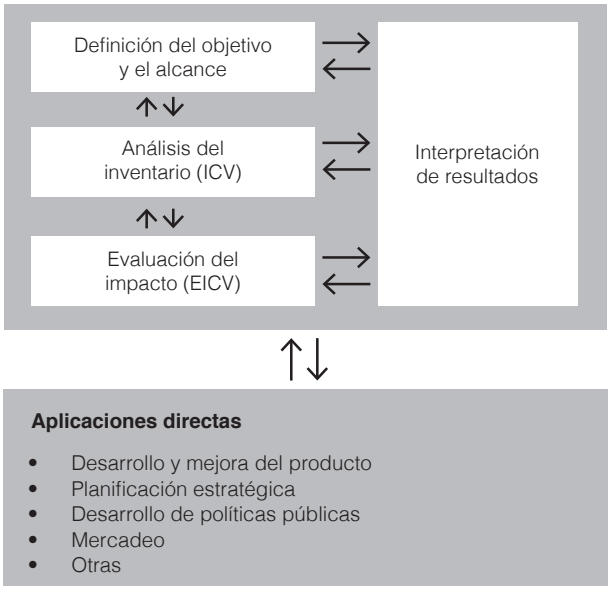
1.6 Introducción al marco de análisis de sostenibilidad de ciclo de vida

En este trabajo se ha adoptado una perspectiva de ciclo de vida para abordar el estudio de la sostenibilidad energética. El análisis de sostenibilidad de ciclo de vida ha sido propuesto como una de las metodologías dentro de las agendas de las Naciones Unidas para alcanzar el desarrollo sostenible. Una de las ventajas de esta perspectiva es que apoya la toma de decisiones con información relevante. Además, las técnicas que utilizan una perspectiva de ciclo de vida conducen a patrones de producción y consumo más sostenible. Otro de los beneficios es que permiten identificar impactos y focalizar esfuerzos para incrementar la eficiencia en el uso de recursos naturales. A diferencia de otros marcos que se enfocan en políticas o sistemas complejos, el análisis de sostenibilidad de ciclo de vida aborda un sistema de producción concreto y cuantificable.

El análisis de sostenibilidad de ciclo de vida usa el marco metodológico del análisis de ciclo de vida ambiental (ACV) estandarizado por las normas ISO 14040 y 14044. El ACV es la metodología utilizada para evaluar los potenciales impactos ambientales asociados con un producto, servicio o sistema productivo durante el ciclo completo de utilidad. Un sistema productivo incluye toda la cadena de suministro, incluyendo las etapas de utilización, desecho y reciclaje. El ACV cuantifica los flujos de masa y energía en el sistema mediante inventarios de materiales, emisiones y energía, así como sus intercambios con el medio ambiente. Otras aplicaciones del ACV son: a) evaluar los potenciales impactos ambientales de productos, procesos u organizaciones; b) evaluar el desempeño ambiental; c) comunicar credenciales ambientales; d) optimización de sistemas productivos, y e) diseño de productos ambientalmente eficientes.

La metodología ACV consta de 4 fases o etapas que se esquematizan en la figura 4: definición del alcance y objetivo, análisis del inventario, evaluación de impacto e interpretación de resultados.

Figura 4. Etapas de un análisis de ciclo de vida



Fuente: Elaboración propia

1.6.1 Definición de alcance y objetivo

Durante la primera fase, definición del alcance y objetivo, se identifica el propósito del estudio y se definen los límites del sistema a analizar. Además, se define cuáles son las aplicaciones para las cuales se utilizará el estudio. Si la intención del estudio es evaluar el estado actual del sistema, se dice que el estudio

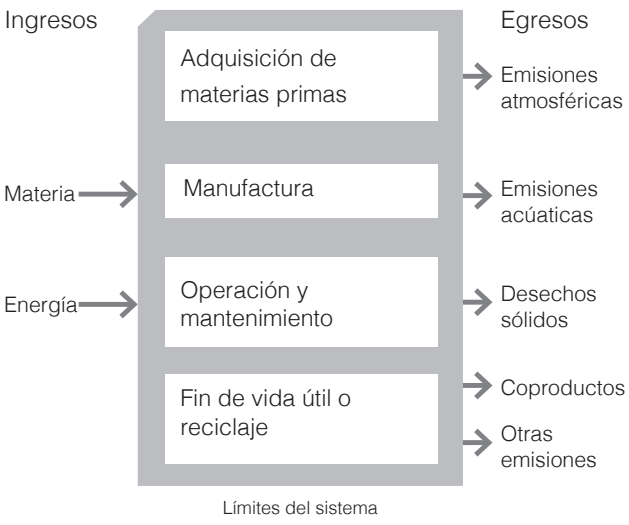
es atribucional o, en otras palabras, es un análisis del ciclo de vida atribucional (ACVA), mientras que, si la intención del estudio es evaluar las consecuencias de un cambio en el sistema productivo, entonces el estudio se convierte en un análisis del ciclo de vida consecuente (ACVC). En ambos casos, se utiliza como parámetro de todo el sistema una unidad funcional. La unidad funcional es una medida cuantitativa de la función que proporciona el sistema en estudio. Por lo tanto, todos los ingresos y egresos de materia y energía se cuantifican en relación con la unidad funcional.

1.6.2 Inventario del ciclo de vida (ICV)

El inventario del ciclo de vida (ICV) es la etapa en la cual se recopilan todos los datos relevantes de un sistema productivo y se transforman a la escala de la unidad funcional. Todas las actividades, materias primas, recursos, emisiones e intercambios con el medio ambiente se cuantifican y utilizan para elaborar un modelo de flujo de masa y energía.

La figura 5 muestra un esquema de un sistema con entradas y salidas durante todas las etapas del ciclo de vida. Los datos para elaborar un inventario pueden obtenerse de una variedad de fuentes, ya sea proporcionadas directamente por la industria o por fuentes secundarias (reportes, revisión de literatura, entrevistas con expertos). Debido a la cantidad de información y recursos que se requiere para construir un inventario se han desarrollado bases de datos de procesos industriales en diferentes regiones del mundo. Estas pueden ser adquiridas por el analista y facilitar el proceso de elaboración del inventario, mediante la adaptación de valores específicos al sistema productivo que se encuentra bajo evaluación. Como resultado final de esta etapa se obtiene un inventario de datos que pueden ser analizados por medio de procedimientos matemáticos, o por medio de *software* para el análisis de inventarios de ciclos de vida.

Figura 5. Esquema de intercambios ambientales durante el ciclo de vida de un producto o servicio



Fuente: Elaboración propia

1.6.3 Evaluación de impacto del ciclo de vida (EICV)

Para la evaluación de impacto, los resultados del inventario de ciclo de vida se clasifican de acuerdo con una cadena de causa-efecto hacia una categoría de impacto ambiental. Cada entrada o salida del sistema se multiplica por un factor de caracterización, que representa el efecto relativo de contribución hacia una de las categorías de impacto. Una variedad de modelos de caracterización han sido desarrollados para evaluar

los impactos ambientales durante diferentes etapas de la ruta causa-efecto. De esta manera, existen modelos que evalúan el impacto durante etapas intermedias de la ruta causa-efecto, y otros que evalúan el impacto al final. Las tres áreas de protección al final de una ruta causa-efecto se han definido como: el ecosistema, la salud humana y el agotamiento de recursos.

Los modelos Eco-Indicador 99[5] y ReCiPe[6] evalúan potenciales impactos ambientales a estas tres áreas de protección, y proporcionan "indicadores de punto final" de la ruta causa-efecto. Por otra parte los modelos de caracterización de etapas intermedias evalúan los potenciales impactos ambientales en etapas tempranas, como el agotamiento de recursos abióticos, uso de tierra, consumo de agua, efectos climáticos, deterioro de la capa de ozono o potencial de eutrofización. Estos también son llamados "indicadores de punto intermedio" de la ruta causa-efecto. El modelo CML 2001-Apr. 2013 evalúa impactos ambientales intermedios, usando 12 categorías de impacto. La figura 6 muestra un esquema de la evaluación de impactos ambientales durante diferentes etapas de la cadena causa-efecto. Debido a que los modelos de caracterización se vuelven más complejos hacia el final de la cadena, es una práctica generalizada presentar indicadores de puntos intermedios.

Figura 6. Evaluación de potenciales impactos ambientales durante etapas intermedias y finales de la ruta causa-efecto

Etapa	Intermedio	Final
Resultados del inventario de ciclo de vida	Toxicidad humana Efectos respiratorios Radiación ionizada	Salud humana
	Oxidación fotoquímica Ecotoxicidad acuática Ecotoxicidad terrestre Acidificación acuática Eutroficación Acidificación terrestre Ocupación de la tierra	Calidad ecosistémica
	Calentamiento global Deterioro capa de ozono	Cambio climático
	Agotamiento de minerales raros	Recursos naturales

Fuente: Elaboración propia

1.6.4 Interpretación de resultados

En la etapa final de un ACV, los resultados de la evaluación de impacto son interpretados. Usualmente, se identifica dónde están los "hotspots" ambientales. Esto es, en qué parte de la cadena de suministro del sistema hay más potencial para ocasionar daños ambientales. Con base en esto se desarrollan algunas conclusiones y recomendaciones para mejorar la eficiencia ambiental. Durante esta etapa también se realizan análisis estadísticos de sensibilidad e incertidumbre. Estos permiten evaluar la veracidad y exactitud del modelo del sistema e identificar variables importantes.

5 Eco-Indicador 99 se refiere al método para evaluar el impacto ambiental a lo largo del ciclo de vida (Mark Goedkoop, Suzanne Effting & Marcel Collignon).

6 ReCiPe: metología que realiza la caracterización, normalización, ponderación y puntuación única; por medio de 18 categorías intermedias y 3 de punto final (Ariznabarreta, de la Fuente, de Borja & Rubio, 2014).

En este trabajo se utiliza este método para evaluar la sostenibilidad ambiental del Sistema Nacional Interconectado (SNI). La razón por la cual se hace un énfasis en el SNI se debe a su relevancia como principal fuente energética en otras cadenas de suministro. El ACV del sistema nacional interconectado se presenta en el capítulo 5; sin embargo, para contextualizar al lector, se expone un panorama general del sector energético en el capítulo 2. Así mismo, se muestra el estado actual de nuestros recursos energéticos. En el capítulo 3 se describen los recursos energéticos no-renovables (fósil) y en el capítulo 4 se presentan los recursos energéticos renovables.

1.7 Referencias bibliográficas

Afgan, N. H., Carvalho M. G., & Hovanov, N. V. (2000). Energy system assessment with sustainability indicators. *Energy Policy*, *28*(9), 603–612. https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00045-8

Ariznabarreta I., Fuente P., Borja F., & Rubio M. (2014). *Diseño de start up de evaluación de huella ambiental.* Madrid, España: Escuela de Organización Industrial. Recuperado de https://www.eoi.es/es/savia/publicaciones/20939/proyecto-fin-de-master-diseno-de-start-de-evaluacion-de-huella-ambiental

Atilgan, B. & Azapagic, A. (2016). An integrated life cycle sustainability assessment of electricity generation in Turkey. *Energy Policy*, *93*, 168-186. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.02.055

Bagliani, M., Dansero, E. & Puttilli, M. (2010). Territory and energy sustainability: the challenge of renewable energy sources. *Journal of Environmental Planning and Management*, *53*(4), 457-472. https://doi.org/10.1080/09640561003694336

Berkes, F., Colding, J. & Folke, C. (2008). *Navigating Social-Ecological Systems: Building Resilience for Complexity and Change*. Cambridge University Press. Recuperado de https://books.google.com.gt/books?id=Y5FnAq9kjxgC

Dincer, I. & Rosen, M. A. (2012). *EXERGY: Energy, Environment and Sustainable Development*. Newnes. Recuperado de https://books.google.com.gt/books?id=FrUolHxhGVYC

Doukas, H., Papadopoulou, A., Savvakis, N., Tsoutsos, T. & Psarras, J. (2012). Assessing energy sustainability of rural communities using Principal Component Analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(4), 1949-1957. https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.018

Evans, A., Strezov, V. & Evans, T. J. (2009). Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *13*(5), 1082-1088. https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.03.008

Farinelli, U. (ed.). (1999). *Energy as a tool for sustainable development for African, Caribbean and Pacific countries*. New York, NY. Recuperado de http://inis.iaea.org/Search/search.aspx?orig_q=RN:31030395

Gallopín, G. (1994). Impoverishment and sustainable development: a systems approach. Canada: International Institute for Sustainable Development.

Gallopin, G. (2006). Linkages between vulnerability, resilience and, adaptive capacity. *Global Environmental Change*, *16*(3), 293-303.

Goeadkoop M., Effting S. & Collignon M. *Anexo eco indicador' 99*. Bilbao, España: Sociedad Pública Gestión Ambiental. Recuperado de http://www.proyectaryproducir.com.ar/public_html/Seminarios_Posgrado/Herramientas/Eco%20indicador%2099%20ca.pdf

Hadian, S. & Madani, K. (2015). A system of systems approach to energy sustainability assessment: Are all renewables really green? *Ecological Indicators*, *52*, 194-206. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.11.029

Hepbasli, A. (2008). A key review on exergetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *12*(3), 593–661. https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.10.001

IAEA. (2005). *Energy indicators for sustainable development: guidelines and methodologies*. Vienna: International Atomic Energy Agency. Recuperado de http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1222_web.pdf

Iarna-URL. (2012). *Perfil ambiental de Guatemala 2010-2012. Vulnerabilidad local y creciente construcción de riesgo.* Guatemala: Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar.

Liu, G. (2014). Development of a general sustainability indicator for renewable energy systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *31*, 611-621. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.038

Meléndez, M. (2014). *Análisis e interpretación de indicadores energéticos para el desarrollo sostenible de Guatemala*. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile.

Musango, J. K. & Brent, A. C. (2011). A conceptual framework for energy technology sustainability assessment. *Energy for Sustainable Development*, *15*(1), 84-91. https://doi.org/10.1016/j.esd.2010.10.005

Ness, B., Urbel-Piirsalu, E., Anderberg, S., & Olsson, L. (2007). Categorising tools for sustainability assessment. *Ecological Economics*, *60*(3), 498-508. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.07.023

Neves, A. R. & Leal, V. (2010). Energy sustainability indicators for local energy planning: Review of current practices and derivation of a new framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *14*(9), 2723-2735. https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.067

Ochaeta, K. (2014). *Energy security and sustainable development implications for Guatemala of the Electricity Generation Expansion Plan 2014-2028*. Suecia: Uppsala University. Recuperado de http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:749642

Ostrom, E. (2009). A General Framework for Analyzing Sustainability of Social-Ecological Systems. *Science*, *325*(5939), 419-422. https://doi.org/10.1126/science.1172133

Parris, T. M. & Kates, R. W. (2003). Characterizing and measuring sustainable development. *Annual Review of Environment and Resources*, *28*(1), 559-586. https://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.050302.105551

Pintér, L., Hardi, P., Martinuzzi, A. & Hall, J. (2012). Bellagio STAMP: Principles for sustainability assessment and measurement. *Ecological Indicators*, *17*, 20-28. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.07.001

Rosen, M. A. (2009). Energy Sustainability: A Pragmatic Approach and Illustrations. *Sustainability*, *1*(1), 55-80. https://doi.org/10.3390/su1010055

Santoyo-Castelazo, E. & Azapagic, A. (2014). Sustainability assessment of energy systems: integrating environmental, economic and social aspects. *Journal of Cleaner Production*, *80*, 119-138. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.061

Singh, R. K., Murty, H. R., Gupta, S. K., & Dikshit, A. K. (2009). An overview of sustainability assessment methodologies. *Ecological Indicators*, *9*(2), 189-212. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2008.05.011

Undesa-IAEA. (2007). *Energy Indicators for Sustainable Development. Country studies on Brazil, Cuba, Lithuania, Mexico, Russian Federation, Slovakia and Thailand.* (1st ed.). New York, USA.

URL. (2017). Política ambiental de la Universidad Rafael Landívar, aplicable al sistema universitario. Guatemala: Universidad Rafael Landivar.

WEC. (2015). *Energy Trilema Index: Benchmarking the sustainability of national energy systems.* (5th ed.). London, England: World Energy Council.

WEC. (2016, July). Energy Trilemma Index. Recuperado de https://www.worldenergy.org/data/trilemma-index/

2
CAPÍTULO

PANORAMA ENERGÉTICO DE GUATEMALA 2001-2016

2. Panorama energético de Guatemala 2001-2016

Autor: Edgar E. Sacayón

2.1 Introducción: La situación energética de Guatemala 2001-2016

En Guatemala, las instituciones que regulan y gestionan los recursos energéticos son el Ministerio de Energía y Minas (MEM) y el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN). En lo que se refiere al sector energético, el MEM distingue dos sectores: el eléctrico y el de hidrocarburos. El sector eléctrico está regulado por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE) y el Administrador del Mercado Mayorista (AMM). El MARN, por su parte, tiene a su cargo la gestión de los recursos naturales del país.

La *Política energética 2013-2027* es el instrumento de gestión pública que se ha trazado el objetivo de conseguir un desarrollo energético sostenible, con equidad social y respeto al medio ambiente (MEM, 2013). La política idenifica cuatro líneas estratégicas o ejes de intervención: asegurar el abastecimiento de electricidad y combustibles a precios competitivos; el aprovechamiento de las reservas nacionales de petróleo con miras al autoabastecimiento nacional; el ahorro y uso eficiente de la energía y la reducción del uso de leña en el país. Estas líneas estratégicas cuentan con objetivos operativos y acciones que pretenden alcanzar metas a largo plazo.

Por lo tanto, en esta sección se presenta un panorama general del sector energético, con información estadística sobre fuentes primarias y secundarias de energía, flujos y balances energéticos del país, así como indicadores de precios y desacoplamiento energético. Los datos utilizados en los balances energéticos han sido recopilados del MEM, la CNEE, el AMM y el Instituto Nacional de Estadística (Ine). Dichos datos se presentan en serie de 2001 a 2016. En el anexo 1 se integran las tablas con los datos originales[1]. Esta información se presenta con el objetivo de contribuir con el análisis de la *Política energética 2013-2027*, para sectores académicos, públicos y privados, e influir positivamente en la gestión sostenible de los recursos energéticos con miras al desarrollo sostenible del país.

2.2 Suministro de energía primaria

2.2.1 ¿Qué es la energía primaria?

La energía primaria es aquella que se obtiene directamente de fuentes naturales y que no ha sufrido ningún tipo de transformación; por ejemplo, la energía solar, eólica, hidráulica, leña, así como la que se obtiene después de un proceso de extracción, por ejemplo, carbón mineral, petróleo, geotermia, etc. El análisis de los datos de energía primaria de un país

1 Los mapas y datos originales también pueden ser consultados y descargados en el Centro de Visualización de Datos de Energía en el sitio web del Incyt: http://incyt.org/indicadores/

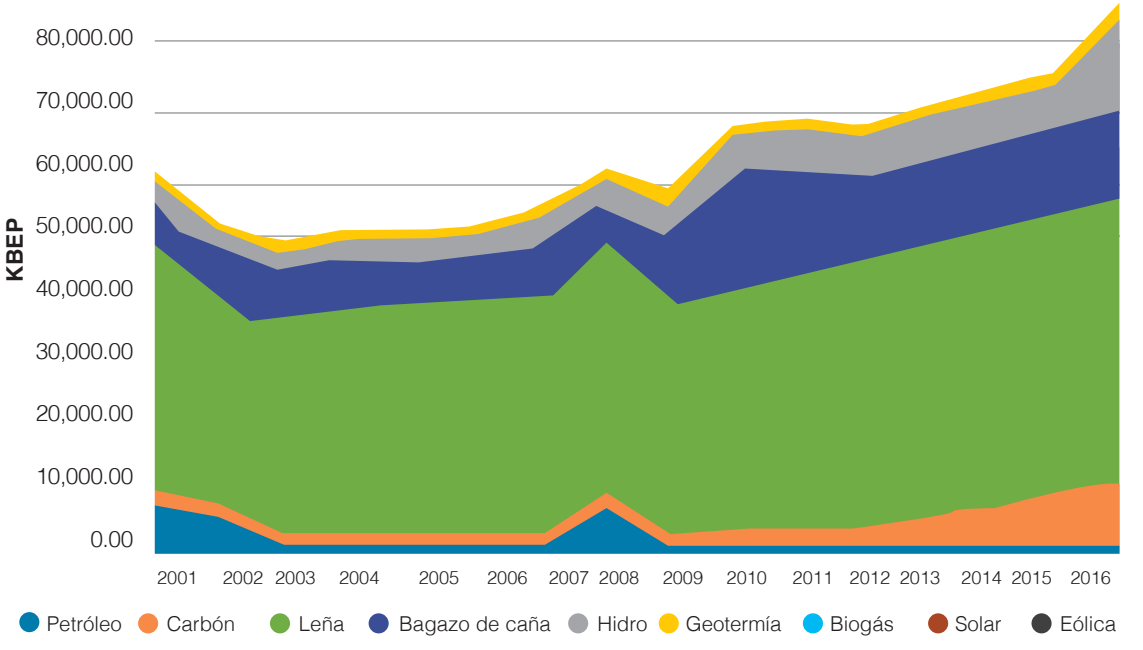
permite comprender la diversidad de sus fuentes energéticas antes que estas sean transformadas, así como su variación en el tiempo (Bhattacharyya, 2011).

El suministro de energía primaria se obtiene sumando la producción local, las importaciones y la variación del inventario, menos las exportaciones. Por lo tanto, el suministro de energía primaria cuantifica los recursos energéticos primarios que se encuentran disponibles en el territorio nacional.

2.2.2 Suministro de energía primaria en Guatemala

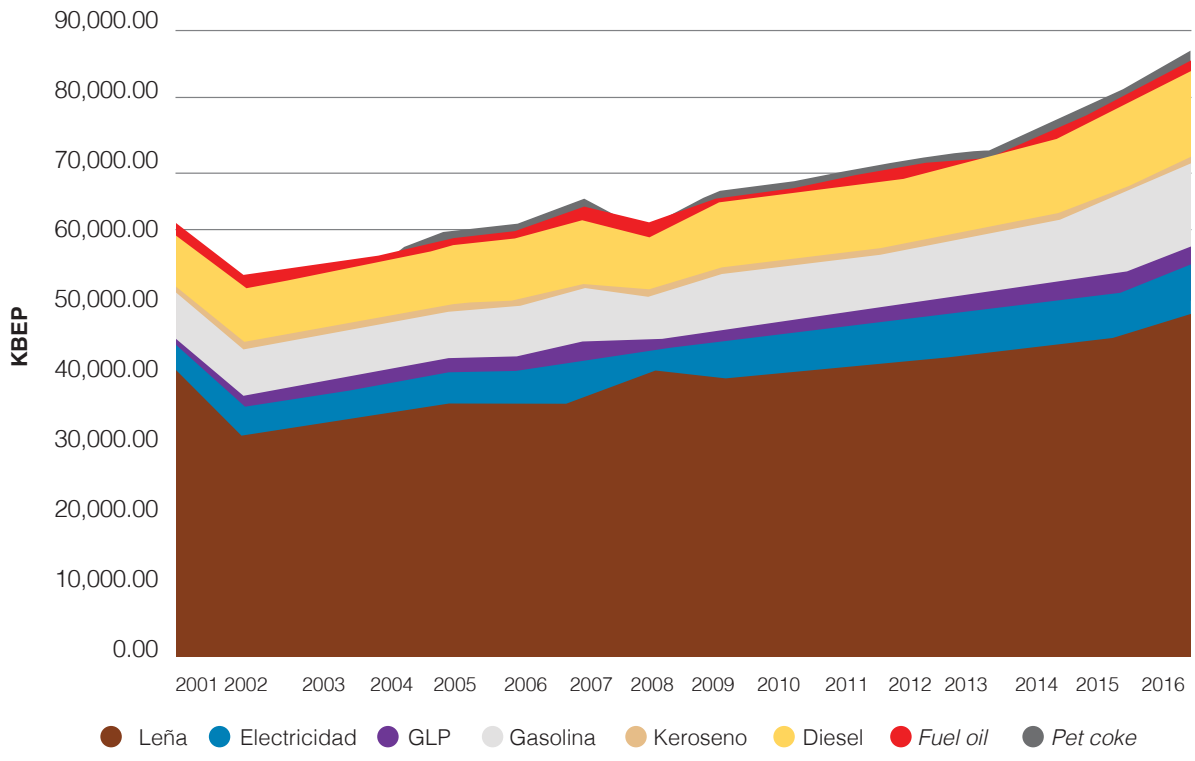
La figura 7 muestra que la principal fuente energética en Guatemala es la leña. El suministro anual de leña ha estado entre los 30,000 hasta los 36,000 barriles equivalentes de petróleo (KBEP), lo cual representa del 60 al 78% del suministro de fuentes energéticas primarias del país (el anexo 1 presenta los datos originales de donde se obtuvieron estos porcentajes). El suministro de petróleo, por el contrario, es muy bajo, debido a que más del 80% se exporta a otros países. La mayor parte de petróleo que se queda en el territorio nacional se utiliza para la elaboración de asfalto (Olade, 2014). El suministro de carbón en el territorio nacional se importa en su totalidad y se ha incrementado durante los últimos cinco años. Fuentes energéticas primarias como el biogás, la energía solar y la eólica se empezaron a aprovechar en 2013, pero su suministro es tan bajo que no se logra visualizar en la figura 8.

Figura 7. Suministro de energía primaria (KBEP) en Guatemala para el periodo 2001-2016



Fuente: Elaboración propia usando balances energéticos anuales del MEM de los años 2001 a 2016

Figura 8. Consumo energético por combustible (KBEP) en Guatemala durante el periodo 2001-2006



Fuente: Elaboración propia usando balances energéticos anuales del MEM de los años 2001 a 2016

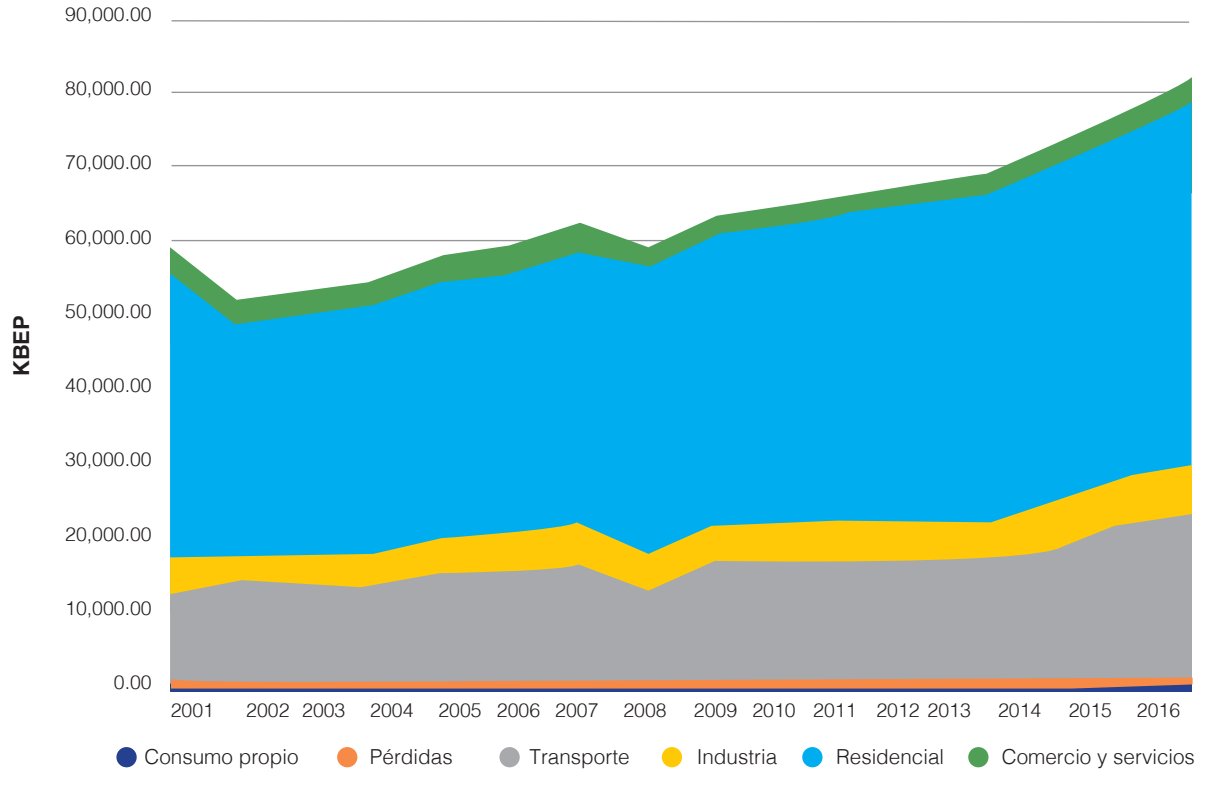
Durante el periodo 2012 a 2015, el suministro de energía primaria aumentó un promedio del 3.5%. En el periodo 2015-2016, el incremento fue de un 15% debido al mayor uso de carbón y bagazo de caña como fuentes energéticas para generación de electricidad. El incremento en el suministro de energía primaria desde 2001 a 2016 es de 43%.

2.3 Consumo energético por tipo de combustible

El consumo energético registra las cantidades de combustible utilizadas en el país. Estas no incluyen la energía usada en transformación y usos no-energéticos. Durante el periodo 2001-2016, el consumo energético de los diferentes tipos de combustible en Guatemala se incrementó en un 39%. En promedio, este consumo aumentó en un 2% anual de 2001 a 2013. Sin embargo, en los últimos tres años (2014-2016) el incremento anual fue del 7%.

El combustible más utilizado en Guatemala fue la leña (figura 9), la cual ha llegado a ocupar hasta el 65% del consumo total de combustibles durante algunos años del periodo analizado. El alto consumo de leña demuestra que existe una fuerte dependencia de este tipo de combustible, así como una mala gestión en la eficiencia de combustión (Olade, 2014).

Figura 9. Demanda energética por sector (KBEP) en Guatemala durante el periodo 2001-2016



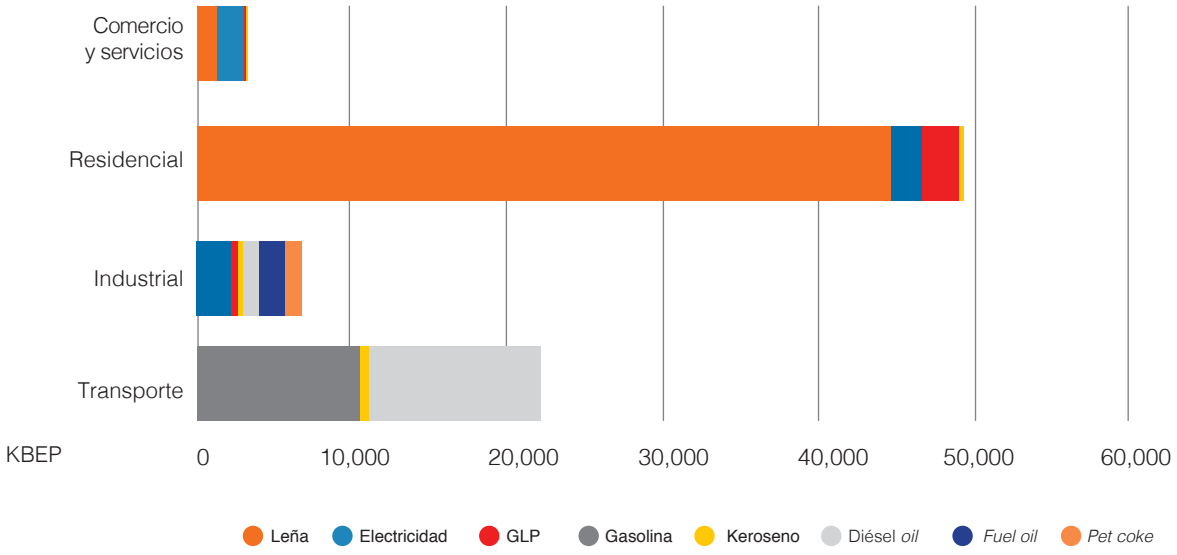
Fuente: Elaboración propia usando balances energéticos anuales del MEM de los años 2001 a 2016

2.4 Demanda energética por sector

En la figura 10 se muestra la demanda energética por sector, en la cual se aprecia que el sector residencial es el que posee la mayor demanda energética en el país, seguido por el sector del transporte. Los sectores industriales de comercio y servicios son los que tienen menor demanda. Esto se puede interpretar como un bajo desarrollo industrial, ya que la energía es utilizada en su mayor parte para satisfacer las necesidades domésticas.

La figura 10 presenta el consumo de combustibles por sector para 2016. En ella se puede observar que el sector residencial satisface más sus necesidades energéticas con leña y, en menor proporción, con electricidad y gas licuado de petróleo. El sector transporte tiene una alta demanda de gasolina y diésel, mientras que el sector industria, comercios y servicios usa fuentes energéticas variadas.

Figura 10. Consumo de combustible por sector (KBEP) en Guatemala durante 2016



Fuente: Elaboración propia basada en el balance energético del MEM 2016

2.5 Indicadores de rendimiento energético

El rendimiento energético ha sido propuesto como un índice de la productividad económica de la energía (Meléndez, 2014; Undesa-IAEA, 2007). Es por ello que en esta sección se presentan algunos indicadores de rendimiento energético que relacionan el uso de la energía por parte de la sociedad y la economía del país.

2.5.1 Producción y consumo energético per cápita

El uso de energía primaria per cápita, tanto para la producción como para el consumo, mide el nivel de aprovechamiento de la energía por parte de la población (Meléndez, 2014; Undesa-IAEA, 2007).

La producción energética se refiere a la producción de un país a partir de combustibles fósiles y fuentes renovables procesados localmente; por ejemplo, petróleo, gas natural, GLP, refinación de gasolina, keroseno, leña, energía hidráulica, geotérmica, bagazo de caña, etc.

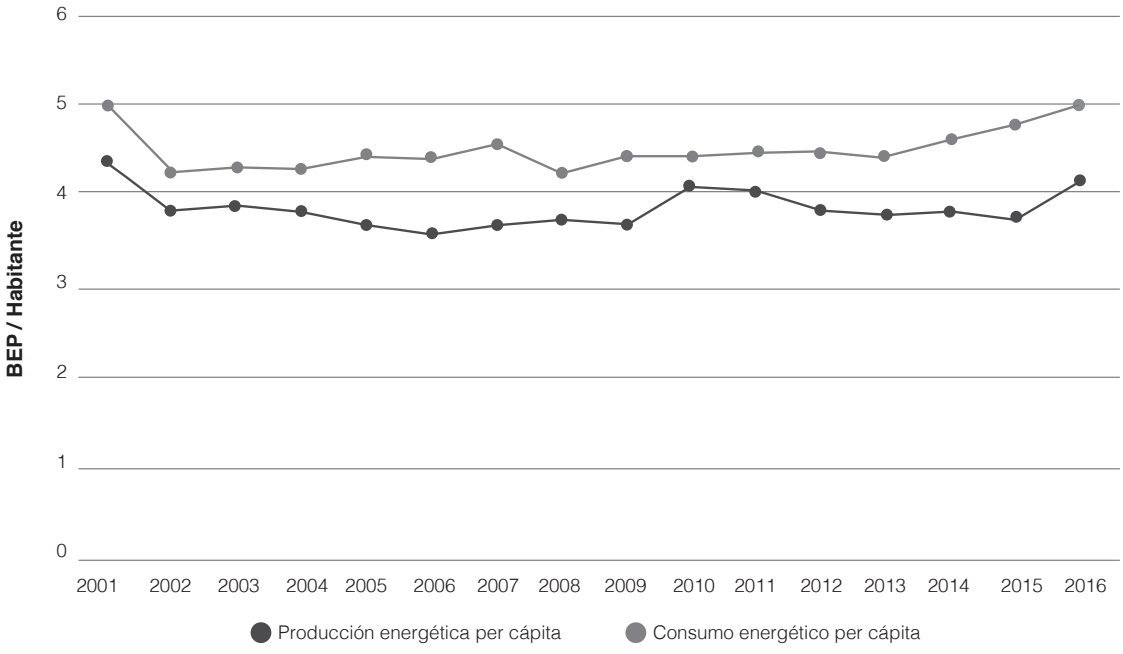
El consumo energético se refiere a la utilización total de fuentes energéticas en el país; por ejemplo, gasolina, diésel, keroseno, *fuel oil,* coque, GLP, carbón, etc.

La producción y el consumo de energía per cápita que se presentan en la figura 11 nos demuestra que la sociedad guatemalteca es un importador neto de energía, ya que el consumo energético por habitante es mayor que la producción. Esto se debe principalmente a la dependencia de los combustibles fósiles que deben ser importados para los sectores de la industria, comercio y transporte. En promedio, la producción energética per cápita es de 3.87 barriles equivalentes de petróleo por habitante (BEP/hab), mientras que el consumo energético per cápita es de 4.51 BEP/hab. Meléndez (2014) sugiere que esto es un indicador de la vulnerabilidad de la seguridad energética del país, puesto que depende de fuentes externas y, por lo tanto, está sujeta a los cambios en los precios del mercado.

2.5.2 Uso energético por unidad de producto interno bruto (PIB)

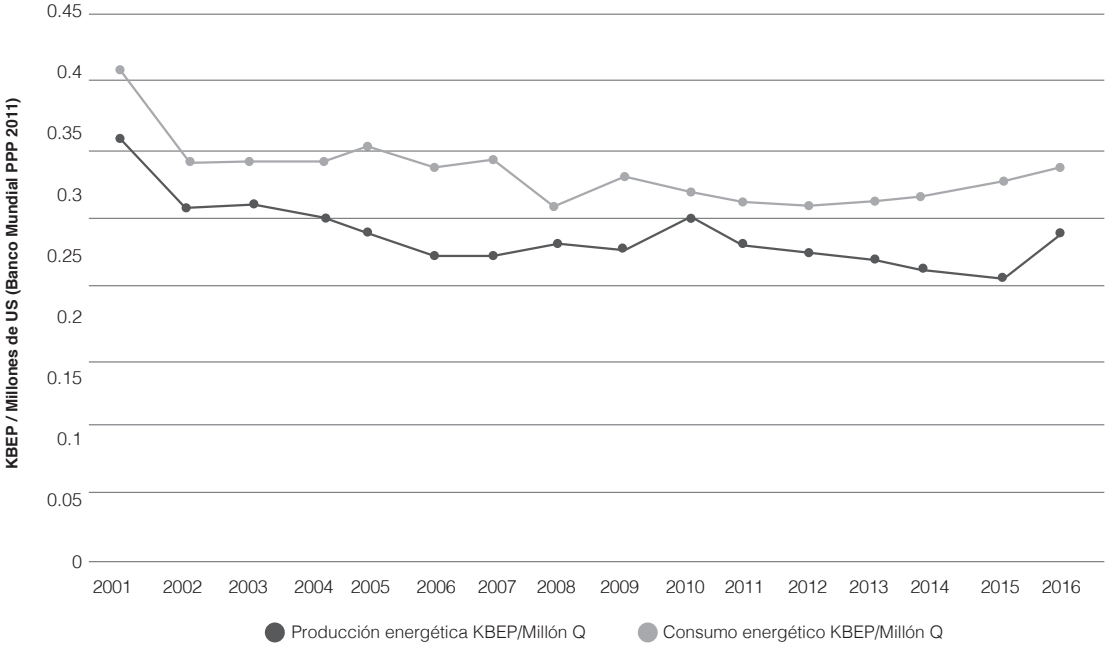
El uso energético primario por unidad de producto interno bruto (PIB) es un indicador que también es conocido como intensidad energética (IAEA, 2005; Meléndez, 2014). Este se utiliza para medir la cantidad de energía que se emplea para incrementar el crecimiento económico. Un decrecimiento en el índice representa un incremento en la eficiencia energética, lo cual es conocido como desacoplamiento. En la figura 12 se muestra el uso de energético por unidad de PIB, con base en datos del Banco Mundial (BM, 2017). Los valores para el PIB se presentan en quetzales corregidos por paridad de poder de compra correspondientes a 2001. Estos datos demuestran que la intensidad energética ha tenido un desacoplamiento muy leve en el periodo analizado.

Figura 11. Producción y consumo energético per cápita (BEP/hab) en Guatemala durante el periodo 2001-2016



Fuente: Elaboración propia

Figura 12. Producción y consumo energético por unidad de producto interno bruto en KBEP, por millones de dólares a precios constantes de 2001

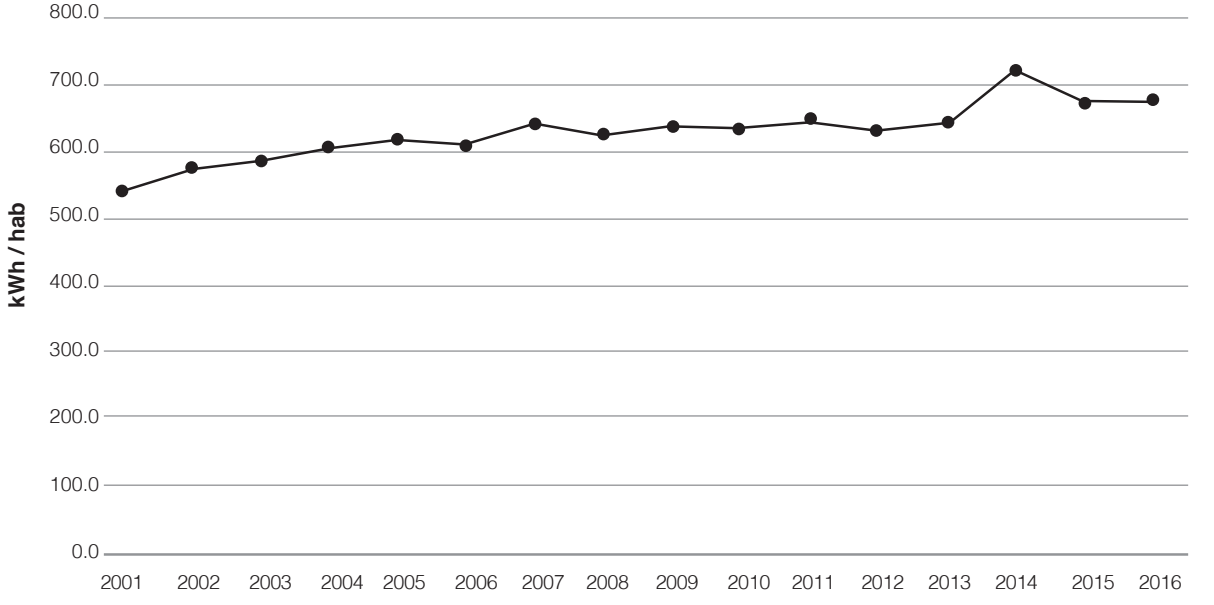


Fuente: BM (2017)

2.5.3 Consumo de electricidad por habitante

El consumo de electricidad por habitante es un indicador que proporciona una medida relativa de desarrollo y calidad de vida, ya que un incremento puede interpretarse como mayor acceso a servicios y productos que la electricidad provee (Meléndez, 2014). La figura 13 muestra que durante el periodo 2001-2016 el consumo de electricidad por habitante se incrementó, hasta llegar a 675 kWh por habitante en 2016.

Figura 13. Consumo de electricidad por habitante (kWh/hab) en Guatemala durante el periodo 2001-2016



Fuente: Elaboración propia

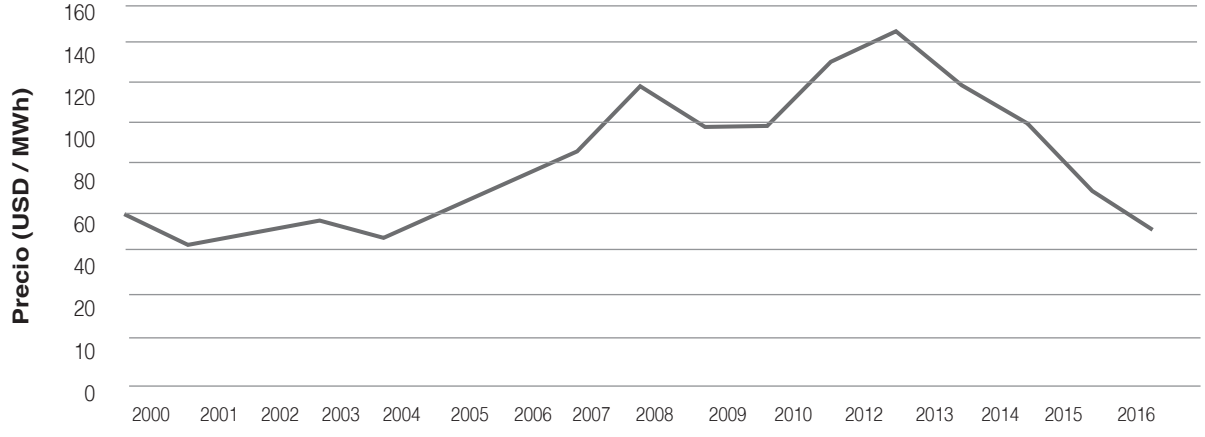
2.6 Indicadores económicos por producción de energía eléctrica

2.6.1 Precio spot

El precio *spot* es el precio de oportunidad que se define en el mercado mayorista de la energía eléctrica. El mercado está operado y gestionado por el Administrador del Mercado Mayorista (AMM), el cual determina los precios después de haber realizado la operación del sistema. En la figura 14 se puede observar la tendencia del precio *spot* durante los últimos 15 años, cuyo comportamiento depende de varios factores. Por ejemplo, una disminución en el precio *spot* se puede producir por: a) una caída en los precios del petróleo; b) disminución en la demanda energética; c) durante la estación lluviosa, cuando existe un excedente de hidroelectricidad (la cual tiene un costo más bajo); o d) por el ingreso de nuevas tecnologías al mercado (aumento de la oferta energética).

Por otro lado, un aumento en el precio *spot* puede estar determinado por: a) el incremento en los precios del petróleo; b) el aumento en la demanda energética, o c) un aumento en la generación de energía con combustibles fósiles. Los precios más altos se dieron durante el periodo 2013-2014, cuando el costo de la energía eléctrica superó los $ 150.00 USD/MWh. Actualmente (2016), los precios oscilan alrededor de los $ 50.00 USD/MWh.

Figura 14. Precio *spot* en el mercado de oportunidad (USD/MWh) en Guatemala durante el periodo 2000-2016



Fuente: Elaboración propia con datos del AMM

2.7 Balance energético 2016

Los balances energéticos son publicados anualmente por el MEM. Estos son de dominio público y pueden ser descargados directamente desde el sitio *web* del ministerio. La producción de energía se presenta por tipos de energía primaria y secundaria. La oferta total es la energía que se encuentra disponible en el territorio siendo el petróleo el único recurso energético que se exporta. En la tabla 1 se presenta el balance energético para 2016 (MEM, 2016). Otra forma de visualizar el balance energético guatemalteco es por medio de un diagrama de Sankey, el cual representa cómo se dirigen los flujos energéticos dentro de la economía del país.

Tabla 1. Balance energético de 2016 (KBEP) en Guatemala

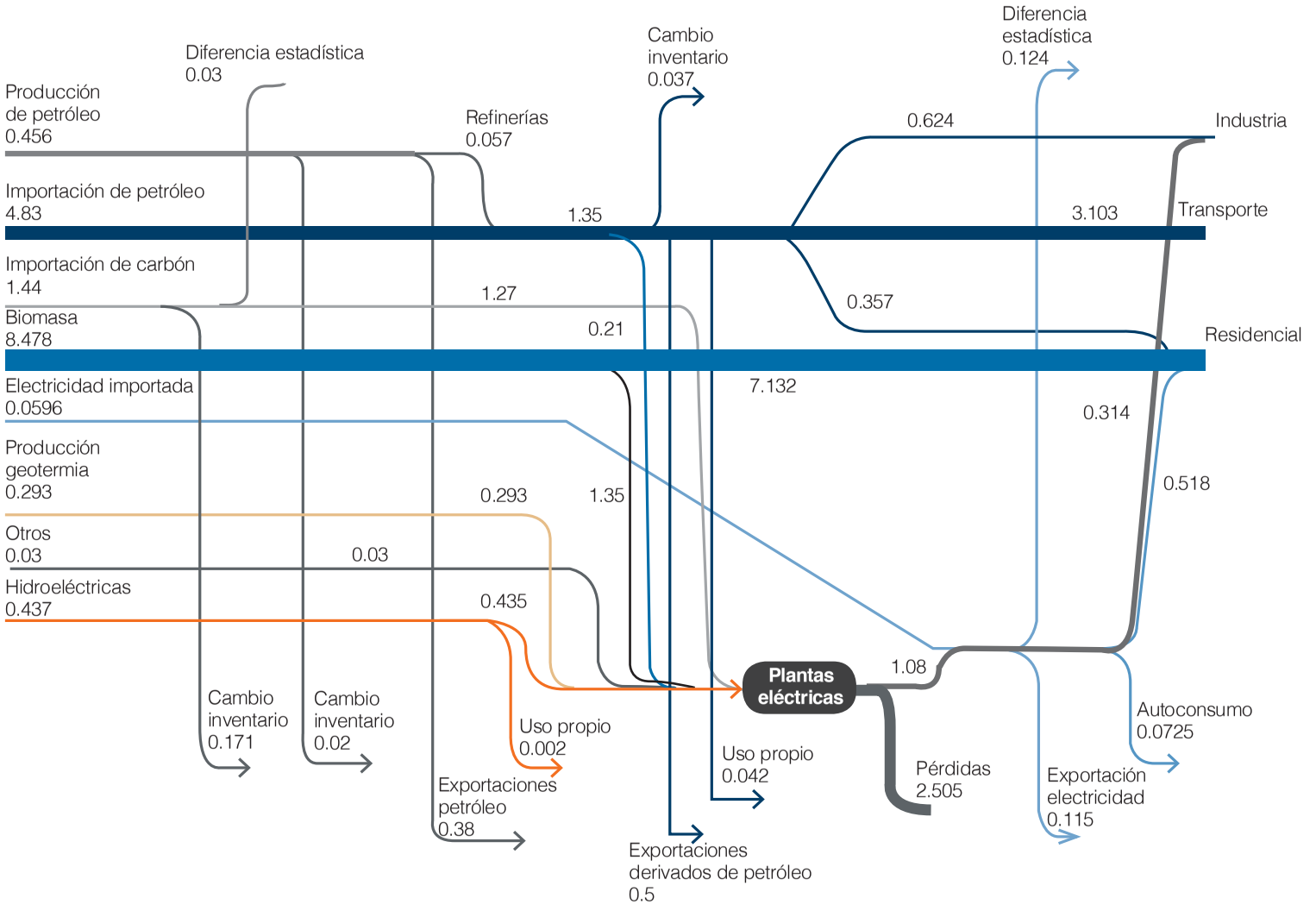
		ENERGÍA PRIMARIA									
	Actividades	**Petróleo**	**Carbón**	**Hidro**	**Geotermia**	**Biogás**	**Leña**	**Bagazo de caña**	**Solar**	**Eólica**	**Total primarias**
SUMINISTRO	Producción	3,262.12	0.00	3,122.76	2,098.96	32.55	46,102.14	14,460.76	119.63	134.87	69,333.79
	Importación	0.00	10,316.96	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10,316.96
	Exportación	2,691.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2,691.68
	Variación del inventario	-161.36	-1,221.34	0.00	0.00	0.00	2.42	0.00	0.00	0.00	-1,380.28
	Oferta total	**409.08**	**9,095.62**	**3,122.76**	**2,098.96**	**32.55**	**46,104.56**	**14,460.76**	**119.63**	**134.87**	**75,578.79**
	Refinerías	-409.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-409.08
	Centrales eléctricas	0.00	-9,068.01	-3,107.32	-2,098.96	-25.17	-2.42	-9,620.53	-119.63	-134.87	-24,176.91
	Autoproductoras	0.00	-27.61	-15.44	0.00	-7.38	0.00	-4,840.22	0.00	0.00	-4,890.65
	Total transformación	**-409.08**	**-9,095.62**	**-3,122.76**	**-2,098.96**	**-32.55**	**-2.42**	**-14,460.75**	**-119.63**	**-134.87**	**-29,476.64**
CONSUMO	Consumo propio	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Pérdidas	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Ajustes	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Transporte	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Industria	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Residencial	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	44,719.07	0.00	0.00	0.00	44,719.07
	Comercio y servicios	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1,383.06	0.00	0.00	0.00	1,383.06
	Consumo energético	**0.00**	**0.00**	**0.00**	**0.00**	**0.00**	**46,102.13**	**0.00**	**0.00**	**0.00**	**46,102.13**
	No energético	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Consumo final	**0.00**	**0.00**	**0.00**	**0.00**	**0.00**	**46,102.13**	**0.00**	**0.00**	**0.00**	**46,102.13**

Continúa…

ENERGÍA SECUNDARIA											
Electricidad	**GLP**	**Gasolina**	**Keroseno**	**Diésel *oil***	***Fuel oil***	**Orimulsión**	***Pet coke***	**No energético**	**Total derivado del petróleo**	**Total secundaria**	**Total**
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	69,333.79
462.79	4,293.55	11,786.03	1,335.04	12,560.65	3,436.39	0.00	1,063.61	49.53	34,524.80	34,987.59	45,304.55
827.04	1,268.84	904.67	729.26	481.83	37.02	0.00	0.00	110.91	3,532.53	4,359.57	7,051.25
0.00	-97.73	145.68	55.98	-181.49	-206.54	0.00	-50.83	65.48	-269.45	-269.45	-1,649.73
-364.25	**2,926.98**	**11,027.04**	**661.76**	**11,897.33**	**3,192.83**	**0.00**	**1,012.78**	**4.10**	**30,722.82**	**30,358.57**	**105,937.36**
0.00	0.00	0.00	0.00	306.27	0.00	0.00	0.00	82.35	388.62	388.62	-20.46
7,150.83	0.00	0.00	0.00	-13.27	-1,470.76	0.00	0.00	0.00	-1,484.03	5,666.80	-18,510.11
564.44	0.00	0.00	0.00	0.00	-57.36	0.00	0.00	0.00	-57.36	507.08	-4,383.57
7,715.27	**0.00**	**0.00**	**0.00**	**293.00**	**-1,528.12**	**0.00**	**0.00**	**82.35**	**-1,152.77**	**6,562.50**	**-22,914.14**
518.41	0.00	0.00	0.00	306.27	0.00	0.00	0.00	0.00	306.27	824.68	824.68
887.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	887.75	887.75
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	29.27	10,751.65	451.24	10,933.34	0.00	0.00	0.00	0.00	22,165.50	22,165.50	22,165.50
2,243.33	585.40	220.32	25.26	950.72	1,664.71	0.00	1,012.78	0.00	4,459.19	6,702.52	6,702.52
2,065.10	2,253.78	0.00	176.84	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2,430.62	4,495.72	49,214.79
1,636.43	58.54	55.08	8.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	122.04	1,758.47	3,141.53
7,351.02	**2,926.99**	**11,027.05**	**661.76**	**12,190.33**	**1,664.71**	**0.00**	**1,012.78**	**0.00**	**29,483.62**	**36,834.64**	**82,936.77**
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	86.45	86.45	86.45	86.45
7,351.02	**2,926.99**	**11,027.05**	**661.76**	**12,190.33**	**1,664.71**	**0.00**	**1,012.78**	**86.45**	**29,570.07**	**36,921.09**	**83,023.22**

Fuente: MEM (2016)

Figura 15. Diagrama de Sankey del balance energético en millones de barriles equivalentes de petróleo (MBEP) para 2016



Fuente: MEM (2016)

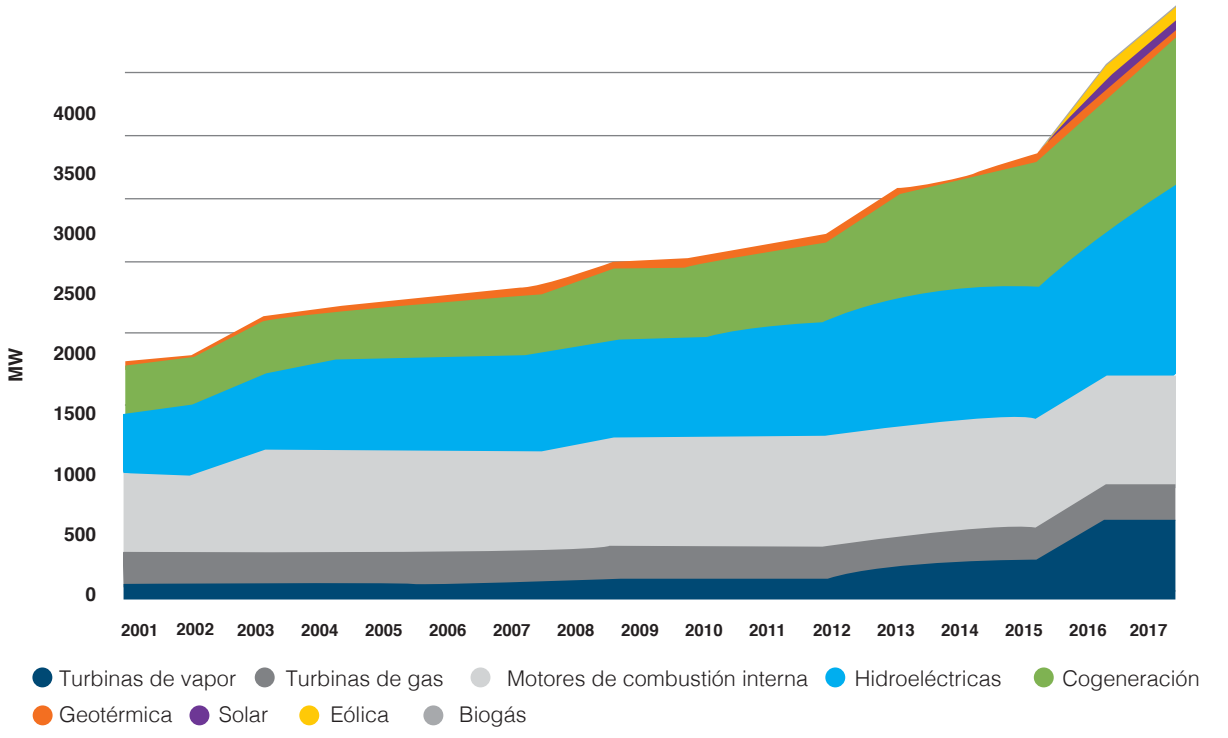
2.8 El Sistema Nacional Interconectado

El Sistema Nacional Interconectado (SNI) es el encargado de generar, transmitir y distribuir la energía eléctrica que se produce en el país. La matriz de generación de energía eléctrica ha ido evolucionando con el tiempo.

2.8.1 Potencia instalada 2001-2016

Para 2016, la potencia instalada alcanzó los 4,122 MW (potencia de placa). Los motores reciprocantes y las turbinas de gas se mantuvieron constantes. Sin embargo, con el inicio de operaciones de *Jaguar Energy,* en 2015, se aportaron 300 MW adicionales en la potencia instalada de turbinas de vapor (calderas). Con esto, la potencia instalada para combustibles fósiles alcanzó los 1,550 MW. La hidroelectricidad aumentó, mientras que los generadores eólicos, solares y con biogás iniciaron operaciones en 2014. Esto incrementó la potencia de placa de sistemas renovables a un 62% en 2016. La figura 16 muestra la evolución de la potencia instalada durante el periodo 2001-2017.

Figura 16. Potencia instalada de placa (MW) para generación de electricidad en Guatemala durante el período 2001-2017

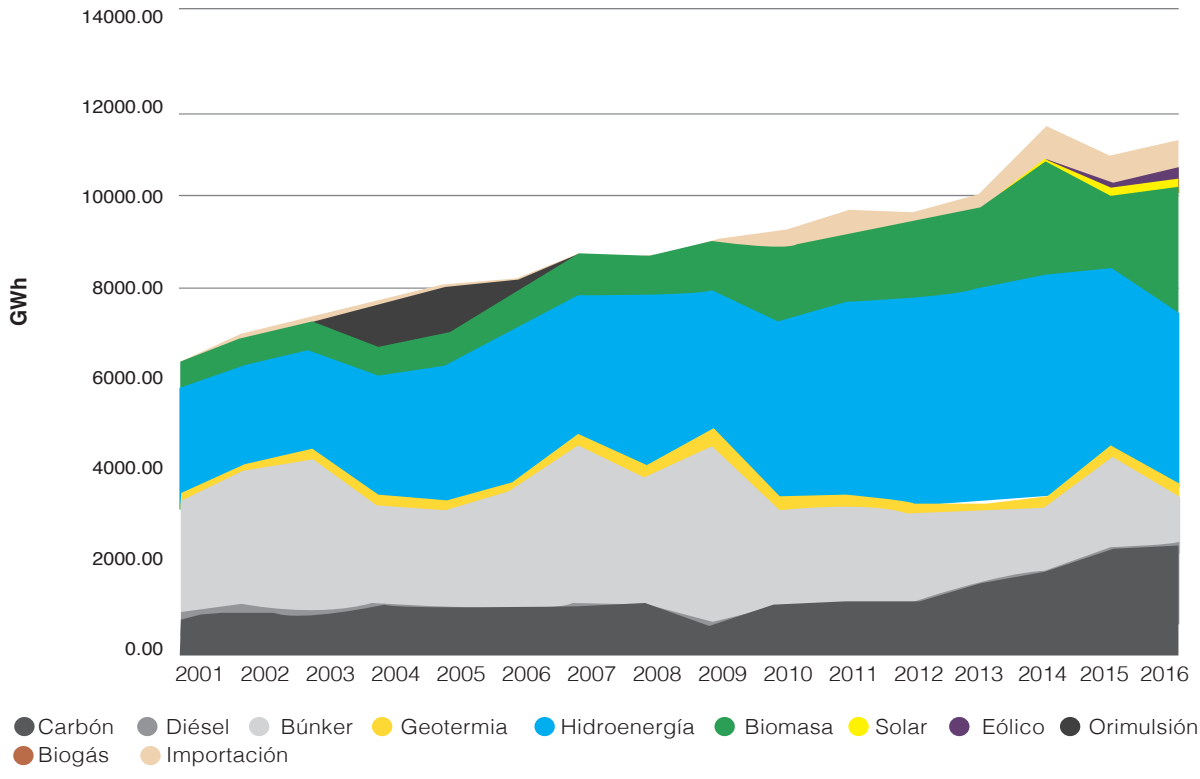


Fuente: Elaboración propia con datos del AMM

2.8.2 Generación anual 2001-2016

La generación de electricidad por tipo de combustible también ha aumentado con el tiempo (figura 17). En 2016, la generación de electricidad llegó a los 11,000 GWh. Los principales generadores fueron las hidroeléctricas. La generación con carbón aumentó en 2016 debido al ingreso de *Jaguar Energy*. La importación de electricidad de la red mexicana también incrementó en los últimos años.

Figura 17. Generación anual de energía eléctrica (GWh) en Guatemala durante el periodo 2001-2016

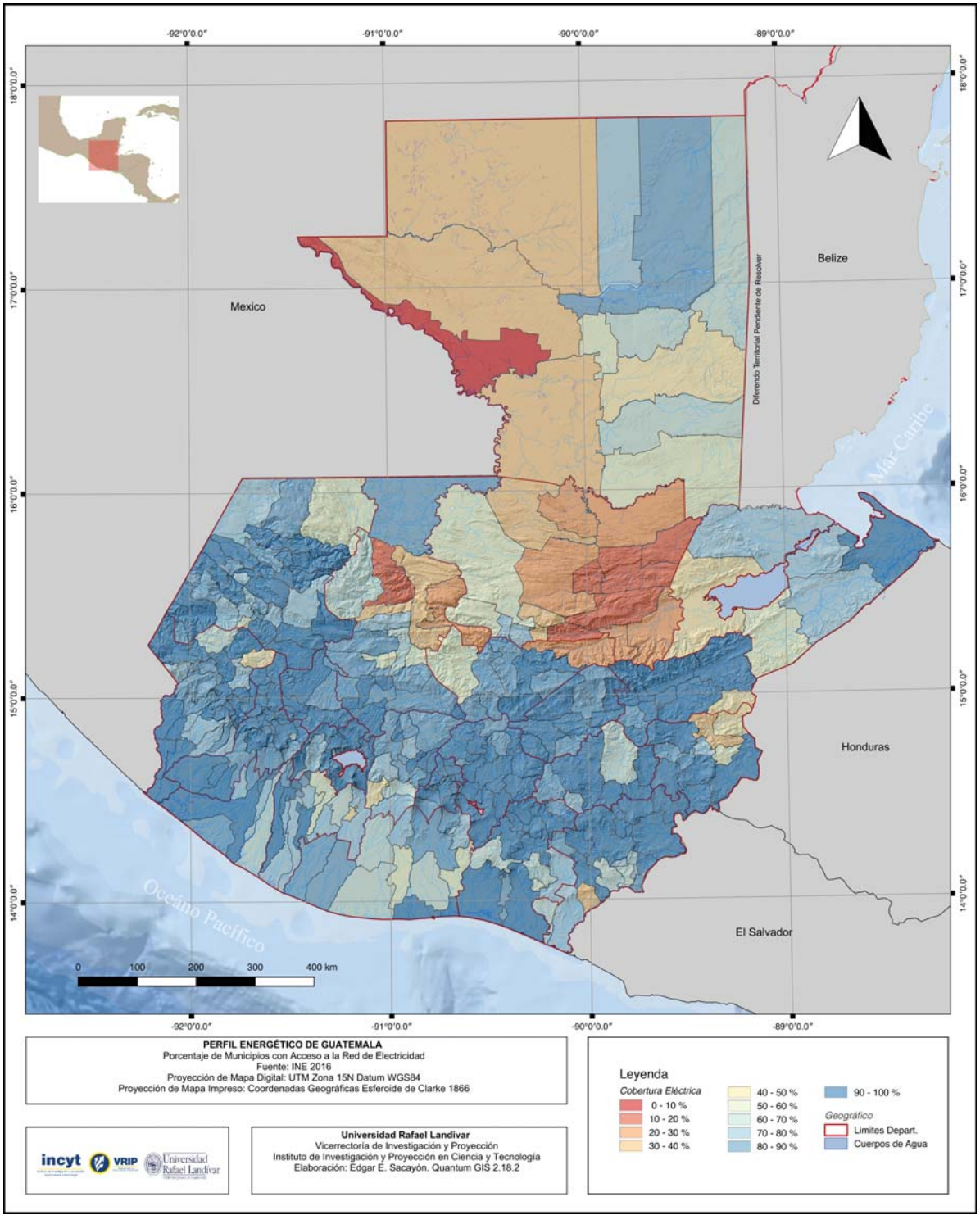


Fuente: Elaboración propia con datos del AMM

2.8.3 Cobertura eléctrica en Guatemala

En 2016, los índices de electrificación llegaron al 90% del total de municipios del país. En el mapa 1 se muestra que los departamentos de Alta Verapaz, Petén y Quiché presentaron los índices más bajos de electrificación en Guatemala.

Mapa 1: Índices de cobertura eléctrica de Guatemala en 2016

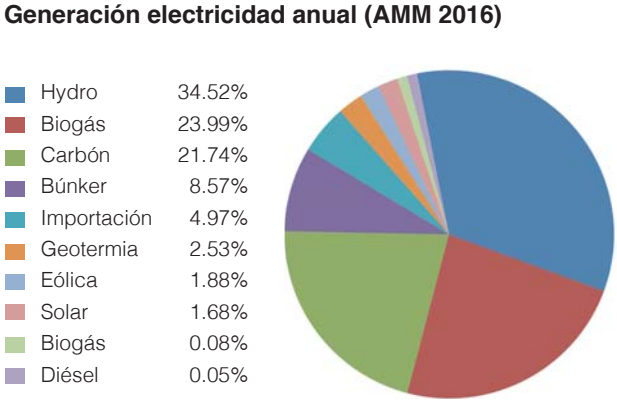


Fuente: Elaboración propia

2.8.4 Generación anual en Guatemala en 2016

La figura 18 muestra la generación de energía eléctrica en el país en 2016. En ella se observa que durante dicho año la hidroelectricidad contribuyó con el 34.5% del total; la cogeneración representó un 24%, las plantas térmicas con carbón aportaron un 21% y el búnker, un 8%. La geotermia se mantuvo en 2.5%, mientras que la solar y eólica llegaron al 2% cada una. A pesar de que el biogás ha incrementado en los últimos años, apenas contribuye con un 0.08% del total de la matriz.

Figura 18. Matriz de electricidad del SNI en Guatemala para 2016

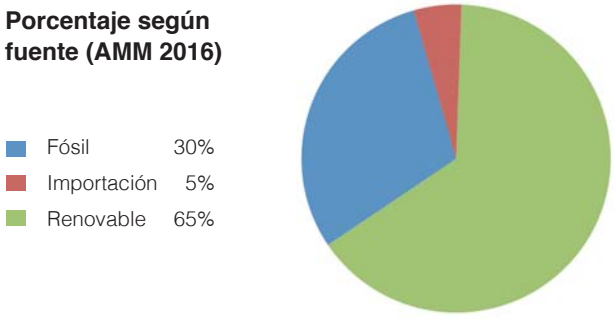


Fuente: AMM (2016)

2.8.5 Participación de energía renovable en el SNI en 2016

La figura 19 muestra que la cantidad de energía renovable en el SNI alcanzó el 60% durante 2016. Un 30% se produjo con combustibles fósiles y un 3% se importó de la red mexicana (AMM, 2016b).

Figura 19. Composición de fuentes energéticas en el SNI de Guatemala durante 2016 (%)

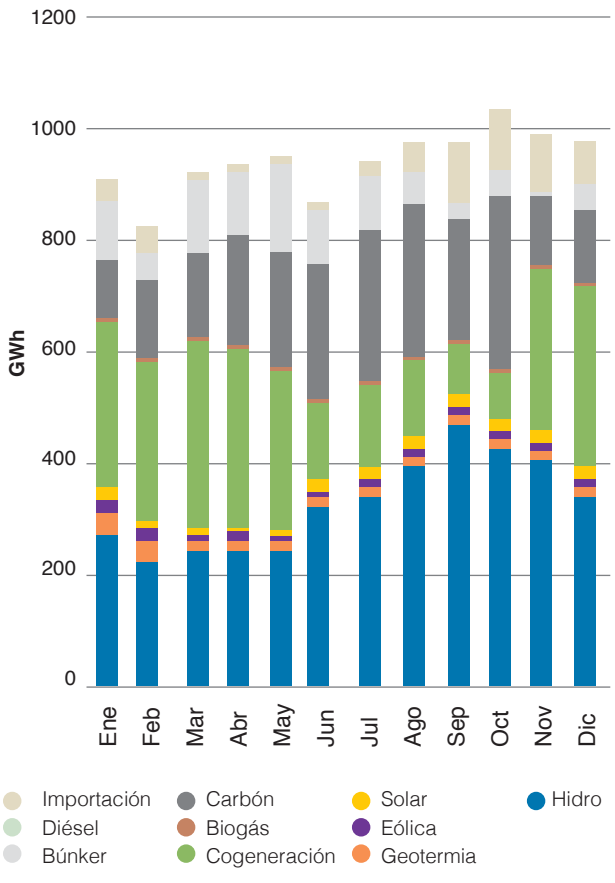


Fuente: AMM (2016)

2.8.6 Variación estacional del SNI en 2016

Una característica muy particular del SNI es su variación estacional. Durante los meses de mayo a octubre, que corresponden a la estación lluviosa, existe un incremento en la generación de energía hidroeléctrica y una reducción en la generación mediante biomasa, por lo que aumenta el consumo de carbón y búnker. Por otro lado, durante la estación seca, que ocurre en los meses de noviembre a abril, existe un aporte significativo de energía producida por biomasa proveniente de la industria azucarera, que aprovecha los residuos de la zafra (CNEE, 2016). En la figura 20 se puede observar la variación estacional de la matriz de energía eléctrica del SNI.

Figura 20. Variación estacional del SNI de Guatemala durante 2016 (GWh)



Fuente: AMM (2016)

2.8.7 Importación y exportación del SNI

Existe una porción de la demanda de energía eléctrica del país que es abastecida a través de la importación de energía de la red mexicana. Durante 2015, esta red aportó entre 1 a 5% de la demanda nacional (AMM, 2016b).

La mayor demanda de energía eléctrica proviene de la región central del país, donde se ubican la ciudad de Guatemala, Escuintla y Sacatepéquez, departamentos que consumen más del 30% de la energía producida (Olade, 2014). Las otras dos terceras partes son consumidas por los otros departamentos y, en menor porcentaje, por el sector industrial (Olade, 2014).

2.8.8 Red de transmisión y distribución del SNI

Para transportar la electricidad de las plantas generadoras hacia las subestaciones de distribución, el SNI cuenta con una red de transmisión de 1,063 km de longitud que opera en tres niveles de alto voltaje: 230 kV, 138 kV y 69 kV (Incyt-URL, 2015). Adicionalmente, el SNI cuenta con una conexión de 400 kV con el sistema mexicano. Para usuarios de voltajes menores a los 69 kV, el SNI cuenta con 2,687 km de líneas de distribución de bajo voltaje (Incyt-URL, 2015). La tabla 2 describe las redes de transmisión y distribución.

Tabla 2. Kilómetros de línea de transmisión por agente transportista en el SNI

Agente transportista	400kV	230kV	138kV	69kV	Total
ETCEE	71.15	464.14	311.8	2,142.68	2,989.77
TRELEC	-	64.36	-	569.97	634.33
DUKE	-	32	-	-	32.00
RECSA	-	-	-	12.2	12.2
TREO	-	130.71	-	-	130.71
Total	**71.15**	**691.21**	**311.8**	**2,724.85**	**3,799.01**

Fuente: CNEE (2016)

2.8.9 Generación distribuida renovable

Según el AMM, un generador distribuido renovable (GDR) es la persona, individual o jurídica, titular o poseedora de una central de generación de energía eléctrica, que utiliza recursos energéticos renovables y participa en la actividad de generación. En Guatemala los GDR tienen una capacidad máxima de 5 MW; estos serán considerados como participantes del Mercado Mayorista. La generación distribuida es uno de los segmentos con mayor crecimiento (Koberle, A., 2012). Las ventajas de la generación distribuida es que permiten reducir pérdidas y los costos asociados a la extensión de la red de transmisión y distribución a lugares lejanos. En total en el 2016, la capacidad de Generación Distribuida Renovable se estimó en 88 MW de potencia de placa instalada (AMM, 2016-Potencia de Placa), y cuenta con una combinación de centrales hidroeléctricas, solares y biogás. En el 2016, el aporte de la generación distribuida renovable fue de 248.4 GWh de energía eléctrica al SIN (AMM, 2016 –Despacho de carga ejecutado al SIN).

Tabla 3. Generación distribuida renovable operando en Guatemala en el 2015 (MW)

No	Plantas	Unidades	Potencia de Placa(MW)	Potencia Efectiva (MW)	Municipio	Departamento
	Hidroeléctricas	51	49			
1	Hidroeléctrica Santa Elena	2	0.56	0.56	Escuintla	Escuintla
2	Kaplan Chapina	1	2.00	2.00	Pueblo Nuevo Viñas	Santa Rosa
3	Hidroeléctrica Cueva Maria1 y 2	5	4.95	4.95	Cantel	Quetzaltenango
4	Hidroeléctrica Los Cerros	1	1.25	1.25	San José El Rodeo	San Marcos
5	Hidroeléctrica Covadonga	2	1.60	1.50	Nuevo San Carlos	Retalhuleu
6	Hidroeléctrica Jesbon Maravillas	2	0.75	0.75	Malacatán	San Marcos
7	Central Generadora El Prado (Sn Ant Morazán)	1	0.50	0.50	Colomba	Quetzaltenango
8	Hidroeléctrica Finca Las Margaritas	5	0.44	0.44	San Francisco Zapotitlán	Suchitepéquez
9	Hidropower Sdmm	1	2.16	1.91	Escuintla	Escuintla
10	Hidroeléctrica La Perla	1	3.70	3.61	San Miguel Tucurú	Alta Verapaz
11	Hidroeléctrica Sac-Ja	2	2.00	2.00	Purulhá	Baja Verapaz
12	Hidroeléctrica San Joaquin	1	0.95	0.80	San Cristóbal Verapaz	Alta Verapaz
13	Hidroeléctrica Luarca	2	0.51	0.51	Mazatenango	Suchitepéquez
14	Hidroeléctrica Cerro Vivo	1	2.40	1.20	Chinautla	Guatemala
15	Hidroeléctrica Finca Las Margaritas Fase 2	1	1.71	1.60	San Francisco Zapotitlán	Suchitepéquez
16	Hidroeléctrica El Libertador	1	2.00	2.04	Chiquimulilla	Santa Rosa
17	Hidroeléctrica Las Victorias	2	1.20	1.00	Masagua	Escuintla
18	El Coralito	1	2.10	1.48	Santa Bárbara	Suchitepéquez
19	El Zambo	1	0.98	0.98	San Francisco Zapotitlán	Suchitepéquez
20	Hidroeléctrica Monte Maria	2	0.69	0.69	Sacatepéquez	Sn Juan Alotenango
21	Hidroeléctrica Hidroaguna	1	2.00	2.00	Santa Lucía Cotzumalguapa	Escuintla
22	Hidroeléctrica La Paz	2	0.48	0.95	Masagua	Escuintla
23	Hidroeléctrica El Ixtalito	1	1.63	1.60	Nuevo Progreso	San Marcos
24	Hidroeléctrica Guayacan	2	2.90	2.32	Taxisco	Santa Rosa
25	Hidroeléctrica Tuto Dos	1	0.96	0.96	La Libertad	Huehuetenango
26	Hidroeléctrica Santa Teresa	1	1.90	1.90	SanLucas Tolimán	Sololá
27	Hidroeléctrica El Panal	1	2.50	2.50	Chiquimulilla	Santa Rosa
28	Hidroeléctrica Pacayas	2	2.50	5.00	San Cristóbal Verapaz	Alta Verapaz
29	Hidroeléctrica Samuc	1	1.20	1.20	San Cristóbal Verapaz	Alta Verapaz
30	Hidroeléctrica Concepción	1	0.15	0.15	Nuevo San Carlos	Retalhuleu
31	Hidroeléctrica San José	1	0.43	0.43	San Cristóbal Verapaz	Alta Verapaz
32	Hidroeléctrica Peña Flor	1	0.50	0.50	Pueblo Nuevo	Suchitepéquez
33	Hidroeléctrica Santa Anita	1	1.56	1..56	Villa Canales	Guatemala
	Solar	**5**	**5**			
34	**SIBO**	5	5.00	5.00	Estanzuela	Zacapa
	Biogas	**4**	**4**			
35	Generadora del Atlántico Biogas	3	1.30	1.28	Morales	Izabal
36	Vertedero del Trébol	1	1.20	1.20	Guatemala	Guatemala
37	GABIOSA	1	1.06	1.06	La Gomera	Escuintla
	Biomasa	**8**	**3**			
38	Palo Gordo	2	5.00	0.00	San Antonio Suchitepéquez	Suchitepéquez
39	Generadora del Atlántico Vapor		1	2.60	2.60	Morales
		67	**60**			

Fuente: AMM, 2015

2.8.10 Usuario autoproductor con excedentes de energía (UAEE)

Estos son usuarios del sistema de distribución que inyectan energía eléctrica, producida por generación con fuentes de energía renovable, ubicada dentro de sus instalaciones de consumo, y que no recibe remuneración por dichos excedentes. Este tipo de usuario tiene una norma técnica desde el 2008; desde entonces, se han desarrollado una serie de proyectos de este tipo. La mayor cantidad de proyectos UAEE son de tipo solar fotovoltaico. A continuación, en la Tabla 4, se muestra la estadística por agente distribuidor.

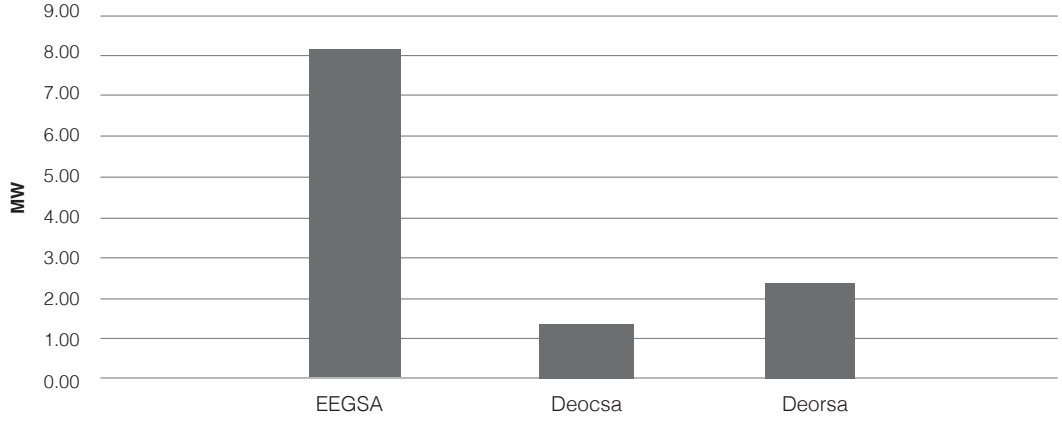
Tabla 4. Potencia instalada de UAEE distribuidora en MW, 2017

Distribuidora	UAEE	kW	MW
EEGSA	1,611	8,113.08	8.11
Deocsa	106	1,375.6	1.38
Deorsa	176	2,400.89	2.40
Total	**1,893**	**11,889.57**	**11.89**

Fuente: Elaboración propia

En la figura 21 se presenta la potencia instalada de UAEE; de estos datos en EEGSA se incluye un proyecto de biogás ubicado en Escuintla que produce 250 kW y otro eólico de 0.6 kW ubicado en Palín, Escuintla. Deocsa, por su parte, incluye un proyecto de biomasa de 500 kW ubicado en Suchitepéquez; y Deorsa un proyecto hidráulico de 7.5 kW ubicado en Santa Rosa. Estos datos permiten estimar la potencia instalada de UAEE con energía solar fotovoltaica en 11.13 MW. A continuación, la tabla 5 muestra la capacidad instalada de UAEE con energía fotovoltaica, por distribuidora.

Figura 21. Potencia instalada de UAEE por distribuidora (MW)



Fuente: CNEE (2017)

Tabla 5. Potencia instalada de UAEE con energía solar fotovoltaica

Distribuidora	Energía solar MW
EEGSA	7.86
Deocsa	0.87
Deorsa	2.39
Total	**11.13**

Fuente CNEE (2017)

2.9 Conclusiones

- **Análisis del panorama energético 2001-2016.** En esta sección se ha realizado un análisis del panorama energético durante 2001-2016. Este panorama ha permitido visualizar el desempeño del sector energético en términos de sus flujos en la economía, producción y consumo.

- **Guatemala posee una fuerte dependencia de leña como fuente energética primaria**. El suministro de energía primaria, consumo energético por sector, la demanda energética por tipo de combustible y el diagrama de Sankey, muestran como principal fuente energética a la leña, la cual es utilizada para satisfacer necesidades domésticas. De esto se concluye que Guatemala no ha logrado un desarrollo tecnológico e industrial. La leña es un combustible ineficiente, genera emisiones de material particulado que afecta la salud de los usuarios, y genera una presión sobre los recursos forestales del país.

- **La** *Política de energía 2013-2027* **no ha logrado producir cambios sustanciales en la tendencia observada.** La tendencia observada en la mayoría de las gráficas apunta a que no ha habido ningún cambio en términos de consumo y producción de energía primaria. Incluso se observa un incremento en la demanda del sector doméstico por leña. El sector del transporte demanda más hidrocarburos y el desacoplamiento energético es sumamente leve. En términos de políticas, no se observan acciones concretas para reducir la fuerte dependencia de los hidrocarburos en el sector del transporte.

- **Guatemala es un importador neto de energía.** Los balances energéticos demuestran que la producción energética en términos de energía primaria y secundaria, no es suficiente para satisfacer la demanda del consumo energético por habitante. Específicamente, la importación de hidrocarburos para el sector del transporte hace al país sumamente vulnerable a los precios internacionales del petróleo, lo cual afecta directamente la economía nacional. Cada vez que sube el precio del petróleo, todos los sectores económicos se ven afectados indirectamente. No hay una planificación para invertir en infraestructura nacional, para el aprovechamiento de los recursos petroleros locales. Las concesiones de petróleo permiten la explotación de los recursos nacionales para que otros países puedan aprovecharlos.

- **La energía eléctrica aún no llega a los departamentos de Quiché, Alta Verapaz y Petén**. A pesar del incremento en la potencia instalada en el SNI, esto no se traduce en el alcance de electri-

ficación hacia los departamentos con los menores índices de cobertura eléctrica. Coincidentemente, estos departamentos también poseen los índices de desarrollo humano más bajos, por lo que presentan serias limitaciones en cuanto al acceso a los servicios que la energía proporciona.

2.10 Recomendaciones

- Debido a la alta demanda de leña como fuente energética, es indispensable que se priorice la implementación de estufas eficientes y biodigestores domésticos. Estas tecnologías tienen las siguientes ventajas: aumentan la eficiencia energética, por lo que se usa menos combustible para obtener la misma cantidad de energía; evitan que las emisiones tóxicas se concentren en los hogares, con lo cual se reducen indirectamente los costos en atención de salud por enfermedades respiratorias; y pueden crear oportunidades económicas en microempresas de manufactura y servicio técnico. Adicionalmente a estos beneficios, el uso de biodigestores domésticos también posee la ventaja de utilizar residuos orgánicos y efluentes como materia prima.

- Para producir cambios sustanciales en la tendencia de producción y consumo de energía, es necesario que, además de utilizar instrumentos políticos inteligentes, se implemente un sistema de monitoreo para la toma de decisiones. Por ejemplo: un centro de visualización de datos de energía podría facilitar el análisis de los efectos de la aplicación de políticas públicas dirigidas a incrementar la eficiencia energética, y la incorporación de tecnología para la generación de fuentes alternativas de energía.

- Para reducir la fuerte dependencia de hidrocarburos que deben ser importados para el sector del transporte es recomendable que se inicie una transición a sistemas de transporte colectivo que funcionen a base de energía eléctrica o con combustibles alternativos. Por ejemplo, en Medellín, Colombia, el sistema integrado de transporte colectivo utiliza tranvías, metros, teleféricos y buses eléctricos para movilizar a más de dos millones de personas. Este es un modelo que puede ser replicado con beneficios adicionales como la reducción de emisiones contaminantes en las ciudades.

- Para atender las necesidades de electrificación, la descentralización energética puede presentar una serie de oportunidades para las comunidades en zonas remotas aisladas de la red del SNI. Por una parte, permitiría generar energía en el punto de consumo y, por otra, evitaría los costos asociados a la construcción de redes de transmisión y distribución. Llevar energía eléctrica a los departamentos con los índices más bajos de electrificación podría influir positivamente en los índices de desarrollo humano.

2.11 Referencias bibliográficas

AMM. (2016). *Despacho de carga ejecutado del sistema nacional interconectado 2016*. Guatemala: Administrador del Mercado Mayorista. Recuperado de AMM.

Bhattacharyya, S. C. (2011). *Energy economics: Concepts, issues, markets and governance*. Recuperado de: https://doi.org/10.1007/978-0-85729-268-1

Banco Mundial (BM). (2017). *DataBank: Guatemala*. Recuperado de: https://datos.bancomundial.org/pais/guatemala?view=chart

CNEE. (2016). *Informe estadístico*. Guatemala: Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Sub-Sede Regional México.

IAEA. (2005). *Energy indicators for sustainable development: guidelines and methodologies*. Vienna: International Atomic Energy Agency. Recuperado de: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1222_web.pdf

Incyt-URL. (2015). *Perfil energético de Guatemala: Introducción al sector eléctrico*. Guatemala: Editorial Cara Parens.

Meléndez, M. (2014). *Análisis e interpretación de indicadores energéticos para el desarrollo sostenible de Guatemala*. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.

MEM. (2013). *Política energética 2013-2027*. Guatemala: Ministerio de Energía y Minas. Recuperado de: http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2013/02/PE2013-2027.pdf

MEM. (2016). *Balance energético 2016*. Guatemala: Ministerio de Energía y Minas de Guatemala.

Olade. (2014). *Acceso a mercados energéticos, fase 2, Guatemala*. Organización Latinoamericana de Energía.

Undesa-IAEA. (2007). *Energy indicators for sustainable development. Country studies on Brazil, Cuba, Lithuania, Mexico, Russian Federation, Slovakia and Thailand*. New York, USA: Author.

3
CAPÍTULO

RECURSOS ENERGÉTICOS NO RENOVABLES

3. Recursos energéticos no renovables

Autor: Edgar E. Sacayón

3.1 Introducción

El petróleo, el carbón mineral y el gas natural son recursos energéticos fósiles que se encuentran en el subsuelo del territorio nacional y cuya composición química es el resultado de los procesos geológicos de descomposición de materia orgánica (vegetal y animal), que se ha compactado durante miles de años.

Cuantificar los recursos energéticos fósiles de un país es importante para la sostenibilidad energética y para la economía. En Noruega, por ejemplo, el Estado jugó un rol importante para el desarrollo de la industria petrolera, convirtiéndose así en una de las economías más fuertes del mundo (Cappelen, 2009; Fagerberg, Mowery & Verspagen, 2009; Ville & Wicken, 2012).

En primer lugar, el Estado noruego invirtió una gran cantidad de recursos en cuantificar sus reservas para dimensionar el potencial económico y regular su explotación sostenible a largo plazo (Cappelen, 2009). En segundo lugar, utilizó una serie de mecanismos para la transferencia de tecnología de empresas extranjeras hacia industrias de servicio local y centros de investigación y desarrollo. Esto garantizó el desarrollo tecnológico e industrial para asegurar su participación en el mercado internacional (Ville & Wicken, 2012). En tercer lugar, usó una serie de instrumentos políticos y financieros, para que los ingresos económicos por explotación de sus reservas de petróleo se tradujeran en beneficios directos a la sociedad (Cappelen, 2009).

Esta sección pretende llenar uno de los vacíos de información en términos de las reservas de petróleo, gas natural y carbón mineral, con el fin de promover e incentivar el aprovechamiento sostenible de estos recursos y que, a su vez, conduzcan a un desarrollo económico de beneficio a toda la sociedad guatemalteca.

A continuación se describen los distintos recursos no renovables de Guatemala.

3.2 Petróleo

El petróleo es uno de los recursos energéticos fósiles más importantes de la sociedad moderna. A partir de este, se produce una serie de materias primas para la elaboración de plásticos y otros productos, pero los más importantes son los combustibles fósiles como la gasolina, el diésel, el keroseno y el *fuel oil*. El petróleo se formó por la deposición de materia orgánica durante diferentes periodos geológicos de la Tierra, por lo que se encuentra en depósitos subterráneos en estado líquido, sólido o gaseoso (Speight, 1998).

El petróleo en estado líquido está compuesto por una mezcla de hidrocarburos de diferente estructura y peso molecular que, en general, puede contener entre 15-60% de alcanos, 30-60% de ciclo alcanos y 3-30% de hidrocarburos aromáticos (Demirel, 2012).

Los alcanos son hidrocarburos alifáticos de cadenas compuestas de carbono e hidrógeno únicamente, estos también son conocidos como parafinas. Los hidrocarburos ciclo alcanos o naftenos son cadenas alifáticas de carbono e hidrógeno en los que existe por lo menos una estructura cíclica, lo cual les da un mayor punto de ebullición.

Los hidrocarburos aromáticos, por lo regular, poseen compuestos formados por ciclos de seis átomos de carbono con dobles enlaces, los cuales son conocidos como bencenos.

Los hidrocarburos también poseen otros elementos como el nitrógeno, oxígeno y azufre, así como trazas de metales. Usualmente estos compuestos pueden ser separados del petróleo por métodos de destilación fraccionada, con lo que se obtiene una variedad de combustibles fósiles como GLP, gasolina, diésel, keroseno, *jet fuel* y búnker.

3.2.1 Reservas de petróleo en Guatemala

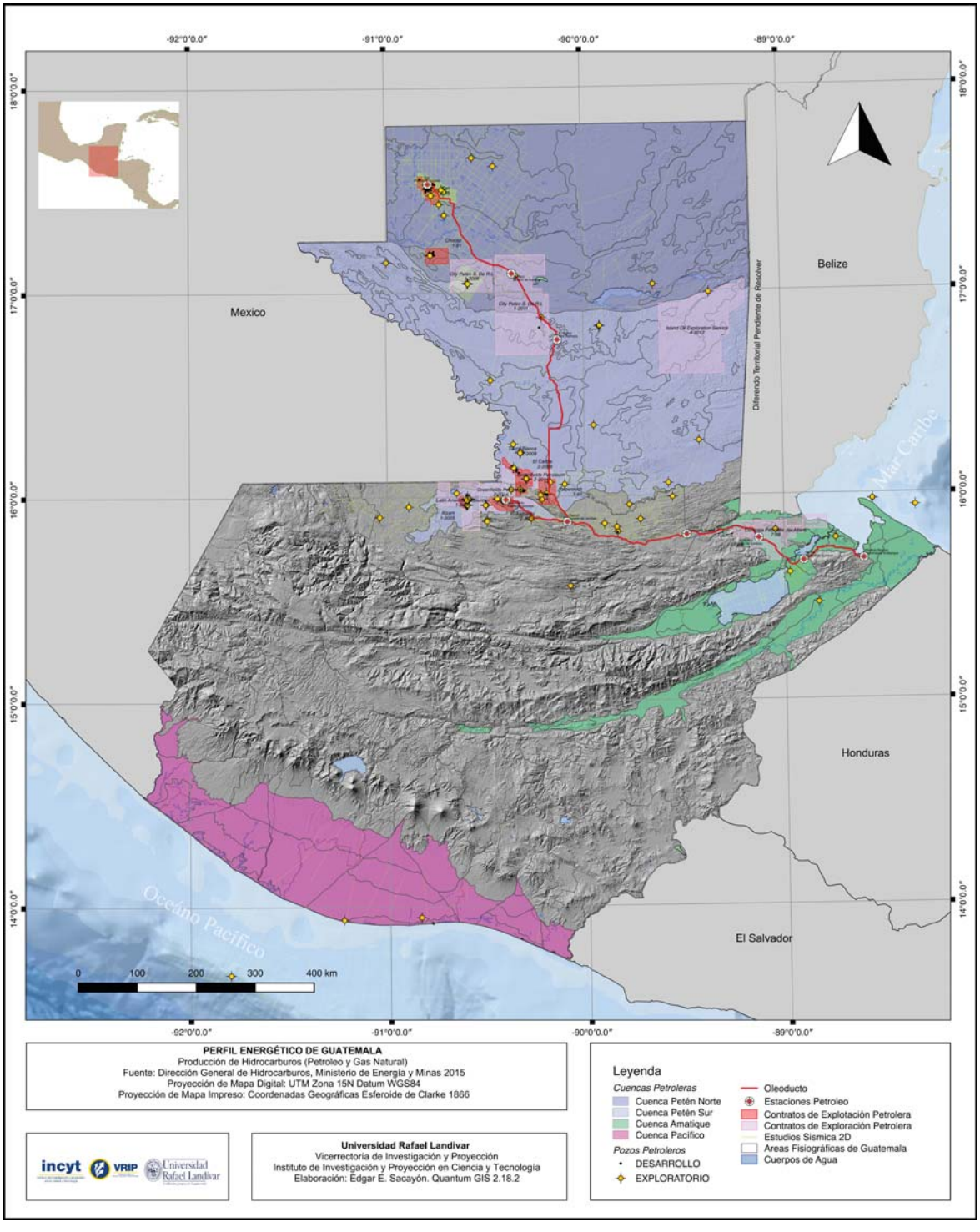
En Guatemala existen tres regiones con reservas probadas de petróleo: las cuencas Petén Norte, Petén Sur y la de Amatique (ver mapa 2), que forman parte de distintas provincias geológicas que fueron determinadas por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (mapa 3).

- La cuenca Petén Norte forma parte de la provincia geológica de la Plataforma de Yucatán (French & Schenk, 2004).

- La cuenca Petén Sur está asociada a la provincia geológica del cinturón plegado de la Sierra Madre de Chiapas-Petén (French & Schenk, 2004).

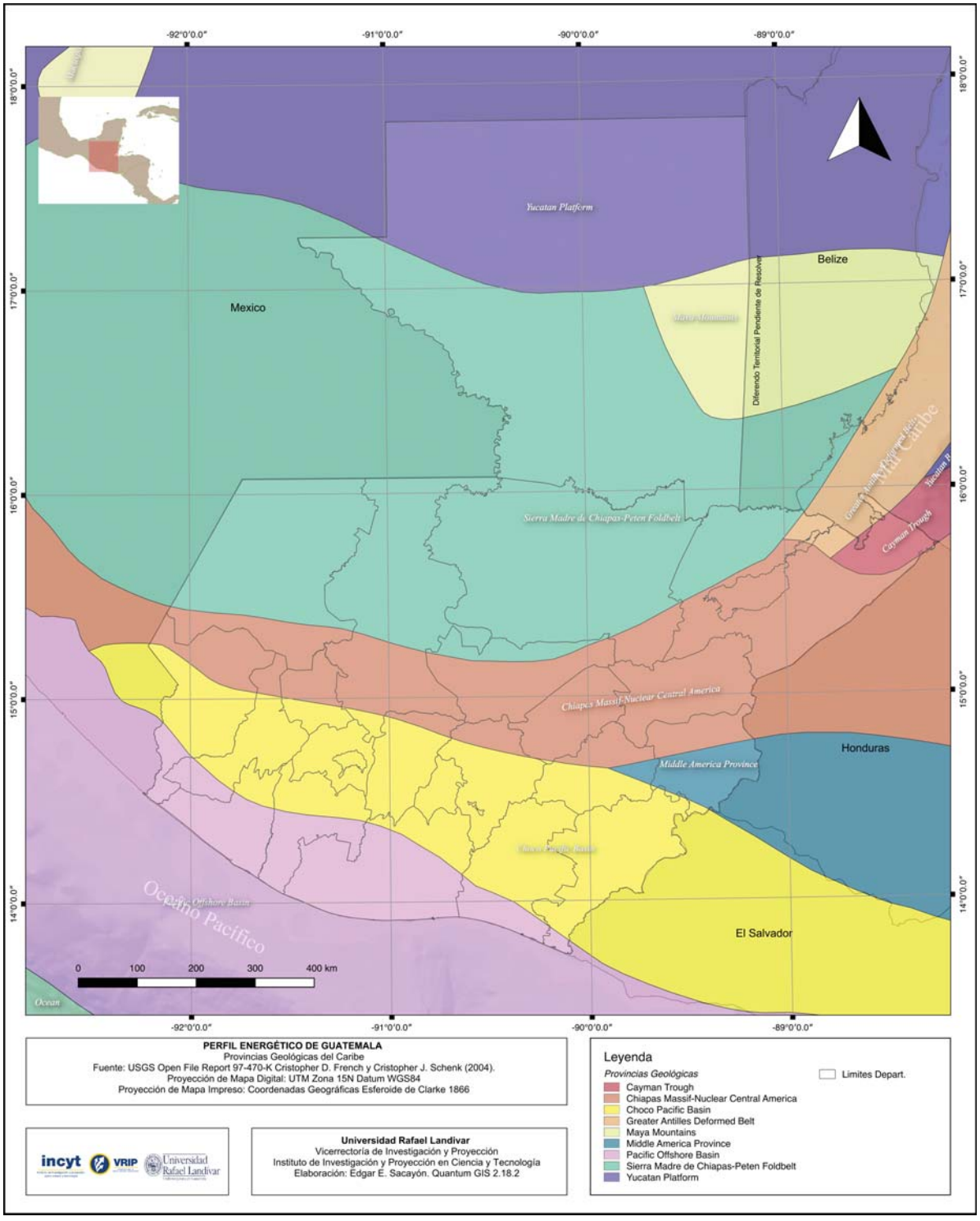
- La cuenca de Amatique se extiende sobre dos provincias geológicas en el Océano Atlántico, el cinturón deforme de las Antillas y la fosa de las Caimán (French & Schenk, 2004).

Mapa 2: Cuencas petroleras, exploración y explotación de petróleo en Guatemala



Fuente: Elaboración propia con información de la Dirección General de Hidrocarburos del MEM y del Servicio Geológico de los Estados Unidos

Mapa 3: Provincias geológicas del Caribe según el Servicio Geológico de los Estados Unidos



Fuente: French y Schenk (2004)

Aunque la exploración en la plataforma de Yucatán es bastante inmadura, el Servicio Geológico de los Estados Unidos ha estimado que esta plataforma podría tener un promedio de 758 millones de barriles de petróleo que no han sido explorados (Schenk *et al.,* 2012). En el cinturón plegado de la Sierra Madre de Chiapas-Petén, las reservas petroleras sin explorarse se estiman en casi 933 millones de barriles (Schenk, *et al.,* 2012). Sin embargo, cabe resaltar que estos datos se refieren a las reservas totales en cada provincia geológica y no solo en el territorio nacional.

Las estimaciones de dichas reservas de petróleo en el territorio guatemalteco tienen un alto grado de incertidumbre. Estas se han estimado en 432 millones de barriles[1] (Banguat-Iarna, 2011), 493 millones de barriles (Cepal, 2006) y 526 millones de barriles (Brown, 2012). Incluso el MEM carece de documentación técnica que le permita tener un dato aproximado de las reservas de petróleo del territorio, y esto es una debilidad en cuanto a desarrollo de la industria.

3.2.2 Exploración de petróleo en Guatemala

La exploración es importante para identificar estructuras geológicas del subsuelo con reservas de petróleo. Por lo general, en la primera etapa es necesario construir un modelo conceptual del área, el cual puede estar basado en la estratigrafía, la estructura o su evolución geológica (Slatt, 2006). En la segunda fase de exploración se realizan estudios de visualización sísmica del área. Estos pueden ser de dos dimensiones (2D) o tres dimensiones (3D); sin embargo, recientemente se han inventado técnicas para visualización sísmica de cuatro dimensiones (4D).

Los estudios de visualización sísmica son la herramienta dominante para la exploración de hidrocarburos. Los estudios 2D proporcionan una imagen lineal de la estratigrafía de un área. Las visualizaciones sísmicas 3D permiten obtener una imagen volumétrica del área de estudio, proporcionando más información que una imagen sísmica 2D. Cuando una imagen 3D se realiza a lo largo de un periodo de tiempo, esta puede proporcionar información sobre propiedades fluidas del subsuelo. Un estudio de sísmica proporciona una imagen aproximada de la estructura geológica y la estratigrafía del subsuelo, que puede ser utilizada para determinar yacimientos de petróleo. Este se ha convertido en la herramienta más común en la fase de exploración.

Un estudio sísmico se realiza mediante la producción de ondas sonoras, por medio de una fuente de energía como una explosión o un instrumento de percusión. Las ondas sonoras tienden a reflejar las propiedades acústicas de las formaciones rocosas del subsuelo, lo que provee una imagen de la estratigrafía del área de estudio y permite conducir a la perforación de un pozo exploratorio. Los pozos exploratorios proporcionan información sobre las características del subsuelo, las cuales son utilizadas para determinar la acumulación de hidrocarburos. Adicionalmente, se pueden realizar otros estudios sobre sedimentación para incrementar la certidumbre de un yacimiento y realizar pozos de producción (Slatt, 2006).

1 La Cuenta de Recursos del Subsuelo reporta un total de 58, 958,166 toneladas para el 2010, las cuales, al multiplicar por un factor de conversión de 7.33 (que es la gravedad promedio del crudo mundial), da como resultado un total de 432 millones de barriles de petróleo.

En Guatemala existen estudios de cobertura sísmica 2D en las tres cuencas petroleras (mapa 2). Actualmente existen 12 zonas adjudicadas a 10 empresas para la exploración de petróleo (MEM, 2015). Con estos proyectos de exploración, el MEM espera incrementar la producción de crudo a 18 millones de barriles anuales (Ayala, 2015). La tabla 6 muestra los contratos vigentes hasta la fecha.

Tabla 6. Contratos de exploración petrolera vigentes en Guatemala

No.	Contrato	Nombre	Localidad
1	6-93	Petro Latina Corporation	Fray Bartolomé de las Casas
2	7-98	Compañía Petrolera del Atlántico	Livingston, Izabal
3	1-2005	Latin American Resources Ltd.	Quiché
4	1-2006	City Peten S. De R.L	Ocultun, La Libertad, Petén
5	1-2011	City Peten S. De R.L	La Libertad
6	1-2012	Perenco Guatemala LTD.	Cotzal
7	2-2012	Galax Garden Corporation	San Francisco
8	4-2012	Island Oil Exploration Services S.A.	Laguna Blanca
9	5-2012	Trayectoria Oil & Gas	Cancuén
10	6-2012	Greenfields Petroleum (Guatemala) Ltd.	El Cedro
11	7-2012	Zacapa Energy LTD.	Xalbal
12	2-2014	Greenfields Petroleum (Guaemala) Ltd.	Cobán, Quiché

Fuente: Elaboración propia con base en MEM (2015)

3.2.3 Producción de petróleo en Guatemala

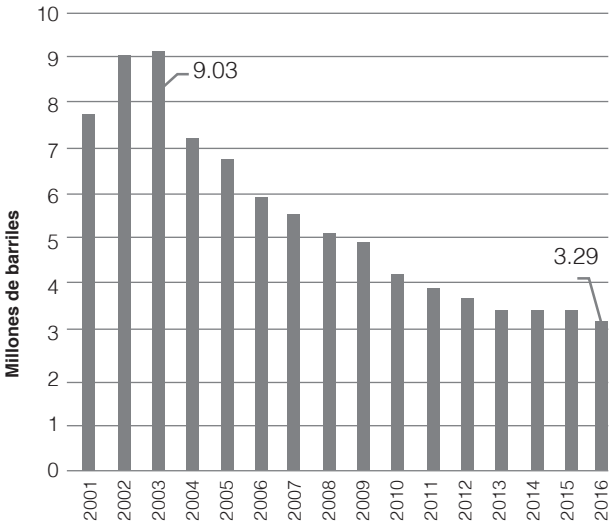
Seis empresas operan contratos de explotación de petróleo en Guatemala (tabla 7): Perenco Guatemala Ltd., *Petro Latina Corporation, Latin American Resources, Petro Energy S.A.,* Empresas Petroleras del Istmo S.A. y *City Peten* S. de R.L. (MEM, 2015). La producción de petróleo en Guatemala ha decrecido en los últimos 15 años (figura 22). En 2003, la producción de petróleo alcanzó los 9.03 millones de barriles mientras que en 2016 la producción de petróleo llegó solo a los 3.29 millones de barriles.

Tabla 7. Contratos de explotación petrolera en Guatemala

No.	Contrato	Nombre	Localidad
1	2-85	Perenco Guatemala LTD.	Xan
2	1-2005	Latin American Resources LTD.	Atzam
3	1-2005	Latin American Resources Ltd.	Tortugas
4	1-91	Petro Energy S.A.	Chocop
5	1-91	Petro Energy S.A.	Yalpemech
6	6-93	Petro Latina Corporacion	Las Casas
7	2-2009	Empresa Petrolera del Itsmo S.A.	Rubelsanto
8	2-2009	Empresa Petrolera del Itsmo S.A.	Chinaja Oeste
9	2-2009	Empresa Petrolera del Itsmo S.A.	Caribe
10	2-2009	Empresa Petrolera del Itsmo S.A.	Tierra Blanca
11	1-2006	City Peten S. de R.L	Ocultún

Fuente: Dirección General de Hidrocarburos, MEM (2015)

Figura 22. Producción de petróleo en Guatemala



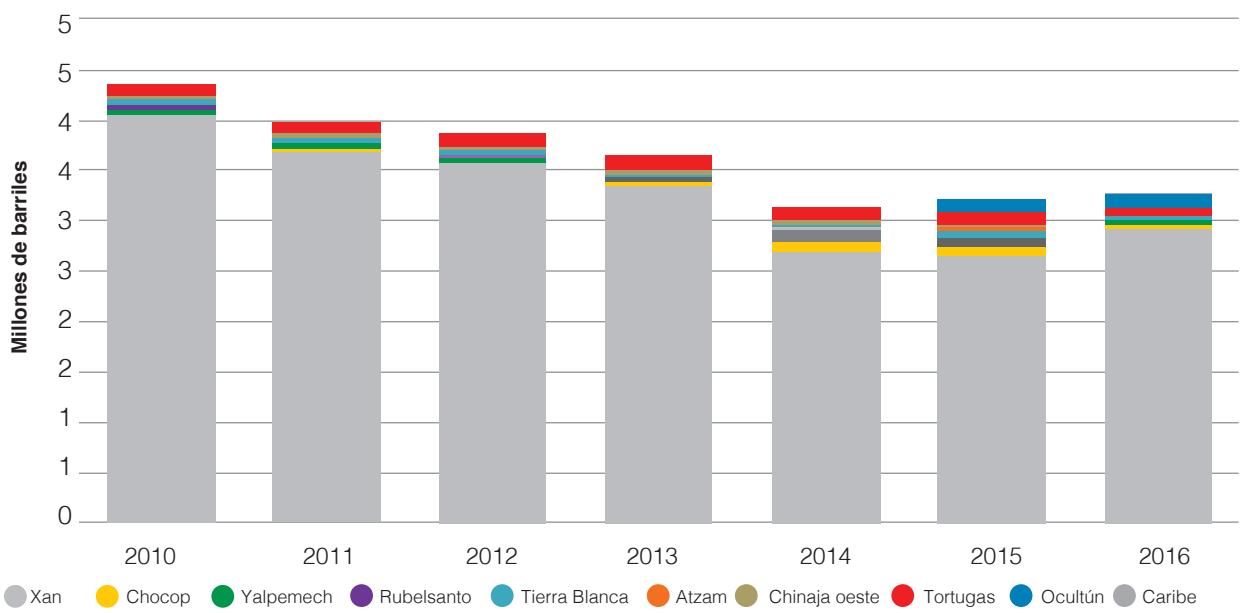
Fuente: DGE-MEM. Estadísticas de producción nacional de petróleo por contrato. Serie de datos del año 2001-2016. Ministerio de Energía y Minas de Guatemala

La producción total por zona de extracción se puede observar en la figura 23. Perenco Guatemala Ltd., extrae en el pozo Xan 90% de la producción nacional, por lo que las características del crudo nacional están determinadas por las propiedades de este yacimiento. En el mapa 2 se aprecia el oleoducto de 425 kilómetros de largo que conecta y transporta el crudo proveniente de los pozos ubicados en el norte y sur de Petén y lo dirige a la terminal de Piedras Negras, que tiene una capacidad de almacenamiento de 420,000 barriles de petróleo para su exportación (Sapón, 2007). El área Ocultún reportó su primera producción de petróleo durante 2015.

La refinería de La Libertad es la única que procesa de 300 a 600 mil barriles de crudo, que es utilizado para la producción de asfaltos, nafta, queroseno, diésel y gasoil de vacío (SIB, 2010). Los planes para construir la Refinería del Motagua nunca se concretaron.

Por otro lado, el país cuenta con la infraestructura necesaria para almacenar la producción nacional y recibir hidrocarburos importados. En el Atlántico, se localizan dos puertos con infraestructura para almacenamiento de crudo y gas natural: Puerto Barrios y Santo Tomás de Castilla. En el Pacífico, se localizan el Puerto San José, Puerto Quetzal y Puerto Champerico (Olade, 2014).

Figura 23. Producción nacional de petróleo por zona de extracción



Fuente: DGE. Importación de productos derivados del petróleo. Serie de datos del año 2001-2016. Ministerio de Energía y Minas de Guatemala

3.2.4 Características fisicoquímicas del petróleo nacional

El petróleo es un mineral compuesto en un 90% de mezclas de hidrocarburos de diferentes pesos moleculares y que, en menor proporción, pueden llegar a tener azufre (8%), nitrógeno (6%) y oxígeno (2%) (Tester, Drake, Driscoll, Golay & Peters, 2012).

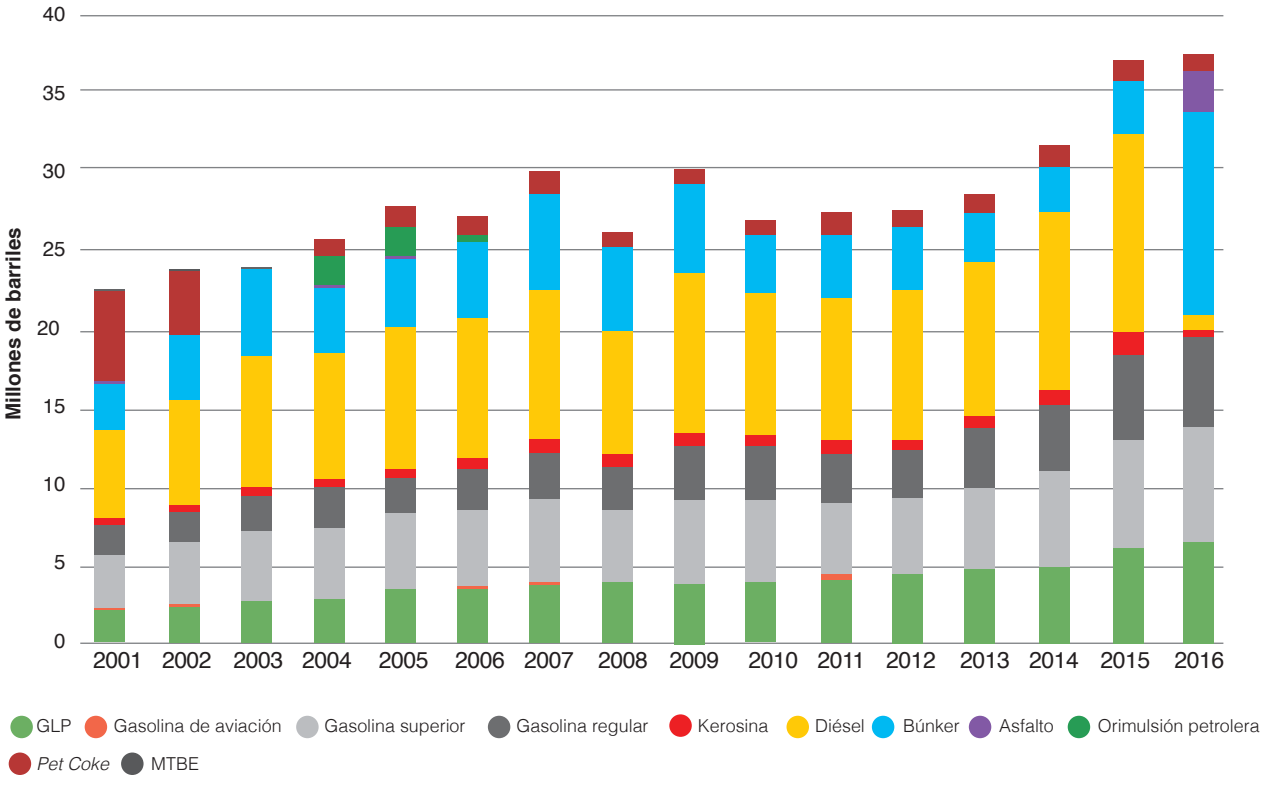
La clasificación en grados del Instituto Americano de Petróleo (API, por sus siglas en inglés), cataloga al crudo nacional como pesado (Cepal, 2006). Su peso específico promedio es de 16°API con un contenido del 6% de azufre. El contenido de azufre es uno de los parámetros utilizados para evaluar su calidad, a mayor proporción de azufre la calidad del crudo disminuye (Speight, 1998).

Crudos más livianos se pueden encontrar en las otras zonas de extracción pero, debido a que solo contribuyen al 1% de la producción neta, no influyen en las características físicas del crudo nacional. La cuenca de Amatique, por ejemplo, posee yacimientos de crudo con peso específico que van desde 23 a 40°API (Cepal, 2006).

3.2.5 Importación de hidrocarburos en Guatemala

En contraste, el consumo de hidrocarburos derivados del petróleo ha venido en aumento en los últimos años (DGH, 2016). Debido a que la única refinería de Guatemala no puede satisfacer la demanda de hidrocarburos, la mayor cantidad de estos son importados. La figura 24 muestra las proporciones de hidrocarburos que son importadas anualmente al país, para satisfacer la demanda del sector transporte y, en menor grado, del sector residencial, industrial y comercial.

Figura 24. Importación de hidrocarburos en Guatemala durante el periodo 2001-2016 en millones de barriles



Fuente: DGH (2016)

3.3 Gas natural

3.3.1 Características del gas natural

El gas natural es una mezcla de hidrocarburos gaseosos presentes en depósitos del suelo o asociados a yacimientos de petróleo. Su composición química puede variar de 70-98% de metano, 1-10% de etano y porcentajes mínimos de otros gases como propano, butano, pentano, hidrocarburos cíclicos y aromáticos (Speight, 1998). Su clasificación está basada en su composición química. Por ejemplo, el gas seco se compone en su mayor parte por metano, mientras que el húmedo tiene fracciones considerables de gases con mayor peso molecular e hidrocarburos de mayor punto de ebullición (Speight, 1998).

3.3.2 Reservas de gas natural en Guatemala

Las reservas de gas natural en Guatemala se han estimado en 109,000 millones de pies cúbicos, lo cual equivale a 3,086,536 m^3 (SIB, 2010). Las exploraciones de petróleo en la cuenca del Pacífico han dado

indicios de poseer potencial de producción de gas natural e hidratos de metano (Demirbas, 2010; Sapón, 2007; SIB, 2010).

Los hidratos de metano son fuentes de energía relativamente nuevas que se encuentran en estructuras cristalinas sólidas y están formadas por metano y, en menor porcentaje, por agua, dióxido de carbón, etano, propano y butano (Demirbas, 2010). El potencial energético de los hidratos de metano es bastante elevado; se estima que un 1 m^3 del compuesto sólido se puede disociar a temperatura y presión atmosférica para producir 164 m^3 de gas natural, excediendo posiblemente el contenido energético de otros combustibles fósiles (Demirbas, 2010).

Actualmente no existe infraestructura para la explotación de gas natural en Guatemala y la mayor parte de los productos de gas son importados. En cuanto a la producción de hidratos de metano, este combustible podría ofrecer oportunidades favorables para el país si se desarrolla la tecnología adecuada para su explotación.

3.4 Carbón mineral

3.4.1 Características del carbón mineral

El carbón mineral es una roca sedimentaria que se forma por procesos de compactación, presión y altas temperaturas durante la descomposición de materia vegetal (Speight, 2005). Su composición química consiste en átomos de carbón, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y azufre. También posee, en menor proporción, otros minerales como arsénico, mercurio, uranio, torio e isotopos radioactivos, los cuales son bastante peligrosos para el ambiente (Speight, 2005).

Vetas de carbón pueden aparecer en diferentes capas geológicas del suelo en todas partes del mundo, pero las más importantes comercialmente, se asocian a rocas sedimentarias del carbonífero (Speight, 2005).

3.4.2 Clasificación del carbón mineral

Los diferentes sistemas de clasificación de carbón mineral se basan en sus propiedades físicas y químicas. A continuación, se presenta el sistema de clasificación ASTM[2], que clasifica al carbón mineral según su rango de dureza:

- **Antracita:** por su dureza también es llamada carbón duro. Tiene un contenido del 80-98% de carbón y un porcentaje reducido de partículas volátiles (2-14%). Su humedad es menor al 15% y su poder calorífico es de aproximadamente 22-28 millones Btu[3] por tonelada.

- **Hulla bituminosa:** es un carbón denso, de color café oscuro o negro, su contenido de carbón es del 69-86%, de partículas volátiles de 22-31% y un poder calorífico de 21-30 millones de Btu por tonelada.

- **Hulla sub-bituminosa:** su consistencia es más suave y se desmorona fácilmente. Su contenido de carbón es menos del 69 y 31% de partículas

2 *American Society for Testing Materials.*

3 *British Thermal Units* equivalente a 1,055 Joules.

volátiles. Su poder calorífico es de 17-24 millones Btu por tonelada.

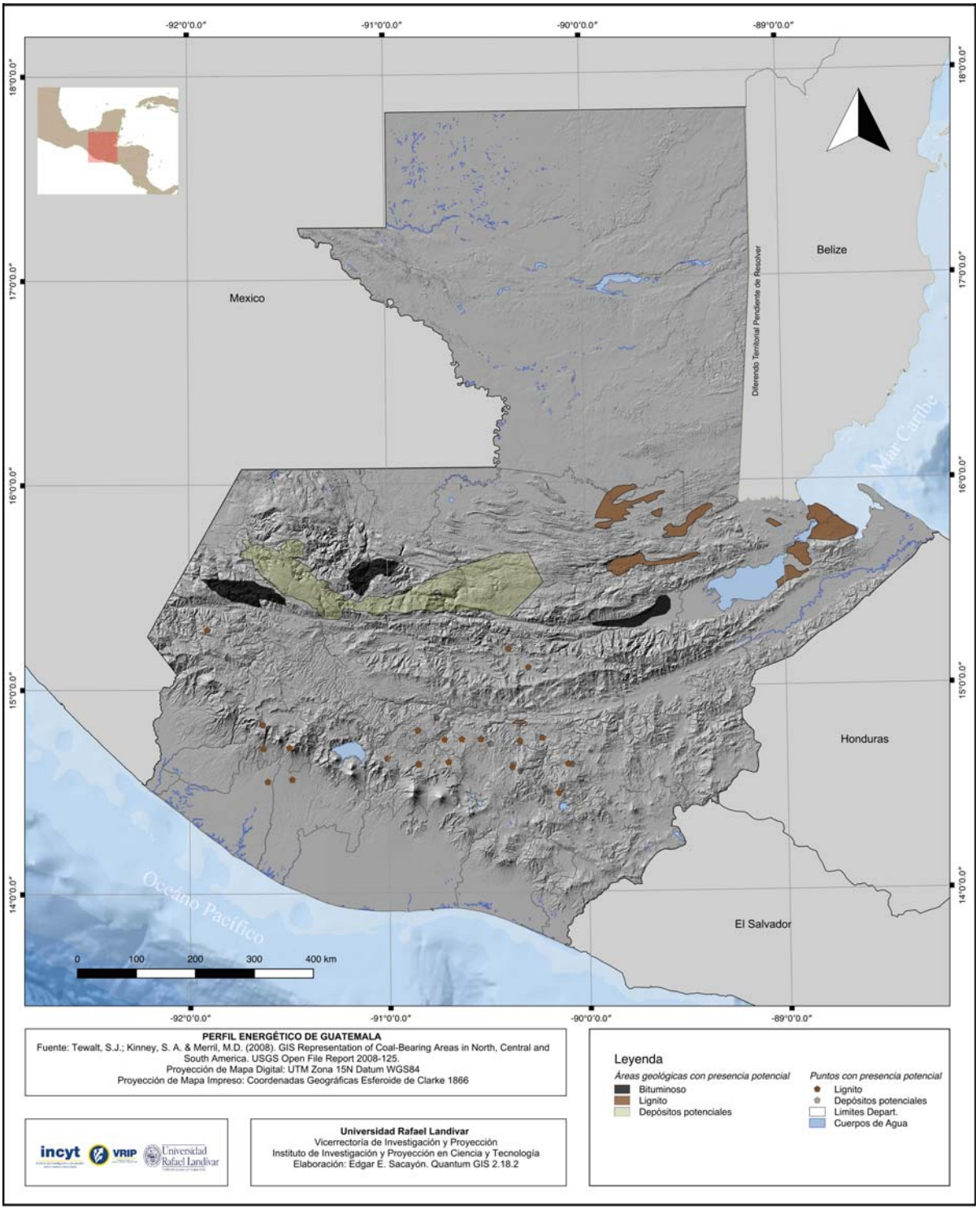
- **Lignito:** es el rango más bajo, usualmente de color café pardo, por lo que se le llama carbón café. Su contenido de carbón es muy bajo, menor del 69%, con un porcentaje alto de humedad y partículas volátiles, mayor del 45%. Su poder calorífico es de 9-17 millones Btu por tonelada.

3.4.3 Depósitos de carbón en Guatemala

En Guatemala, estudios geológicos han confirmado la presencia de depósitos de lignito en el departamento de Izabal y en la región norte de Alta Verapaz (Tewalt, Kinney & Merril, 2008). Depósitos de hulla bituminosa podrían encontrarse en Huehuetenango, Quiché y en la región del Polochic, en Alta Verapaz (mapa 4). Estos estudios datan desde los años 70 (Bohnenberger & Dengo, 1978; Landis & Weaver, 1987).

El mapa 4 presenta los depósitos potenciales de carbón mineral en Guatemala basados en los estudios del Servicio Geológico de los Estados Unidos (Tewalt *et al.,* 2008). Esta información es preliminar y no puede ser utilizada para determinar aspectos cualitativos y cuantitativos de este recurso. Es necesario realizar prospecciones geológicas para estimar la calidad y cantidad de las vetas de carbón en Guatemala. El carbón usado por la industria energética para generación de electricidad es importada de Colombia (Olade, 2014).

Mapa 4: Depósitos de carbón mineral en Guatemala



Fuente: Tewalt *et al.* (2008)

3.5 Generación de energía con combustibles fósiles

La combustión es una de las tecnologías más antiguas para producir energía. La reacción química involucra la oxidación del combustible (carbón, búnker o gas) y la liberación de calor y dióxido de carbono como subproducto. La presión, temperatura y sedimentación son los procesos que determinan las propiedades químicas y físicas de los combustibles fósiles. Por lo tanto, el carbón, el petróleo y el gas natural son los combustibles más comunes para la generación de energía en la actualidad.

La generación de energía eléctrica que utiliza combustibles fósiles se produce usando plantas térmicas. Por lo general, una planta térmica tiene cuatro componentes: 1) una caldera, 2) una turbina de vapor para transformar el calor en energía mecánica, 3) un generador de electricidad, y 4) un condensador para enfriar el vapor y reciclar el agua. En estos sistemas, el principal componente es el calor proveniente de la combustión del combustible fósil.

La mayoría de plantas térmicas que funcionan con base en combustibles fósiles se encuentran en los departamentos de Escuintla y Guatemala. El combustible que más se utiliza es el carbón, seguido por el búnker y, en un menor porcentaje, el diésel. La tabla 8 proporciona el listado de las plantas de energía eléctrica que usan combustibles fósiles.

3.5.1 Plantas térmicas de carbón en Guatemala

Por lo general, existen tres modelos de tecnología de calderas: las de parrilla, las de carbón pulverizado y las de lecho fluidizado. Las de parrilla son la tecnología más sencilla. En estas, una faja transportadora alimenta el combustible (carbón) hacia la parrilla donde se quema y las partículas volátiles se terminan de quemar en la parte superior de la caldera. Un sistema de tuberías de agua realiza la transferencia de calor para conducir el vapor hacia la turbina. En las de carbón pulverizado, el carbón se alimenta en forma de pequeñas partículas menores a las 100 micras por medio de un flujo controlado de aire. En este caso, el material pulverizado y las partículas volátiles se queman en la misma parte de la caldera. En las calderas de lecho fluidizado, las partículas microscópicas de carbón se alimentan por medio de corrientes controladas de aire, lo que hace que se comporten como fluidos.

En este último caso, la combustión es más eficiente que en los casos anteriores y necesitan de menores temperaturas. Si se aumenta la presión, los gases calientes producidos pueden ser utilizados en una turbina de gas usando un proceso llamado lecho fluidizado presurizado. La ventaja de la combustión de lecho fluidizado es que permite la reducción de contaminantes ambientales, ya que elementos con sulfuro pueden ser removidos con mayor facilidad usando cal. Las tecnologías más avanzadas para combustión de carbón incluyen combustión subcrítica, supercrítica y ultra supercrítica. Además, también está la gasifica-

ción integrada en ciclos combinados, que aumenta la eficiencia de combustión de carbón hasta en un 45%.

En Guatemala, la tecnología predominante para la combustión son las calderas acuotubulares y el carbón utilizado para la generación de electricidad es la hulla bituminosa, importada de Colombia. El 80% se produce en las regiones de Guajira y César, localizadas en la vertiente del Atlántico de Colombia (UPME, 2012). La hulla bituminosa posee un menor contenido de carbón que la antracita y un poder calorífico más bajo; la eficiencia de combustión reportada para esta tecnología es de 35%. Los bajos precios de este combustible hacen que la generación de carbón sea económicamente competitiva. Desde 2008 se ha incrementado la potencia de placa de plantas de carbón, llegando a los 580 MW en 2015. La planta *Jaguar Energy* es la más grande, con 300 MW de potencia de placa. La generación con carbón aportó 2,172 GWh en 2016 (AMM, 2016).

Por otro lado, los ingenios azucareros producen energía térmica con bagazo de caña durante la época de zafra, la cual se aprovecha en los procesos de producción de azúcar y de etanol. Adicionalmente, también producen electricidad que venden al SNI, por lo cual los ingenios son conocidos como cogeneradores. Durante el período de no zafra, la mayoría de ellos produce energía con carbón. Sin embargo, es difícil cuantificar la cantidad exacta de carbón que se consume, así como la de energía que se genera con esta fuente energética.

3.5.2 Motores reciprocantes de combustión interna

En Guatemala, los motores reciprocantes de combustión interna usan búnker para producir energía eléctrica. Estos motores tienen pistones para convertir el calor en energía mecánica y pueden ser de dos o cuatro tiempos. El combustible es búnker C, también conocido como *fuel oil* no. 6. Este es un hidrocarburo líquido muy pesado y viscoso con una composición química de hidrocarburos pesados de 30 átomos de carbono por molécula. Su composición promedio es de 15% alcanos; 15% de compuestos polares de nitrógeno, oxígeno y azufre; 25% de compuestos aromáticos y 45% de ciclo alcano. Es un líquido de alta viscosidad que necesita precalentamiento a 104-127°C para poder ser utilizado. La generación con plantas de búnker aportó 650 GWh de electricidad a la red en 2016. La potencia de placa de los motores reciprocantes se estima arriba de los 700 MW; sin embargo, estos operan con un factor de planta muy bajo.

3.5.3 Turbinas de gas

En Guatemala, se reporta un grupo de generadores que utiliza turbinas de gas. Una turbina de gas funciona a base de gas natural, pero en el país se usa diésel como combustible. La tecnología de turbinas se basa en el ciclo de Brayton; el cual permite que el combustible ingrese a una presión elevada y combustione dentro de la cámara de la turbina. La combustión a alta presión genera un movimiento de las astas las cuales, conectadas a un generador, producen

electricidad. Existen dos categorías de turbinas: las aeroderivadas y las industriales *(heavy-duty)*. Las primeras son turbinas de aeronaves modificadas en tamaños de 50 MW. Las segundas, por el contrario, están diseñadas para producir alrededor de 30 MW. Las turbinas de gas aportan un porcentaje menor al 1% del total de la matriz energética. Con una potencia de placa que llega a los 250 MW, estas plantas aportaron un total de 5 GWh a la red del sistema nacional interconectado en 2016 (AMM, 2016).

La tabla 8 presenta la capacidad instalada de plantas de generación de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles.

Tabla 8. Plantas de generación de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles en Guatemala

No.	Planta	Instalación	Unidades	Tecnología	Combustible	Placa (MW)	Potencia efectiva (MW)	Generación anual (GW)	Factor de planta %	Municipio	Departamento
Turbinas de vapor						585	530	2,172			
1	San José	01/01/2000	1	TV	Carbón	139.0	137.3	1,042.0	86%	Masagua	Escuintla
2	La Libertad	17/08/2008	1	TV	Carbón	20.0	17.4	80.9	46%	Villa Nueva	Guatemala
3	Arizona Vapor	29/09/2008	1	TV	N/A	12.5	3.3	4.3	4%	Puerto San José	Escuintla
4	Las Palmas II	13/05/2012	2	TV	Carbón	83.0	76.3	298.3	41%	Escuintla	Escuintla
5	Generadora Costa Sur	11/09/2013	1	TV	Carbón	30.2	30.0	171.7	65%	Guanagazapa	Escuintla
6	*Jaguar Energy*	21/06/2015	2	TV	Carbón	300.0	265.8	575.2	22%	Masagua	Escuintla
Turbinas de gas						251	138	5			
7	Tampa	17/06/1905	2	TG	Diésel	80.0	78.4	4.2	1%	Escuintla	Escuintla
8	Stewart & Stevenson	24/12/1995	1	TG	Diésel	51.0	20.9	0.3	0%	Escuintla	Escuintla
9	Escuintla Gas 3	29/05/1905	1	TG	Diésel	35.0	0.0	0.0	-	Escuintla	Escuintla
10	Escuintla Gas 5	01/11/1985	1	TG	Diésel	41.9	38.5	0.9	0%	Escuintla	Escuintla
11	Laguna Gas 1	31/05/1905	1	TG	Diésel	17.0	0.0	0.0	-	Amatitlán	Guate mala
12	Laguna Gas2	31/05/1905	1	TG	Diésel	26.0	0.0	0.0	0%	Amatitlán	Guatemala
Motores reciprocantes de combustión interna						711	568	650			
13	Arizona	01/05/2003	10	CI	Bunker	160.0	160.8	341.5	24%	Puerto San José	Escuintla
14	Poliwatt	01/05/2000	7	CI	Bunker	129.4	125.5	0.0		Puerto Quetzal	Escuintla
15	Puerto Quetzal Power	15/06/1905	10	CI	Bunker	59.0	57.3	19.9	4%	Puerto Quetzal	Escuintla
16	Las Palmas	01/08/1998	5	CI	Bunker	66.8	66.9	51.8	9%	Escuintla	Escuintla
17	GENOR	01/10/1998	4	CI	Bunker	46.2	41.4	55.6	14%	Puerto Barrios	Izabal
18	SIDEGUA	17/06/1905	10	CI	Bunker	44.0	0.0	0.0	-	Escuintla	Escuintla
19	Industria Textiles Del Lago	18/06/1905	10	CI	Bunker	70.0	70.8	142.7	23%	Amatitlán	Guatemala
20	Generadora Progreso	15/06/1905	6	CI	Bunker	21.0	0.0	0.0	-	Sanarate	El Progreso
21	Electro Generación	01/11/2003	2	CI	Bunker	15.8	16.2	34.4	25%	Amatitlán	Guatemala
22	GECSA	25/02/2007	2	CI	Bunker	15.7	0.0	0.0	-	Chimaltenango	Chimaltenango
23	GECSA 2	12/10/2008	2	CI	Bunker	37.8	0.0	0.0	-	Chimaltenango	Chimaltenango
24	COENESA	01/09/2008	5	CI	Diésel	10.0	6.0	0.0	0%	El Estor	Izabal
25	Electro Generación Cristal	27/06/1905	2	CI	Bunker	5.0	3.5	0.0	-	Santa Elena	Petén
26	INTECCSA Bunker	01/02/1998	1	CI	Bunker	5.0	3.5	0.0	-	Santa Elena	Petén
27	INTECCSA Diesel	14/07/1994	5	CI	Diésel	6.4	0.0	0.0	-	Santa Elena	Petén
28	GENOSA	14/07/1994	3	CI	Bunker	18.6	16.6	4.5	3%	Puerto San José	Escuintla
	Total					**1,546**	**1,236**	**2,828**			

Fuente: AMM (2016)

3.5.4 Propiedades fisicoquímicas de los combustibles fósiles

La cantidad de energía que se puede obtener a partir del carbón, búnker y diésel está correlacionada con sus propiedades fisicoquímicas. La tabla 9 presenta las propiedades de los combustibles fósiles, utilizados en Guatemala.

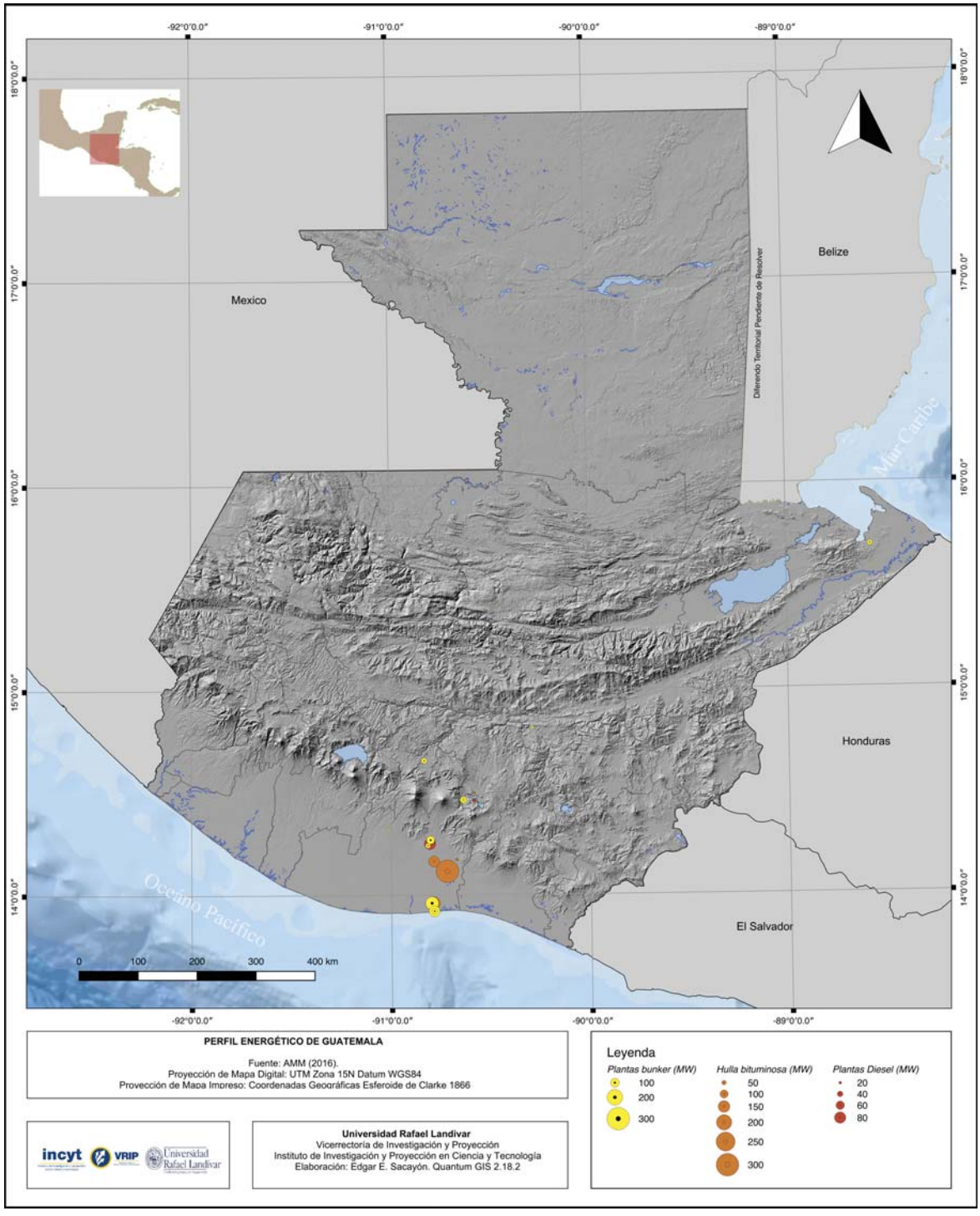
Tabla 9. Propiedades físicoquímicas del carbón, búnker C y diésel

Combustible	Poder calorífico		Densidad
	BTU/Gal	MJ/Kg	
Carbón (Hulla bituminosa)		27	
Búnker C (*Fuel oil* No.6)	150,000	42.6	7.998-8.108 lbs/gal
Diésel	142,200	43.1	0.832 kg/l

Fuente: Incyt (2017)

A continuación, el mapa 5 presenta las plantas térmicas que operan en Guatemala (año 2017).

Mapa 5: Plantas térmicas que operan con combustibles fósiles en Guatemala. Potencia instalada representada por tamaño de círculo



Fuente: CNEE (2017)

3.6 Conclusiones

- **Las reservas de petróleo tienen un alto grado de incertidumbre.** Las estimaciones de las reservas de petróleo poseen un alto grado de incertidumbre y los datos tienen un alto grado de variabilidad que se encuentra entre 430 a 526 millones de barriles de petróleo. Esto no permite cuantificar con certeza el potencial económicamente aprovechable y los beneficios económicos que se podrían producir a largo plazo. A pesar de la existencia de varios contratos de exploración petrolera, la explotación del crudo nacional ha decaído en los últimos años. De los 9 millones de barriles que se aprovecharon en 2003, la explotación disminuyó a 3.29 millones en 2016. Adicionalmente, no existe infraestructura para el aprovechamiento de derivados de petróleo en el territorio nacional.

- **Las reservas de gas natural se estiman en 3,086,536 m^3 2016**. El gas natural podría presentar oportunidades para el sector energético; sin embargo, no existe infraestructura para su aprovechamiento. Los hidratos de metano son una nueva fuente de combustible que podría aprovecharse en el futuro. No obstante, en este momento no existe desarrollo tecnológico para explorar, extraer y aprovechar este recurso.

- **Existen depósitos potenciales de carbón mineral.** La información geológica revela que existen potenciales depósitos de carbón mineral en el territorio de Guatemala, por lo que corresponde realizar una serie de estudios y prospecciones geológicas en los sitios identificados. Pruebas del poder calorífico de estos minerales podrían confirmar su valor energético como combustibles.

3.7 Recomendaciones

- La inversión del Estado en investigación y desarrollo para la exploración y explotación de recursos fósiles es sumamente importante y presenta beneficios a largo plazo para la sociedad guatemalteca. Se sugiere determinar con mayor precisión y exactitud las reservas de petróleo en el territorio nacional. También es indispensable que se hagan estudios y prospecciones geológicas para determinar la presencia de depósitos de carbón mineral. La inversión en desarrollo tecnológico también podría beneficiar el aprovechamiento de las nuevas fuentes de energía, como el gas natural.

- Incentivar la inversión en infraestructura para la extracción y procesamiento de gas natural y destilación de hidrocarburos, reducirá la dependencia externa de combustibles.

- En necesario incentivar, por medio del gobierno, la explotación y refinamiento del petróleo, para que, de esta manera, aumente la producción local de petróleo refinado.

3.8 Referencias bibliográficas

Ayala, L. (2015). *Industria petrolera en Guatemala, actualidad y potencial*. Colombia. Recuperado de: http://www.olade.org/sites/default/files/seminarios/2_petroleo_gas/ponencias/11hs Guatemala-Luis Ayala.pdf

Banguat-Iarna. (2011). *Sistema de Contabilidad Ambiental y Económica Integrada de Guatemala (SCAEI). Síntesis Explicativa* (2da ed.). Guatemala: Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar.

Bohnenberger, O. H., & Dengo, G. (1978). Coal resources in Central America. *Coal Resources of the Americas, Selected Papers*, 65-72. https://doi.org/10.1130/SPE179-p65

Brown, C. (2012). *World Energy Resources: International Geohydroscience and Energy Research Institute*. Springer Science & Business Media.

Cappelen, A. (2009). *Can Norway Be a Role Model For Natural Resources Abundant Country ?* Recuperado de: https://doi.org/10.1093/acprof

Cepal. (2006). *Istmo centroamericano: Diagnóstico de la industria petrolera*. México, D.F.: Comisión Económica para América Latina y el Caribe de las Naciones Unidas.

Demirbas, A. (2010). *Methane Gas Hydrate* London: Springer-Verlag. Recuperado de: https://books.google.com.gt/books?id=WFefWAq1Sh0C

Demirel, Y. (2012). *Energy: Production, Conversion, Storage, Conservation, and Coupling. Green Energy and Technology* (Vol. 69). Recuperado de: https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2372-9

DGH. (2016). *Datos mensuales, Importación de Productos Derivados de Petróleo Período 2001-2016*. Guatemala: Sección de Estadística del Departamento de Análisis Económico de la Dirección General de Hidrocarburos del Ministerio de Energía y Minas de Guatemala. Recuperado de: http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2016/05/C01-1-Volumen-importado.pdf

Fagerberg, J., Mowery, D. C. & Verspagen, B. (2009). The evolution of Norway's national innovation system. *Science and Public Policy*, *36*(6), 431-444. https://doi.org/10.3152/030234209X460944

French, C. D., & Schenk, C. J. (2004). *Geologic Provinces of the Caribbean Region (prv6bg)*. Denver, CO: U.S. Geological Survey, Central Energy Resources Team.

Landis, E. R. & Weaver, J. N. (1987). *Coal Resources of Central America. Open-File Report 87-365*. Denver, Co.

MEM. (2015). *Contratos Petroleros en la República de Guatemala, C.A.* Guatemala. Recuperado de: http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2012/05/Articulo-10-numeral-16-Contratos-petroleros.pdf

Olade. (2014). *Acceso a mercados energéticos, Fase 2, Guatemala*. Organización Latinoamericana de Energía.

Sapón, J.A. (2007). *Tratamiento y utilización de gas natural para la generación de energía eléctrica en un campo de producción de petróleo.* Guatemala.

Schenk, C. J., Brownfield, M. E., Charpentier, R., Cook, T., Klett, T., Pitman, J. K., Weaver, J.N. (2012). *Assessment of undiscovered, conventional oil and gas resources of Mexico, Guatemala, and Belize, 2012*. Estados Unidos de América: U.S. Geological Survey Fact Sheet.

SIB. (2010). *Sector hidrocarburos*. Guatemala: Superintendencia de Bancos.

Slatt, R. M. (2006). *Chapter 2 Tools and techniques for characterizing oil and gas reservoirs*. (R. M. Slatt, Ed.), *Stratigraphic Reservoir Characterization for Petroleum Geologists, Geophysicists, and Engineers* (Vol. 6). Elsevier. Recuperado de: https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S1567-8032(06)80037-6

Speight, J. (2005). *Handbook of Coal Analysis. Chemical Analysis*. Recuperado de: https://doi.org/10.1002/0471718513

Speight, J. G. (1998). *The Chemistry and Technology of Petroleum* (3rd ed.). New York: Marcel Dekker, Inc.

Tester, J. W., Drake, E. M., Driscoll, M. J., Golay, M. W. & Peters, W. A. (2012). *Sustainable energy: choosing among options* (2nd ed.). Cambridge, Mass: MIT Press.

Tewalt, S. J., Kinney, S. A. & Merril, M. D. (2008). *GIS Representation of Coal-Bearing Areas in North, Central and South America*. U.S. Geological Survey. Open-File Report 2008-125. Recuperado de: https://pubs.usgs.gov/of/2008/1257/

UPME. (2012). *La cadena del carbón*. Colombia: Unidad de Planeación Minero Energética, Ministerio de Energía y Minas. Recuperado de: http://www.upme.gov.co/Docs/Cadena_Carbon_2012.pdf

Ville, S., & Wicken, O. (2012). The dynamics of resource-based economic development : evidence from Australia and. *Industrial and Corporate Change*, *22*(5), 1341–1371. Recuperado de: https://doi.org/10.1093/icc/dts040

4

CAPÍTULO

RECURSOS ENERGÉTICOS RENOVABLES

4. Recursos energéticos renovables

Autores: Edgar E. Sacayón / Aída Lorenzo / Luis Polanco

4.1 Introducción

La energía renovable es aquella que se obtiene a partir de fuentes naturales e inagotables, por su abundante cantidad en la tierra o por su capacidad de regenerarse en la naturaleza en un corto período de tiempo. Las energías renovables no producen gases de efecto invernadero, principales causantes del efecto invernadero, ni emisiones contaminantes.

La energía renovable y los servicios que la energía proporciona han sido consideradas como una herramienta para el desarrollo sostenible (Farinelli, 1999), ya que se regeneran por medios naturales. Esta además, ayuda a mitigar los efectos del cambio climático (Sathaye *et al.,* 2011), al no producir gases de efecto invernadero (por ejemplo, dióxido de carbono). En Guatemala, país con mucha vulnerabilidad ante los efectos del cambio climático, la descentralización energética es uno de los medios para garantizar energía asequible, confiable y segura para la población de áreas rurales donde no existe conexión a la red de transmisión y distribución (Icefi, 2017).

El acceso a fuentes modernas de energía reduce la necesidad de fuentes energéticas ineficientes como la leña. En el aspecto económico, promueve la creación de empleo e incentiva a microempresas locales a proporcionar nuevos servicios. Adicionalmente, permite el acceso a servicios de iluminación, educación, salud e introducción de tecnologías apropiadas para la agricultura y acceso a agua potable.

A pesar de las oportunidades que la energía renovable proporciona en Guatemala, dos estudios recientes (Icefi, 2016 y 2017), demuestran la falta de inversión de recursos financieros para incentivar la descentralización energética y cerrar las brechas para la implementación de sistemas energéticos renovables para aquellos usuarios que no tienen acceso a la red eléctrica.

Por lo tanto, este capítulo presenta información sobre las fuentes energéticas renovables de Guatemala para incentivar la implementación de sistemas energéticos renovables; para ello, se han elaborado mapas de distribución de fuentes energéticas y también se presentan estimaciones del potencial energético del país.

Existen distintos tipos de energía renovable, como por ejemplo, solar, biomasa, eólica, hidráulica, geotérmica e hidroeléctrica, que se presentan a continuación.

4.2 Biomasa

4.2.1 Características

La biomasa se refiere a aquellos recursos que provienen de organismos vegetales producto del ciclo del carbón y desechos orgánicos de animales o seres humanos (Demirel, 2012; Tester *et al.,* 2012). La biomasa vegetal se produce cuando la energía del sol es capturada por el proceso de fotosíntesis y las moléculas de dióxido de carbono se transforman en compuestos orgánicos (por ejemplo carbohidratos) dentro de las plantas (Klass, 2004).

La eficiencia de captura de la energía solar en organismos vegetales ha sido estimada en 8-15%, pero bajo condiciones de campo se ha observado una eficiencia del 2% (Klass, 2004). Las fuentes más abundantes de biomasa vegetal provienen de los bosques que cubren la superficie de la Tierra; sin embargo, también pueden existir otras fuentes importantes de biomasa en el océano (Klass, 2004). La biomasa vegetal es considerada como un recurso renovable porque se regenera en escalas de tiempo adecuadas para su explotación por los seres humanos.

La energía de la biomasa puede ser obtenida a través de diferentes rutas y procesos (Lee, Speight & Loyalka, 2007). Un esquema de las rutas generales de transformación de biomasa se presenta en la figura 25 y comprende procesos térmicos, biológicos y físicos.

Entre los procesos de transformación térmicos más comunes está la combustión; sin embargo, también puede ser transformada en energía por pirólisis y por gasificación. La pirólisis es un proceso que transforma la biomasa en combustibles líquidos, gaseosos y sólidos por medio de calentamiento a altas temperaturas en ausencia de oxígeno. Uno de los combustibles más comunes que se obtiene por pirólisis es el carbón vegetal.

Por otro lado, la gasificación transforma la biomasa utilizando altas temperaturas en presencia de oxígeno en cantidades controladas y sin permitir la combustión. Este proceso produce un gas llamado singas o gas sintético (Lee *et al.,* 2007), que se usa como combustible para hacer girar una turbina que, conectada a un generador, produce energía eléctrica.

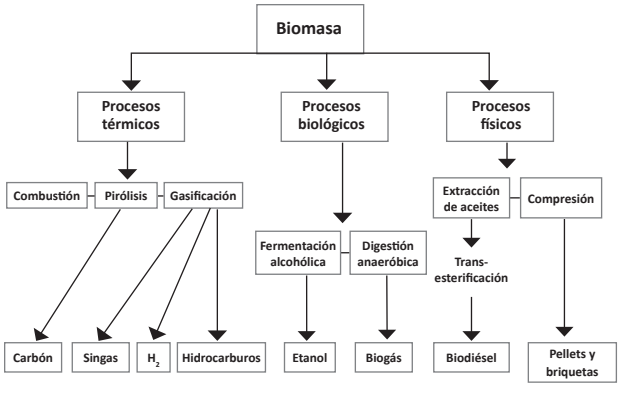
Las rutas de transformación bioquímica ofrecen la posibilidad de producir otro tipo de combustible. Por ejemplo, el etanol se obtiene por medio de la fermentación de azúcares, almidones o celulosas, con un posterior proceso de destilación.

Los desechos orgánicos de agroindustrias o de rellenos municipales también se pueden transformar en biogás por medio de digestión anaeróbica. Por otra parte, es posible degradar la celulosa vegetal por medio de procesos enzimáticos.

Por medio de métodos físicos (como la trituración y maceración de la biomasa) se pueden obtener aceites, los cuales se pueden transformar en biodiésel. La transesterificación es un proceso químico que elimina una molécula de glicerol de los triglicéridos, dejando disponibles únicamente ácidos grasos que pueden ser utilizados como combustibles. A pesar

de que el biodiésel de plantas tiene beneficios, existen argumentos que exhiben algunos problemas asociados a la degradación y cambio de uso del suelo, a monocultivos agresivos con el medio ambiente y a la competencia con cultivos de valor nutricional, que deben ser considerados en países en vías de desarrollo (Speight J. G., 2011). Por tal razón, es muy importante que cada país defina políticas ambientales y agrícolas para que la materia prima para la generación de biomasa no compita con los cultivos que forman parte de la alimentación de su población.

Figura 25. Rutas de aprovechamiento de la biomasa



Fuente: Elaboración propia

4.2.2 Potencial de biomasa forestal (leña) en Guatemala

En Guatemala, la leña es la fuente energética primaria con más demanda, según lo demuestran los balances energéticos (MEM, 2016). El alto consumo doméstico se debe a que, en el interior del país, el acceso a otras fuentes de energía es limitado (Olade, 2014). Adicionalmente, se estima que el 81% de los hogares guatemaltecos utilizan la leña en forma ineficiente (Olade, 2014).

La oferta y la demanda de leña en Guatemala han sido cuantificadas usando el modelo Wisdom[1] (Inab, Iarna-URL & FAO/GFP, 2012). Este modelo utilizó las siguientes capas de información geográfica a escala de 25 x 25 metros por pixel: a) cobertura forestal, b) pendientes, c) usos del suelo, d) áreas protegidas, y e) áreas legalmente accesibles. Con ello, se logró estimar la cantidad de biomasa aprovechable como combustible en el 2010 (Inab *et al.,* 2012).

Los resultados más relevantes de este estudio fueron los siguientes: a) el consumo de leña con fines energéticos en 2010 fue de 15.7 millones de toneladas métricas, de las cuales el 97% se utilizó para fines domésticos; b) la productividad anual sostenible de leña se estimó en 15.05 millones de toneladas, de las cuales el 56% estuvo física y legalmente disponible para su aprovechamiento; c) hubo un déficit de 5.7 millones de toneladas de leña, lo que indica una presión sobre los recursos forestales del país para satisfacer las demandas energéticas domésticas (Inab *et al.,* 2012).

Recientemente el Pronacom[2], en conjunto con Nama[3], ha dado marcha al programa para el uso eficiente de leña por medio de estufas mejoradas y la introducción de biodigestores en comunidades indígenas y rurales del país. Este programa se ha trazado metas para alcanzar a más de 1.1 millones de indígenas, creando 3,750 empleos directos y reduciendo más de 1.7 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO_2eq), en cinco años.

1 *Woodfuel Integrated Supply/Demand Overview Mapping.*

2 Programa Nacional de Competitividad de Guatemala

3 Programa de donaciones impulsado por países europeos para desarrollar acciones nacionalmente apropiadas para la mitigación al cambio climático.

4.2.3 Generación de electricidad con biomasa (cogeneración)

La cogeneración es el proceso por el cual se genera energía eléctrica y térmica a partir de fuentes de biomasa. Por lo general, se usan residuos agroindustriales como combustibles para la generación de energía térmica en calderas de vapor. En Guatemala, 13 ingenios cogeneran electricidad con biomasa de bagazo de caña. El vapor es utilizado en el proceso de fabricación de azúcar.

Siete de las plantas cogeneradoras alternan combustible entre búnker, carbón, chips de madera y el bagazo de caña, dependiendo de la disponibilidad y la época de zafra. El aporte a la matriz energética se ha estimado en 1,517 GWh anuales (CNEE, 2014).

Por lo general, los ingenios utilizan calderas de tipo acuotubular para generar vapor, el cual produce energía mecánica en turbogeneradores y genera energía eléctrica. Dos tecnologías son reportadas por Cengicaña (2015): turbinas de escape y de condensación. El bagazo de caña es el principal combustible. Este posee una humedad relativa promedio de 50%, lo que significa que la mitad del contenido de la biomasa es agua, mientras que la otra es fibra vegetal. La humedad relativa es importante, pues influye en la combustión.

El uso y distribución de la energía eléctrica de cada ingenio es distinta. En el ingenio Magdalena, por ejemplo, una parte de la electricidad producida es inyectada al ingenio a un voltaje de 12.5 kV para usos internos, mientras que la otra parte es inyectada al sistema nacional interconectado a 69 kV.

La tabla 10 presenta los ingenios azucareros cogeneradores de electricidad para Guatemala en el 2015.

Tabla 10. Cogeneradores con biomasa de bagazo de caña de azúcar en Guatemala (2015)

No.	Planta	Instalación	Tecnología	Combustible	Potencia		Generación				
					De placa (MW)	Efectiva (MW)	Anual total (GWh)	Venta al SNI	Factor de planta	Municipio	Departamento
1	**Magdalena**	Jan-94	TE, TC	Bagazo de caña	110.0	74.0	999.9	729.5	79 %	La Democracia	Escuintla
	Excedentes	Jan-06		Carbón	35.0	15.6					
				Búnker							
2	**Biomasa**	Jan-14	-	Bagazo de caña	119	114.7	-	-	-	La Democracia	Escuintla
3	**Pantaleón**	Jan-91	TE, TC	Bagazo de caña	60.0	46.5	386.9	227.7	54 %	Siquinalá	Escuintla
	Excedentes	Jan-05			22.0	21.5					
4	**La Unión**	Jan-95	TE, TC	Bagazo de caña	68.5	38.0	254.2	137.9	37 %	Santa Lucía Cotz.	Escuintla
	Excedentes	Jan-09		Búnker	10.0	5.6					
5	**Santa Ana**	Jan-95	TE, TC	Bagazo de caña	40.0	36.4	372.7	275.3	41 %	Escuintla	Escuintla
	Bloque 2	Jan-15		Carbón	64.2	57.6					
				Búnker							
				Chip							
6	**Madre Tierra**	Jan-96	TE, TC	Bagazo de caña	28.0	23.6	144.2	92.5	59 %	Santa Lucía Cotz.	Escuintla
				Búnker							
7	**Concepción**	Jan-94	TE, TC	Bagazo de caña	27.5	20.6	105.8	60.2	44 %	Escuintla	Escuintla
				Chip							
8	**Tululá**	Feb-01	TE, TC	Bagazo de caña	31.0	7.9	93.6	47	21 %	Cuyotenango	Suchitepéquez
	Tululá 4	May-13			19.0	9.5					
9	**Palo Gordo**	Nov-14	TE	Bagazo de caña	30.9	30.9	173.5	118.2	26 %		
	Bloque 2	Nov-15		Carbón	46.0	41.0					
10	**Trinidad**	Jan-11	TE, TC	Bagazo de caña	21.0	4.5	167.4	106.9	47 %	Masagua	Escuintla
	Trinidad 3	Oct-12		Carbón	19.8	20.3					
	Trinidad 4	May-15			46.0	41.1					
11	**San Diego**	Dec-04	TE, TC	Bagazo de caña	5.0	0.0	-	-	-	Escuintla	Escuintla
12	**El Pilar**	Mar-12	TE, TC	Bagazo de caña	10.5	3.5	-	-	-	San Andrés Villa Seca	Retalhuleu
	El Pilar 3	Mar-13			22.85	12.9					
13	**Santa Lucía**	Nov-14	TE, TC	Bagazo de caña	44	44	-	-	-	Santa Lucía Cotz.	Escuintla
					880.3	**669.7**	**2,698.2**	**1,795.2**			

Tecnología: TE = Turbinas de escape; TC = Turbinas de condensación

Fuente: AMM (2015), Cengicaña (2015)

4.2.4 Etanol

a) Características del etanol

El etanol es un biocombustible que se obtiene por la fermentación de azúcares que provienen de fuentes vegetales. Por lo general, el azúcar que se fermenta es una hexosa (seis carbonos) llamada sacarosa, presente en la caña de azúcar; pero también puede ser encontrada en otros cultivos como la remolacha o el maíz.

Otra ruta de obtención de etanol es por medio de la fermentación de almidones, que son cadenas más complejas de azúcares llamadas polisacáridos, los cuales se pueden encontrar en cereales como el trigo y tubérculos (papa o yuca).

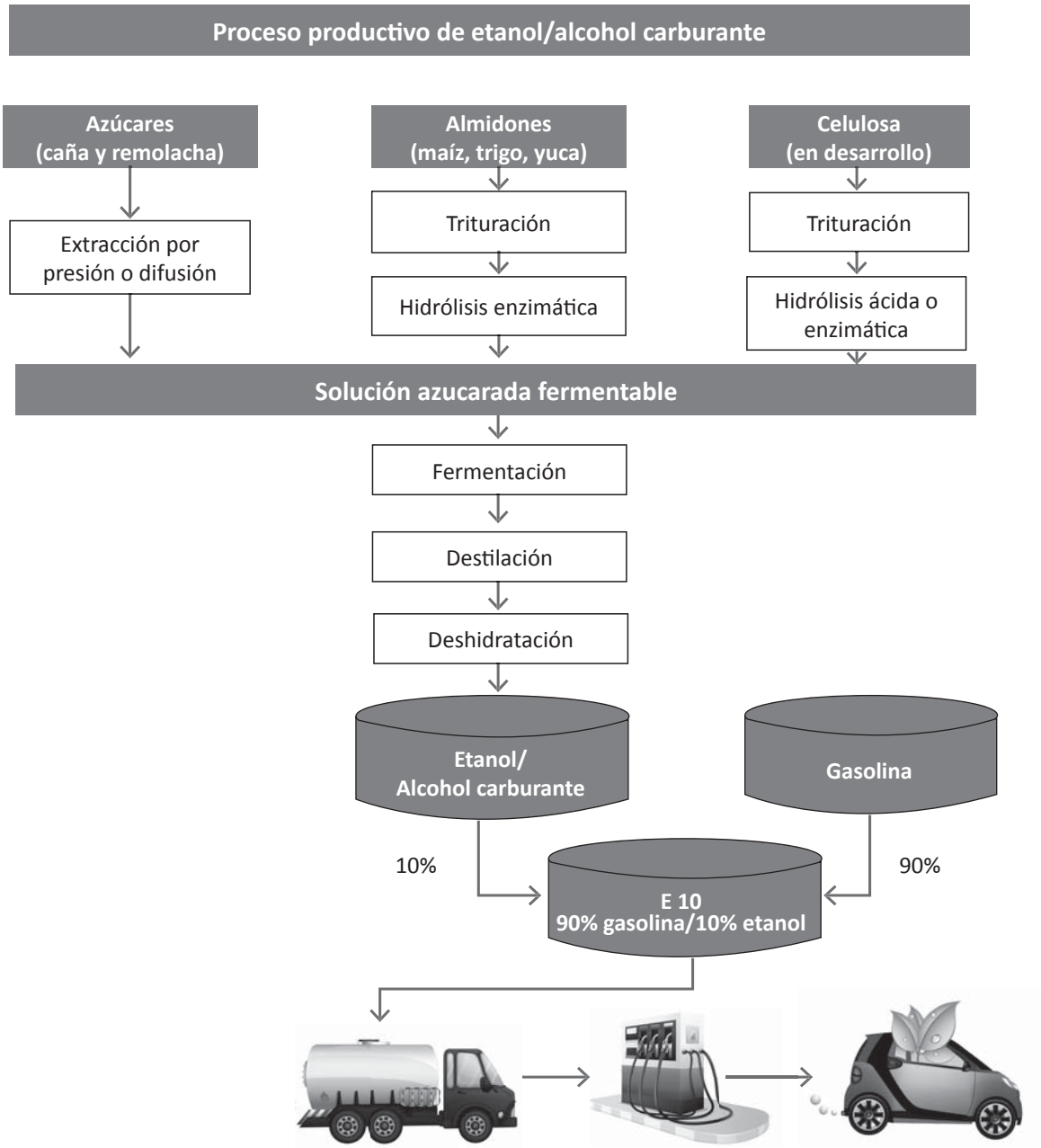
También se puede obtener etanol de la lignina presente en la madera y residuos agrícolas; sin embargo, la estructura cristalina compleja de la celulosa y la hemicelulosa, hace que los procesos de degradación de estas moléculas hacia azúcares simples sean energéticamente más costosos (Speight, 2011). El proceso de producción de etanol se presenta en la figura 26.

El etanol o alcohol etílico posee una fórmula molecular C_2H_6O, que puede ser utilizada como combustible en motores de combustión interna con ignición a chispa (ciclo de Otto) de dos maneras: 1) en mezclas de gasolina y etanol anhidro, o 2) como etanol puro, generalmente hidratado. El etanol tiene un poder calorífico de 28.255 kJ/kg y un octanaje RON de 102 a 130 (Horta, 2008).

El etanol puede ser anhidro cuando el contenido de agua es menor del 0.7%. Cuando el contenido de agua llega a un 9%, este es denominado como hidratado. Si el etanol es utilizado en motores de combustión con mezclas de gasolina, el contenido de agua debe ser menor que el 0.4%. Él etanol hidratado puede ser usado como carburante en motores diseñados para este tipo de biocombustible (Solano, 2009).

Cuando se utiliza el etanol con una mezcla menor al 10%, es decir E10, el etanol que se debe utilizar es anhidro o deshidratado para que sea mezclado con la gasolina. Las experiencias internacionales han demostrado que el E10 puede ser utilizado en vehículos sin necesidad de hacer modificaciones a los mismos, ya que las condiciones de rendimiento permanecen iguales.

Figura 26. Proceso de producción de etanol



Fuente: Asociación de Combustibles Renovables de Guatemala, ACRG (2017)

b) Producción de etanol en Guatemala

En Guatemala, existen cinco destilerías que producen etanol y usan como materia prima la melaza, subproducto de la industria azucarera. Es decir, que con la misma área sembrada de caña se produce azúcar, melaza, etanol y energía. De los países centroamericanos, Guatemala es el productor más eficiente y dominante de azúcar. Además, es el cuarto proveedor mundial, posición que ha adquirido impulsado por la industria (B. Solomon & Bailis, 2014).

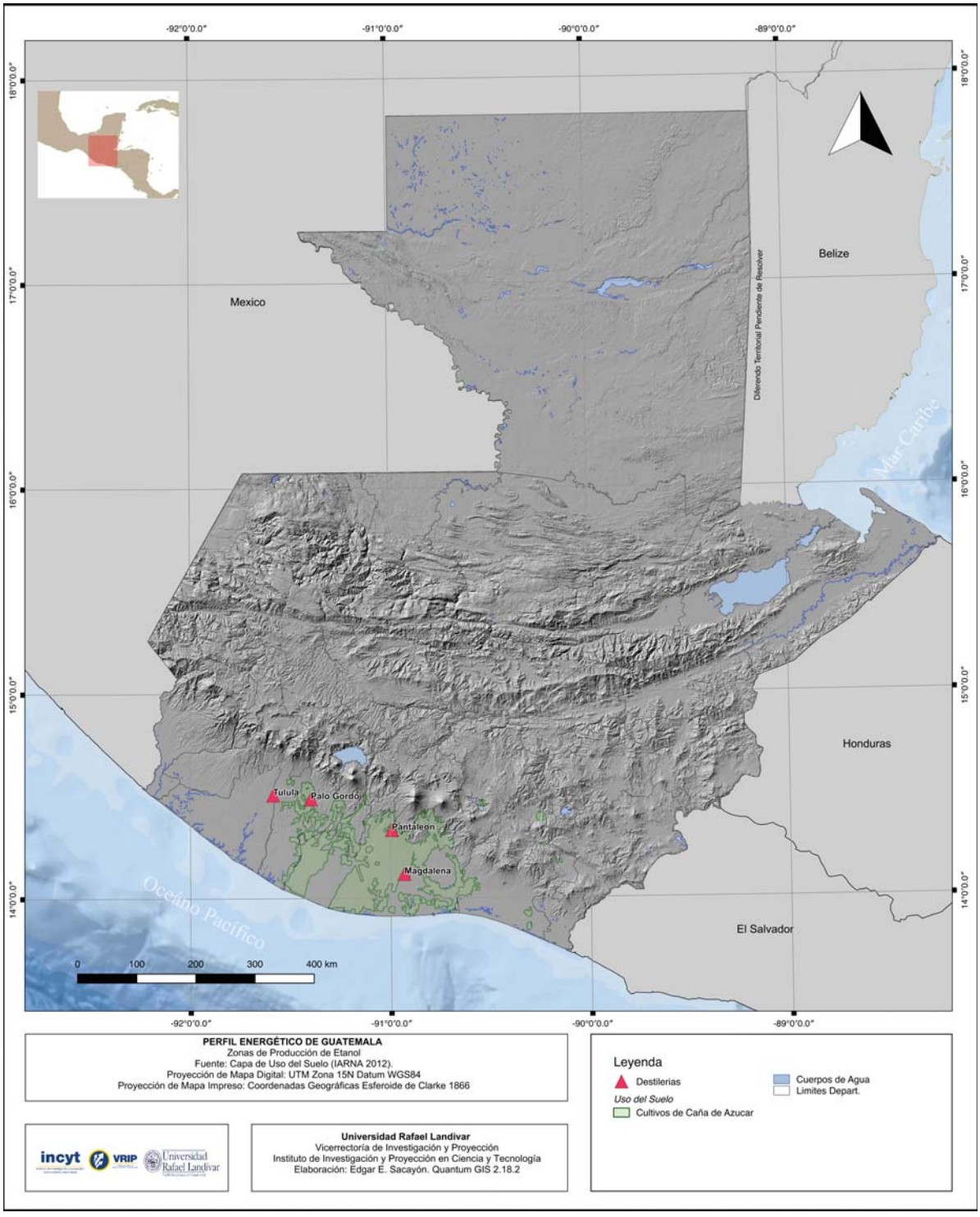
La capacidad instalada de etanol en Guatemala se estima en 1,390,000 litros al día (tabla 11), y una capacidad anual de 250 millones de litros al año, tomando en cuenta que únicamente una destilería trabaja todo el año y las otras solamente en tiempo de zafra (de noviembre a mayo). La industria nacional produce tres tipos de alcohol: industrial, potable y carburante (etanol). De la producción nacional, el 80% es exportada a Europa y Estados Unidos, principalmente. El 20% de la producción que se queda en el país es básicamente utilizado por la industria de bebidas (ACRG, 2017). El mapa 6 presenta la ubicación de las plantas de etanol en Guatemala.

Tabla 11. Capacidad instalada de producción diaria de etanol en litros

Destilería	Capacidad instalada (l/día)
MAG Alcoholes	300,000
Servicios Manufactureros	120,000
Palo Gordo	120,000
Bio Etanol S.A.	600,000
DARSA	250,000
Total	**1,390,000**

Fuente: ACRG (2017), García (2010), SIB (2011), Solano, (2009)

Mapa 6: Ubicación de las plantas de producción de etanol en Guatemala



Fuente: Elaboración propia con capa del larna de uso del suelo (2012)

En Guatemala, a diferencia de otros países como Brasil, como primer proceso se produce azúcar y luego con la melaza el etanol. En Brasil por su parte, la cantidad de etanol y azúcar producidos anualmente dependen de variables económicas; los ingenios deciden qué productos tienen más rentabilidad según los precios del mercado interno y externo (Tomei & Diaz-Chavez, 2014).

En nuestro país, el marco legal referente al etanol está vigente, pero es inoperante. La Ley del Alcohol Carburante (Decreto 17-85) indica, en el artículo 5, que toda la gasolina en el país debería contener al menos 5% de etanol; sin embargo, esta ley no se puede implementar. Es necesario reformar dicha ley para que se actualice a las condiciones del mercado actual y que se pueda realizar la mezcla en diferentes porcentajes de alcohol con la gasolina. Sin embargo, esta ley no ha podido ser actualizada debido, en parte, a barreras políticas por falta de apoyo de actores clave y por la influencia de importadores de petróleo (Tomei & Díaz-Chávez, 2014). Tanto la industria como el gobierno deben asegurarse de que se desarrolle un marco legislativo que garantice la sostenibilidad de la producción de biocombustible. De lo contrario, los impactos negativos pueden ser más dañinos que los beneficios (Tomei & Díaz-Chávez, 2014).

En el 2015 el Ministerio de Energía y Minas, con fondos de cooperación de la Organización de los Estados Americanos (OEA), llevó a cabo el "Plan piloto para la mezcla de alcohol carburante en la gasolina en Guatemala". El objetivo de este proyecto fue utilizar varias mezclas de etanol en las gasolinas en una serie de vehículos y evaluar algunas variables ambientales, mecánicas, logísticas y de desempeño. Las mezclas utilizadas fueron E5, E7 y E10. Fueron elegidos 25 vehículos representativos del parque vehicular de Guatemala con gasolina superior; el proyecto fue dividido en tres periodos de tiempo: tres meses con mezcla E5, un mes con mezcla E7 y dos con mezcla E10.

Las instituciones públicas que participaron con sus vehículos fueron el Ministerio de Energía y Minas, el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, el Ministerio de Finanzas Públicas y la Municipalidad de Guatemala. De las empresas e instituciones privadas participaron las siguienes: Empresa Eléctrica de Guatemala, DHL, Claro, Fundación Solar y personas individuales. La Universidad del Valle realizó las mediciones en los vehículos con las diferentes mezclas de etanol en la gasolina.

Los resultados del estudio piloto demostraron que no se presentaron desperfectos de funcionamiento en los vehículos de la muestra con las mezclas E5, E7 y E10. Con las mediciones de un dinamómetro se determinó un aumento en la potencia y el torque de los vehículos usando todas las mezclas. También se comprobó que el uso del etanol aumentó el octanaje de la gasolina, por ejemplo el uso de mezclas E10 aumentó hasta tres números de octanaje la gasolina. La evaluación de emisiones reflejó claramente una disminución significativa de todos los parámetros evaluados (NO, SO_2, CO, HC). El uso de mezclas E10 redujo las emisiones de monóxido de carbono en un promedio de 79%; óxido nitroso en 95% e hidrocarburos y dióxido de azufre en un 89%.

Esto evidencia que las mezclas de etanol con gasolina contribuyen a la reducción de emisiones de gases de

efecto invernadero y, al mismo tiempo, influyen en una mejor calidad del aire.

4.2.5 Biodiésel

a) Características del biodiésel

El biodiésel es un biocombustible líquido compuesto en su mayor porcentaje de esteres alquílicos de ácidos grasos que se obtienen de aceites vegetales o grasas animales. Casi todos los aceites vegetales están compuestos en un 90-98% de triglicéridos y pequeñas porciones de mono y diglicéridos, ácidos grasos libres, esteroles, fosfolípidos y otras impurezas (Speight, 2011). Los triglicéridos se transforman en biodiésel por medio de una reacción de transesterificación. Esta reacción involucra metanol y un catalizador (NaOH o KOH), para romper el triglicérido y obtener esteres alquílicos de ácidos grasos. Como subproducto se obtiene glicerol, comúnmente llamado glicerina (Speight, 2011).

La composición de ácidos grasos del aceite depende de la especie vegetal de la que provienen. Por ejemplo, el aceite de oliva tiene un 75% de ácido oleico (C18:1), mientras que el de girasol tiene un 72% de ácido linoleico (Speight, 2011). El aceite de palma africana tiene un 40% de ácido palmítico y 40% de ácido oleico; mientras que el aceite de *Jatropa gurcas* tiene un 44% de ácido oleico y 32% linoleico. Las características físicoquímicas del biodiésel están determinadas por la composición de ácidos grasos, del aceite vegetal usado como materia prima en la reacción de transesterificación (Knothe & Gerpen, 2010). Una de las características más importantes es la viscosidad, ya que determina su comportamiento en los motores de combustión interna (Speight, 2011). Por ejemplo, una alta viscosidad en el biodiésel reduce la capacidad de atomización en los inyectores de combustible y, por ende, disminuye su rendimiento.

b) Producción de biodiésel en Guatemala

En Guatemala, la producción de biodiésel es muy reducida y no existe la producción a escala industrial. Una de las razones es que los costos de fabricación de biodiésel no son competitivos con los precios del diésel, por lo tanto, no es rentable. Se reportan únicamente dos empresas que fabrican biodiésel a partir de aceite reciclado de frituras para autoconsumo y lo mezclan en la flotilla de vehículos.

Adicionalmente, la Universidad del Valle de Guatemala tiene una planta de biodiésel en sus instalaciones que utiliza para fines académicos, por ejemplo, en la caldera del laboratorio, el vehículo experimental (B100) y en el STEAM Truck (B25).

Por otro lado, está el proyecto "Reciclaceite" de la Municipalidad de Guatemala, que recolecta aceite reciclado en mercados municipales, hoteles y restaurantes de la ciudad y luego lo envía a la Universidad del Valle de Guatemala para su transformación en biodiésel, el cual es utilizado posteriormente en vehículos municipales en mezclas B25.

Las microalgas también han sido propuestas como materia prima para la producción de aceite para

biodiésel (Chisti, 2007). Debido a esto, investigadores del Instituto de Recursos Energéticos de la Universidad Galileo de Guatemala realizaron un estudio del potencial de varias especies de microalgas del lago de Amatitlán para producir biodiésel (Díaz Cabrera, 2011).

El equipo de investigación identificó, aisló y cultivó las especies de microalgas del lago en condiciones de laboratorio. La biomasa de las especies cultivadas se analizó para determinar el perfil de ácidos grasos de cada especie. Con base en su estudio, se determinó que las algas *Chlorella sp.* y *Monoraphidium griffithii* mostraban un perfil de ácidos grasos apropiado para la producción de aceite. Estos aceites poseen un alto contenido de ácidos grasos monoinsaturados (Díaz Cabrera, 2011).

Además, se analizó la biomasa de la superficie del lago de Amatitlán compuesta en casi su totalidad por la cianobacteria *Microcystis aeruginosa*. Debido a su alto contenido de ácidos grasos saturados no es adecuada para la extracción de aceite para biodiésel. Los investigadores concluyeron que el elevado consumo energético (455.98 kWh) y el elevado costo económico (Q 570.00) para producir 5 gm de aceite, a partir de *Chlorella sp.* y *Monoraphidium griffithii*, no hace factible que se realice la producción de biodiésel a partir de microalgas en Guatemala.

4.2.6 Biogás

a) Características del biogás

El biogás es un combustible gaseoso producido por la digestión anaerobia de desechos orgánicos que pueden provenir de estiércol animal, rellenos sanitarios o cualquier otra fuente de residuos orgánicos (Speight, 2011).

La digestión anaerobia es un proceso natural de descomposición de la materia orgánica realizado por microorganismos en cuatro etapas: 1) hidrólisis, 2) acidogenésis, 3) acetogénesis y 4) metanogénesis (Speight, 2011).

Durante la hidrólisis, bacterias hidrolíticas rompen moléculas orgánicas complejas en azúcares (Speight, 2011). En la acidogenésis, bacterias fermentadoras convierten los azúcares en ácidos orgánicos. En la etapa de la acetogénesis, los ácidos orgánicos son transformados por otros microorganismos en hidrógeno, dióxido de carbono y acetato. Por último, bacterias metanogénicas producen metano a partir del acetato.

Como productos de la digestión anaerobia se obtienen el biogás, materia digerida (también conocida como digestato) y dióxido de carbono. Dependiendo de la biomasa original, la composición de biogás puede variar, pero en su mayor porcentaje se compone de metano (alrededor del 60%), luego dióxido de carbono e hidrógeno.

b) Potencial energético del biogás en Guatemala

No se ha estimado el potencial de producción de biogás a partir de desechos orgánicos de rellenos sanitarios y de industrias pecuarias en Guatemala. Sin embargo, Koberle, (2012) realizó un estudio sobre desarrollo alternativo de energía y estima que

la generación de energía en rellenos sanitarios podría representar oportunidades económicas para las municipalidades. El mismo indica, por ejemplo, que en Guatemala se producen más de 8 millones de toneladas métricas de desechos sólidos anualmente. De este total, la ciudad capital produce el 72%, con lo que potencialmente podría producir 4 MW; el basurero de Villa Nueva recibe un estimado de 300 toneladas métricas al día, con lo que podrían producir 1 MW de energía eléctrica (Koberle, 2012).

En Quetzaltenango, Huehuetenango y Puerto Barrios, se reportan 80, 15 y 13 toneladas al día de desechos sólidos que ingresan a los rellenos sanitarios de cada ciudad; lo cual las perfila como potenciales candidatos a producir energía. Los costos capitales y operativos de plantas de biogás en rellenos sanitarios también fueron estudiados por el autor, y este concluyó que dichas plantas podrían representar negocios favorables para las municipalidades de las ciudades mencionadas (Koberle, 2012).

c) Plantas de biogás en Guatemala

Las plantas industriales de producción de energía a partir de biogás en Guatemala son muy escasas. El AMM (2016a) únicamente reporta tres que son consideradas como GDRs[4]: InBio genera electricidad usando el metano producido en el vertedero municipal de la ciudad de Guatemala y cuenta con cuatro motores reciprocantes Jenbacher Tipo-3 de 1.06 MW cada uno, para proporcionar una capacidad instalada de 4.24 MW. Estos motores son fabricados en Austria y configurados en Italia para producir electricidad, aunque también pueden ser configurados en ciclos combinados con energía térmica. La eficiencia reportada en estos sistemas es de 47.8%[5].

Gabiosa es una planta de biogás ubicada en La Gomera, Escuintla, que genera biogás a partir de desechos residuales de la extracción de aceite de palma africana. La planta cuenta con una geomembrana para la captura de metano; un filtro elimina los altos niveles de ácido sulfhídrico que son comunes de encontrar en el biogás debido a las características de los efluentes de la planta de procesamiento de palma africana. El biogás se quema en una turbina de 1 MW, la cual produce electricidad.

En la destilería Mag Alcoholes se usa la vinaza, un subproducto de la producción de etanol, para producir un aproximado de 500,000 m^3 de biogás. Este biogás es quemado en calderas para la producción de energía térmica, la cual es usada en procesos industriales para poder sustituir combustibles fósiles.

4.3 Energía solar

4.3.1 Características de la energía solar

La energía solar es la fuente primaria de todas las demás formas de energía en este planeta, a excepción de la energía geotérmica, nuclear y mareomotriz. La energía solar es el resultado de la fusión termonuclear

4 Generación Distribuida Renovable, GDR, son plantas que generan energía en el punto de consumo. En Guatemala la mayoría de plantas arriba de los 5MW venden energía a la red del sistema nacional interconectado.

5 www.clarke-energy.com/gas-engines

de átomos de hidrógeno (H), que se transforman en helio (He) en el Sol (Tester *et al.,* 2012). Esta reacción produce una energía térmica que, en total, equivale a 6,000 °C y cuya radiación viaja hasta la Tierra; sin embargo, debido a la interacción con diferentes moléculas presentes en la atmósfera, no toda la energía llega a la superficie del planeta (Tester *et al.,* 2012).

La mayor parte de la radiación ultravioleta de onda corta (λ <0.4 μm) es absorbida por oxígeno (O_2), ozono (O_3) y nitrógeno (N_2); mientras que longitudes de onda más largas (λ <0.6 μm) las absorbe el agua y el dióxido de carbono (CO_2). En total, la energía que llega a la atmósfera del planeta ha sido estimada en 1,354 W/m^2, pero debido a condiciones climáticas, ciclos estacionales y diferencias latitudinales, solo el 21% llega a la superficie de la tierra. Otro 29% llega como luz dispersa (Tester *et al.,* 2012).

A pesar de la ubiquidad de la energía solar en el planeta, su variabilidad y baja densidad energética presenta dificultades técnicas para su explotación. La energía solar directa que llega a la superficie del planeta puede ser concentrada usando espejos o lentes, mientras que la energía solar difusa, la que rebota de las superficies del planeta, no puede ser concentrada. A continuación, se presentan las tecnologías que aprovechan la energía solar directa en la superficie de la Tierra. Específicamente, se describen: a) sistemas solares térmicos, b) sistemas solares por concentración y c) sistemas solares fotovoltaicos.

a) Sistemas solares térmicos

La energía solar incidente en la superficie de la Tierra puede ser aprovechada de diferentes maneras usando una variedad de tecnologías. En edificios, los sistemas solares pueden ser pasivos o activos. Los pasivos usan el diseño estructural del edificio y la energía del sol para regular la temperatura en él, iluminar espacios o calentar agua. Los sistemas activos usan dispositivos externos para recolectar la energía solar y distribuirla con sistemas de calefacción de aire o agua.

La industria de los calentadores solares para aire y agua está bien desarrollada y su aplicación es bastante popular para usos residenciales. En Guatemala, varias empresas ofrecen el servicio de instalación de calentadores de agua. Su popularidad radica en los beneficios económicos debido a la reducción de la factura de electricidad o del gas, anteriormente usados para el calentamiento de agua. Los sistemas de calefacción de aire tienen aplicaciones industriales. En Guatemala, Alimentos Campestres S.A. utiliza energía solar (figura 27) para una planta de deshidratación de frutas y vegetales, basado en los principios de convección de calor. Dicha planta se encuentra ubicada en el departamento de El Progreso, una de las regiones más áridas de Guatemala.

Figura 27. Planta de deshidratación de frutas, ubicada en el departamento de El Progreso

Fuente: Alimentos Campestres S.A.

b) Sistemas solares por concentración

La energía solar por concentración (CSP, por sus siglas en inglés), utiliza una serie de dispositivos ópticos para concentrar la radiación solar en un punto y calentar un fluido de trabajo, el cual puede alcanzar temperaturas que oscilan entre 400 y 1,000 ºC (Tester *et al.,* 2012). La tecnología ha sido desarrollada y utilizada a gran escala para la generación de energía eléctrica o térmica a escala industrial. Debido a sus particularidades, la tecnología CSP es rentable en lugares del planeta donde la calidad de la radiación solar es mayor, esto es cerca del ecuador y áreas donde la nubosidad anual es mínima.

Existen tres tipos de tecnología de energía solar por concentración: torre central, captadores cilíndricos y platos parabólicos. La tecnología de torre central usa una serie de espejos planos (heliostatos) para dirigir la luz solar hacia un receptor en una torre donde circula un fluido de trabajo. Por lo general, el fluido puede estar compuesto por sales de nitrato, el cual circula por un sistema de intercambio de calor para producir vapor y generar electricidad en una turbina eléctrica. El excedente de calor en las sales puede ser almacenado en tanques especiales para cuando la radiación solar disminuye y, de esta manera, mantener constante la generación de energía eléctrica.

Los captadores cilíndricos usan espejos cóncavos en serie para concentrar la luz en el punto focal, donde atraviesa una tubería con el fluido de trabajo (agua o aceite) y que lleva a una turbina de vapor que genera electricidad. Todos los sistemas CSP utilizan algún mecanismo de rastreo del sol automatizado que permite que los concentradores solares aprovechen al máximo la energía durante el día.

El sistema de plato parabólico consiste en espejos cóncavos que concentran la radiación solar en un solo punto ubicado al centro, el cual se calienta hasta 650 °C. Al igual que las dos tecnologías descritas anteriormente, el líquido calentado sirve para la generación de electricidad.

c) Sistemas solares fotovoltaicos

Los sistemas fotovoltaicos (PV) usan el efecto fotoeléctrico en materiales semiconductores para convertir la energía lumínica en energía eléctrica (Tester *et al.,* 2012). Esta tecnología fue desarrollada durante la carrera espacial en los años 60. A la fecha, se distribuyen en el mercado paneles de silicio cristalino y amorfo, de celdas CIGS (Cobre, Indio, Galio y Selenio) y celdas de Cadmio-Telurio (CdTe).

La tecnología dominante en paneles solares está basada en los paneles de silicio cristalino. Los paneles de cristales de silicio alcanzan eficiencias más altas, pero sus costos son más elevados que los paneles policristalinos. Por otro lado, los paneles de silicio amorfo (*a*-silicio) ofrecen un menor costo de producción; sin embargo, su eficiencia es mucho menor y se reduce con el tiempo de operación. La alternativa tecnológica para superar estos obstáculos ha sido el desarrollo de paneles de CIGS, los cuales presentan propiedades ópticas similares a los paneles de *a*-silicio y eficiencias del 20% (Tester *et al.,* 2012).

No obstante, la producción con estos materiales requiere condiciones de manufactura similares a las utilizadas en la elaboración de chips de computadoras (Tester *et al.,* 2012). Además, la extracción de minerales preciosos como zinc, indio, cadmio y cobre necesarios para la manufactura; ejercen una presión muy fuerte sobre el medio ambiente debido al proceso de extracción minera y a la etapa de descarte. Aunque la tecnología de CdTe presenta estos problemas, tiene la ventaja de que, desde el punto de vista de su ciclo de vida, cuenta con la huella de carbono y agua más bajos de todas las tecnologías solares. La alta toxicidad del cadmio puede ser superada por el reciclaje de los módulos al finalizar su periodo de vida.

4.3.2 Potencial solar de Guatemala

El potencial de energía solar de un día promedio en Guatemala ha sido estimado en 5.3 kWh/m^2/día. El potencial de generación con energía solar total aún no ha sido estimado, pero podría superar los 10 GWh anuales. Los mapas de potencial solar en Guatemala (mapas 7, 8 y 9) fueron estimados mediante un modelo de energía solar desarrollado por el Laboratorio de Energía Renovable de Estados Unidos (NREL), y el proyecto Swera *(Solar and Wind Energy Resource Assessment)*. Estas agencias usaron información de satélite y modelos climáticos globales de varios años, y así estimaron el potencial solar para Guatemala (Bons, 2005).

El modelo de energía solar considera variables como irradiación visible, vapor de agua, gases atmosféricos y concentración de aerosoles en la atmósfera; además usa datos promedio de irradiación directa normal, irradiación global horizontal e irradiación difusa, basado en registros de 1998 a 2002 de los satélites Goes *(Geostationary Operational Environmental Satellite)*, (Aguilar, 2015).

La irradiación global horizontal (IGH) es una medida de la cantidad de energía solar incidente, que tiene un ángulo horizontal de cero grados, sumando

tanto los componentes directos y difusos de la luz (Aguilar, 2015).

Para corroborar los datos se usaron otras estaciones meteorológicas: La Aurora, Huehuetenango y Flores. De esta forma, se llegó a establecer un porcentaje de error del 12% (Aguilar, 2015)[6].

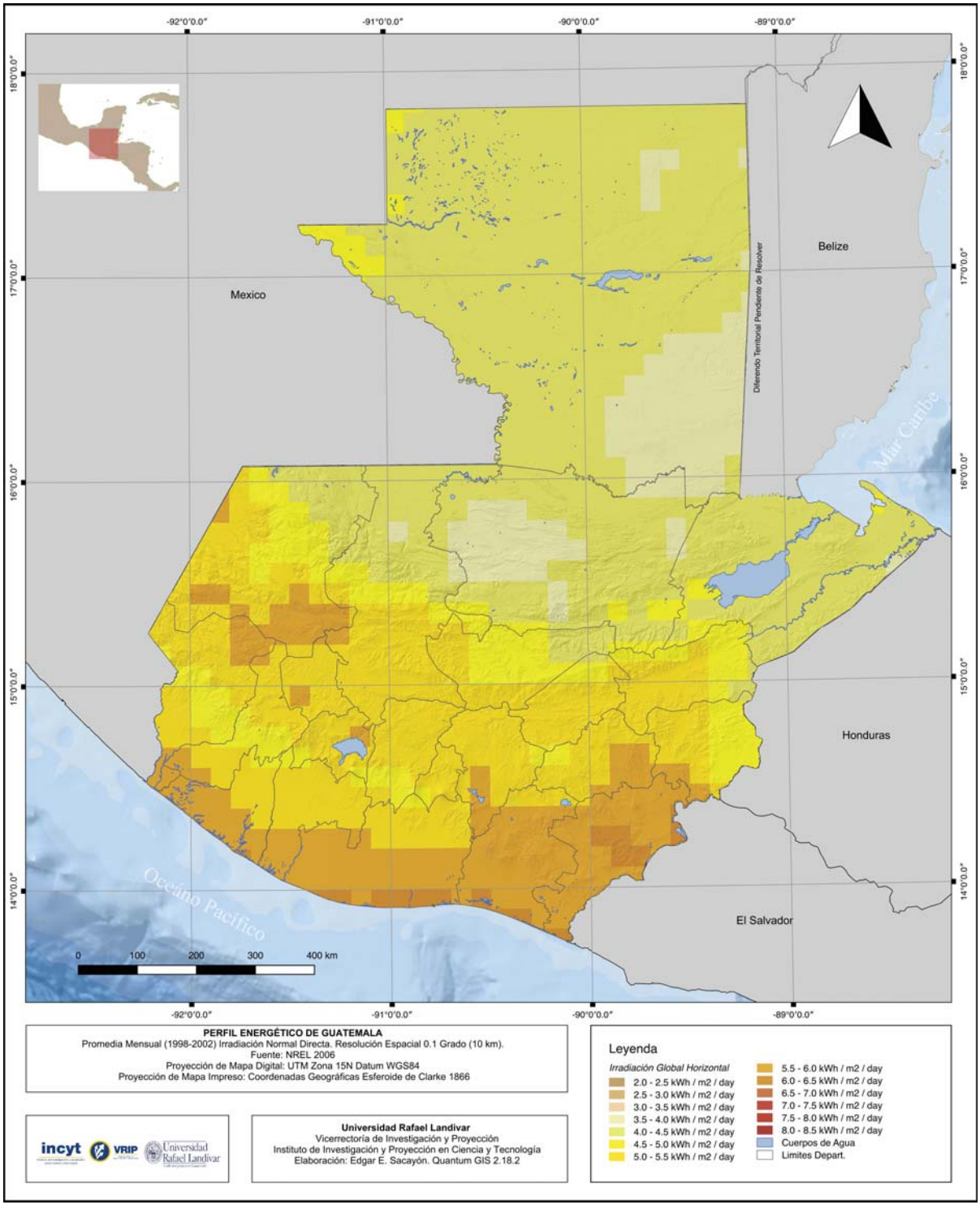
Los mapas de potencial solar de Guatemala (mapas 7, 8 y 9) presentan la irradiación solar (directa, global horizontal y difusa) para un año típico, y pueden ser utilizados para el diseño de sistemas solares fotovoltaicos, sistemas solares térmicos y sistemas solares por concentración. Para la tecnología CSP que utiliza mecanismos de rastreo del sol, los recursos solares deben ser descritos mediante mapas de irradiación normal directa (mapa 7).

Para los sistemas solares orientados horizontalmente a la superficie de la Tierra, el potencial solar se describe con mapas de irradiación global horizontal (mapa 8).

Debido a que los paneles PV y sistemas solares térmicos se diseñan y se instalan con un ángulo de inclinación para compensar por la latitud del planeta en la que son colocados, el potencial se describe con el potencial solar con inclinación (mapa 9).

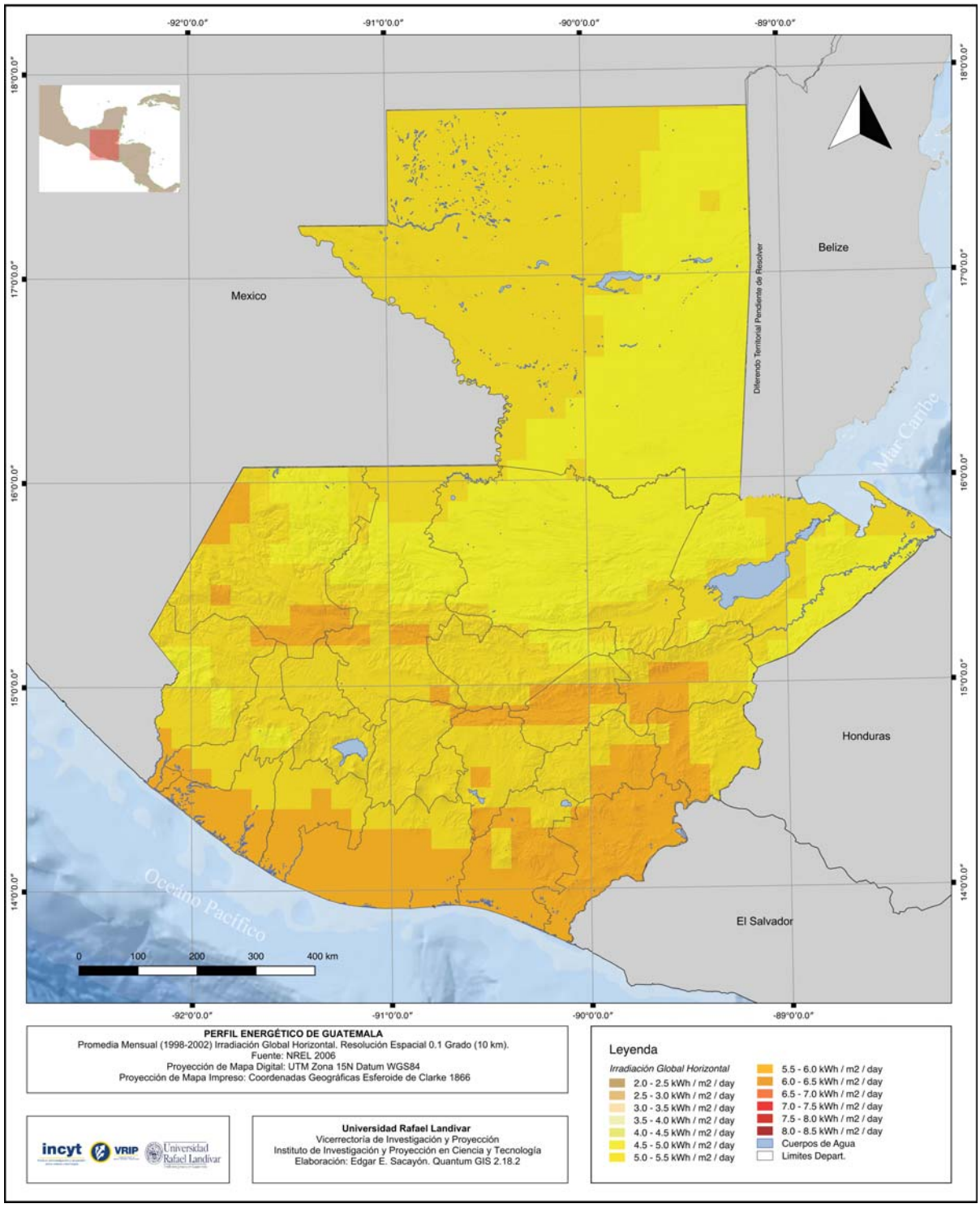
6 La información descrita anteriormente es de dominio público y puede ser obtenida en los sitios de internet de OpenEI: www.en.openei.org/wiki/SWERA

Mapa 7: Potencial solar promedio anual, por irradiación normal directa en Guatemala



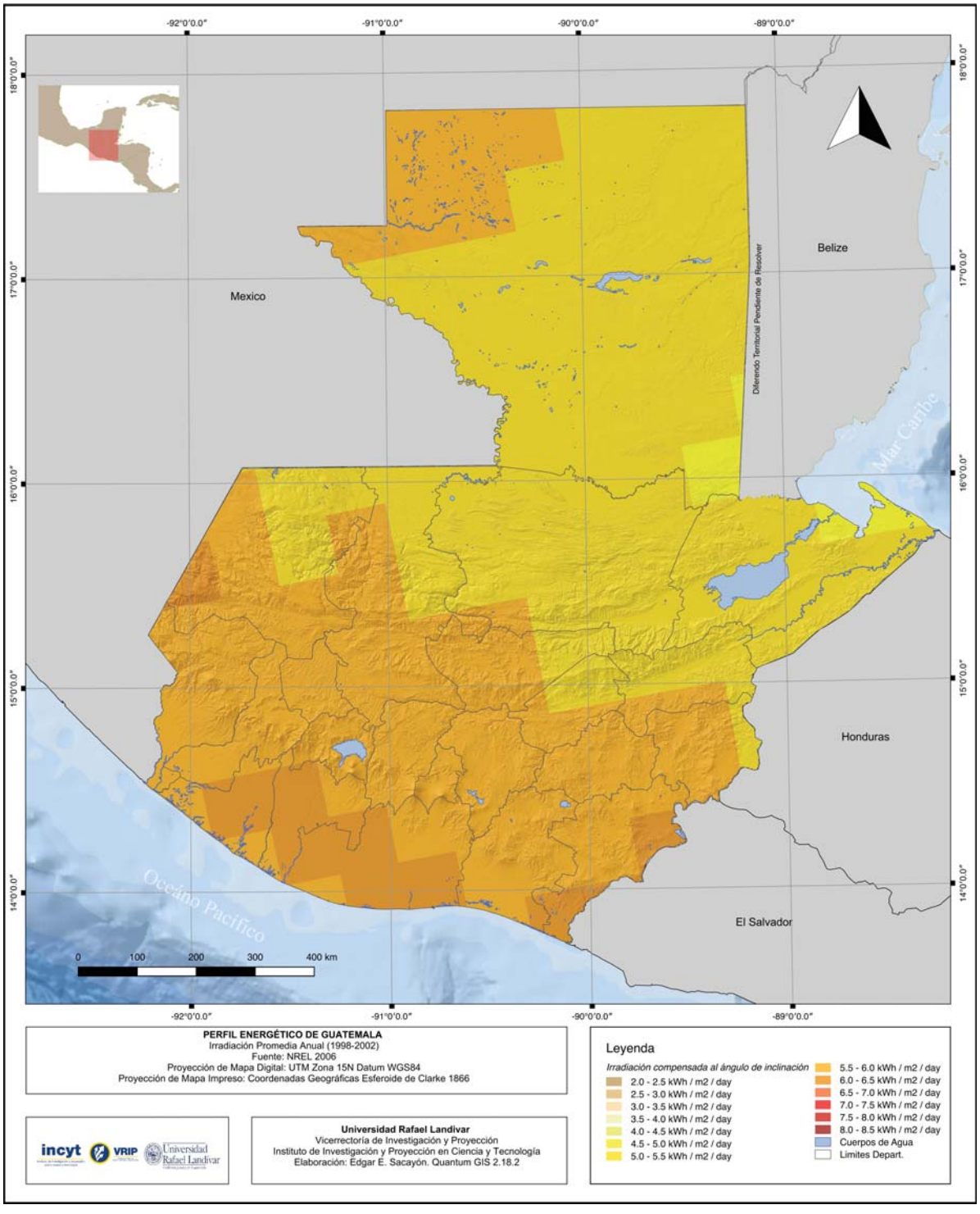
Fuente: NREL-Swera (2005)

Mapa 8: Potencial solar promedio anual, basado en la irradiación horizontal global



Fuente: NREL (2006)

Mapa 9: Potencial solar promedio anual por irradiación compensada con ángulo de inclinación



Fuente: NREL (2006)

4.3.3 Generación de electricidad con energía solar

En Guatemala, todas las plantas solares que generan energía eléctrica por encima de los 5 MW son consideradas como "Plantas generadoras" dentro del Administrador del Mercado Mayorista (AMM). Las plantas con una capacidad menor o igual a los 5 MW, son consideradas como Generación Distribuida Renovable (GDR)[7]. Ambos esquemas suministran energía eléctrica a la red del Sistema Nacional Interconectado (SIN). Un tercer esquema de producción es el de Usuarios Autoproductores con Excedentes de Energía[8] (UAEE), en el cual se encuentran, por lo general, usuarios domésticos e industriales con paneles solares integrados en edificios y fábricas. Un listado no exhaustivo de generadores con energía solar se presenta en la tabla 12 y el mapa de ubicación de las plantas se muestra en el mapa 10.

Tabla 12. Plantas de energía solar en Guatemala en 2016

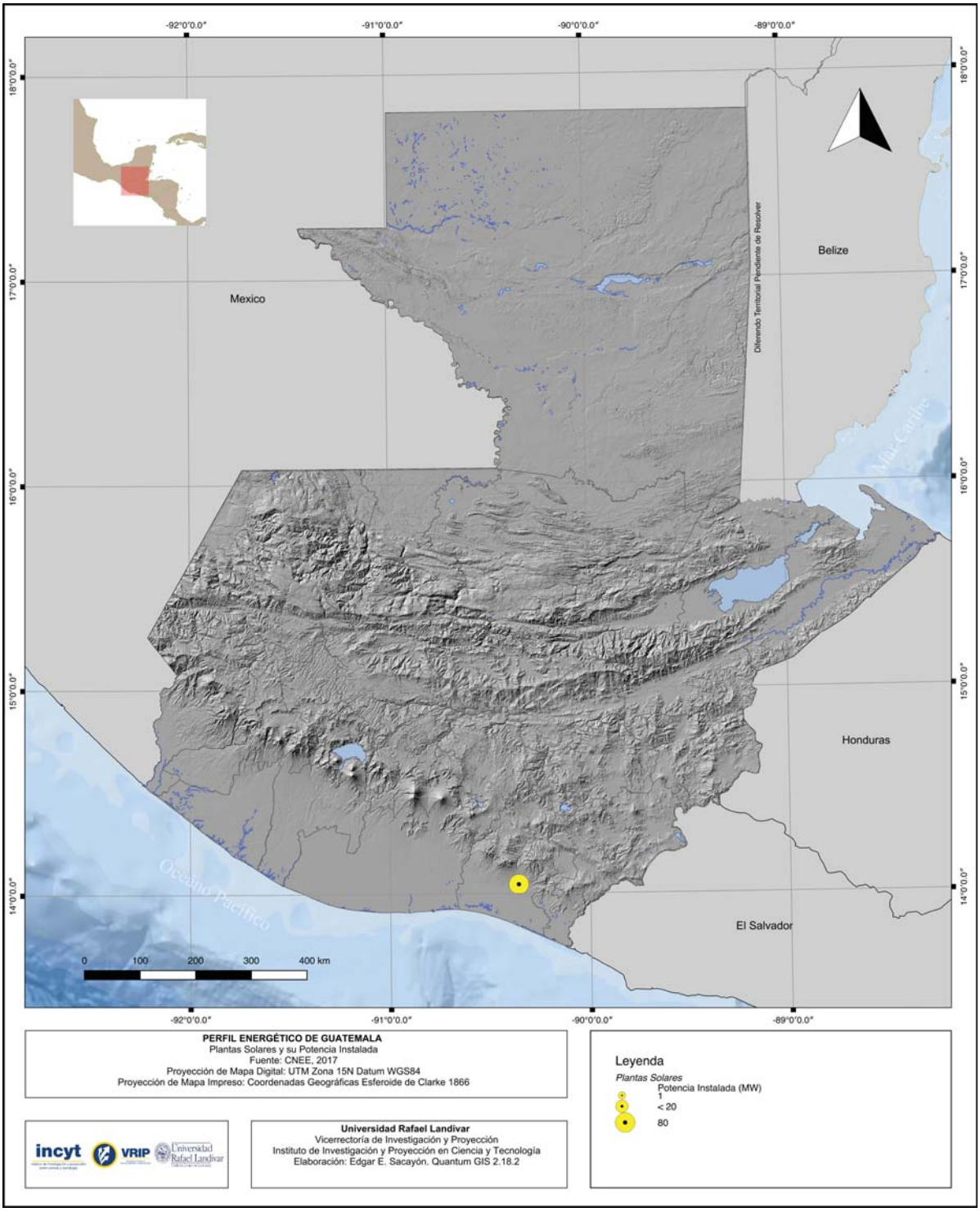
Planta	Empresa	Fecha de instalación	Potencia de placa (MW)	Municipio	Departamento
Horus 1	Anacapri S.A.	Feb-15	50.0	Chiquimulilla	Santa Rosa
Horus 2	Anacapri S.A.	Jul-15	30.0	Chiquimulilla	Santa Rosa
Sibo S. A.	Sibo S. A.	Jul-14	5.0	Estanzuela	Zacapa
Solaris 1	Empresa Generadora de Energía Limpia		2.5	Jutiapa	Jutiapa
El Jobo	Tuncaj S.A.	Mar-17	1.0	Taxisco	Santa Rosa
La Avellana	Tuncaj S.A.	Mar-17	1.0	Taxisco	Santa Rosa
Taxisco	Tuncaj S.A.	Mar-17	1.5	Taxisco	Santa Rosa
Pedro de Alvarado	Tuncaj S.A.	Mar-17	1.0	Moyuta	Jutiapa
Buena Vista	Tuncaj S.A.		1.5	Taxisco	Santa Rosa
Medax Solar FV	Medax Energy S.A.		2.0	Taxisco	Santa Rosa
Cofiño Stahl Z.5	Ecogreen S.A.	Jul-14	0.3	Guatemala	Guatemala
Bodegas	Natural Wood´s Design S. A.	Jul-14	0.2	Sanarate	El Progreso
Bodegas	Fontana de Trevi, S.A.	Jul-14	0.1	Usumatlán	Zacapa
Total			**96.1**		

Fuente: Elaboración propia

7 **Generador distribuido renovable:** Es la persona, individual o jurídica, titular o poseedora de una central de generación de energía eléctrica igual o menor a 5 MW, que utiliza recursos energéticos renovables y participa en la actividad de generación distribuida renovable. Estos serán considerados como participantes del Mercado Mayorista.

8 **Usuario autoproductor con excedentes de energía:** Es el usuario del sistema de distribución que inyecta energía eléctrica a dicho sistema, producida por generación con fuentes de energía renovable, ubicada dentro de sus instalaciones de consumo, y que no recibe remuneración por dichos excedentes.

Mapa 10: Plantas solares en Guatemala

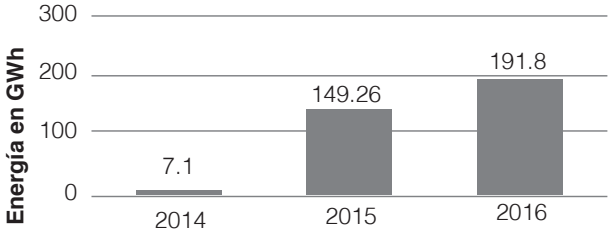


Fuente: Elaboración propia

La planta solar Horus 1 tiene una potencia de placa de 50 MW, diseñada con módulos solares de 305/310/315 Wp y 33 centros de inversión de 1.5 MW, un transformador de 1.7 kVa, más un centro de inversión de 0.5 MW, que ocupan en total 250 ha de tierra[9]. La planta Horus 2 tiene una potencia de placa de 30 MW diseñada con módulos solares de 305/310/315 Wp, con 19 centros de inversión de 1.5 MW, un transformador de 1.7 kVa, más un centro de inversión de 0.5 MW; estos ocupan en total 175 ha de tierra[10]. Ambas están ubicadas en el municipio de Chiquimulilla del departamento de Santa Rosa, e iniciaron operaciones en el 2015.

El parque fotovoltaico "Sibo", ubicado en Estanzuela, Zacapa, es un buen ejemplo de un GDR. Este parque requirió US$ 14 millones para la instalación de 20,320 paneles de 250 watts con la capacidad total de generar 5 MW y abastecer a 24,000 usuarios. Otros proyectos calificados como GDR con tecnología solar fotovoltaica son: Medax Energy S.A, con una potencia instalada de 2.0 MW; la Granja Solar La Avellana, con 1 MW de potencia instalada; la Granja Solar Buena Vista, de 1.5 MW; la Granja Solar Taxisco, de 1.5 MW; la Granja Solar El Jobo, de 1 MW y la Granja Solar Pedro de Alvarado, de 1 MW. En la figura 28 se observa la evolución de la generación de energía eléctrica por sistemas solares fotovoltaicos, desde el 2014 hasta el 2016. No se incluye en el presente informe la producción de los UAEE que operan desde 2008.

Figura 28. Generación anual de energía eléctrica por sistema solar fotovoltaica



Fuente: AMM (2016)

Realizando la integración de todos los generadores de energía solar fotovoltaicos, se muestran los siguientes resultados en la tabla 13.

Tabla 13. Potencia instalada de generadores a partir de energía solar en Guatemala

Proyectos	Energía solar MW
GDR con energía solar	12.7
Agentes generadores en el mercado mayorista con energía solar	80
UAEE con energía solar	11.13
Total	**103.83**

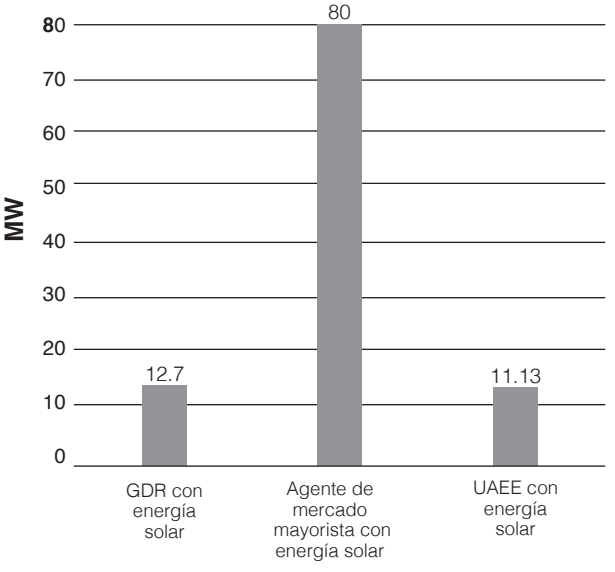
Fuente: CNEE (2017)

9 http://www.grupoortiz.com/es/internacional/guatemala/proyecto-id-1051/

10 http://www.grupoortiz.com/es/internacional/guatemala/proyecto-id-1051/

Como se observa en la figura 29, aunque sigue siendo mayor la potencia instalada de energía solar fotovoltaica por parte de agentes generadores en el mercado mayorista, el crecimiento de los GDR y UAEE ha sido muy importante, especialmente en los últimos años.

Figura 29. Potencia instalada de generadores a partir de energía solar en Guatemala



Fuente: CNEE (2017)

4.4 Energía eólica

4.4.1 Características de la energía eólica

La energía eólica es producto del movimiento del viento, el cual se obtiene por el calentamiento de las masas de aire, ya que al calentarse pesan menos y ascienden, mientras que las masas de aire frío descienden. Esto genera corrientes de aire que pueden ser aprovechadas por diferentes medios. Para la producción de energía eólica se utilizan aerogeneradores o turbinas de viento, los cuales convierten la energía cinética en energía eléctrica (MEM, 2017).

Debido a que es una fuente de energía ubicua, la energía eólica cada vez toma más importancia en la matriz de energías renovables. Dispositivos cada vez más eficientes están siendo desarrollados, para poder convertir la máxima cantidad de energía cinética del aire en energía eléctrica. Los aerogeneradores de viento pueden ser instalados en tierra o en el mar para aprovechar las zonas con más intensidad del viento.

La energía eólica es una fuente de energía intermitente y variable, razón por la cual debe ser usada en conjunto con fuentes de energía más confiables desde el punto de vista de la capacidad de despacho de la energía eléctrica (González, Pérez, Santos & Gil, 2009).

4.4.2 Potencial eólico en Guatemala

El potencial eólico de Guatemala ha sido estimado en 7,000 MW; sin embargo, el potencial económicamente viable es más conservador: entre 400 y 700 MW (Koberle, A., 2012). Las regiones con mejores condiciones para la generación de energía eólica según el mapa del proyecto Swera[11] (mapa 11) son las estribaciones sudorientales ubicadas entre Escuintla y Jutiapa. Otra de las regiones con bastante potencial es la región este del departamento de Zacapa.

11 *Solar and Wind Energy Resource Assessment.*

A niveles de pequeñas aldeas u hogares, los cuales se encuentran aislados y requieren niveles de generación más bajo, se encuentran las regiones de Petén, Alta Verapaz, Baja Verapaz, Huehuetenango y San Marcos (Koberle, 2012).

4.4.3 Generación de electricidad con energía eólica

Guatemala ha priorizado la promoción del uso de la energía que proviene del viento. El SNI impulsó dos parques eólicos con una capacidad total de 75.9 MW; un ejemplo es el parque eólico San Antonio El Sitio ubicado a 30 kilómetros al sur de la ciudad de Guatemala, el cual aporta 52.8 MW de energía al SIN. El parque cuenta con 16 aerogeneradores marca Vestas V112, con una potencia nominal de 3.3 MW cada uno. Este empezó a operar el 19 de abril del 2015.

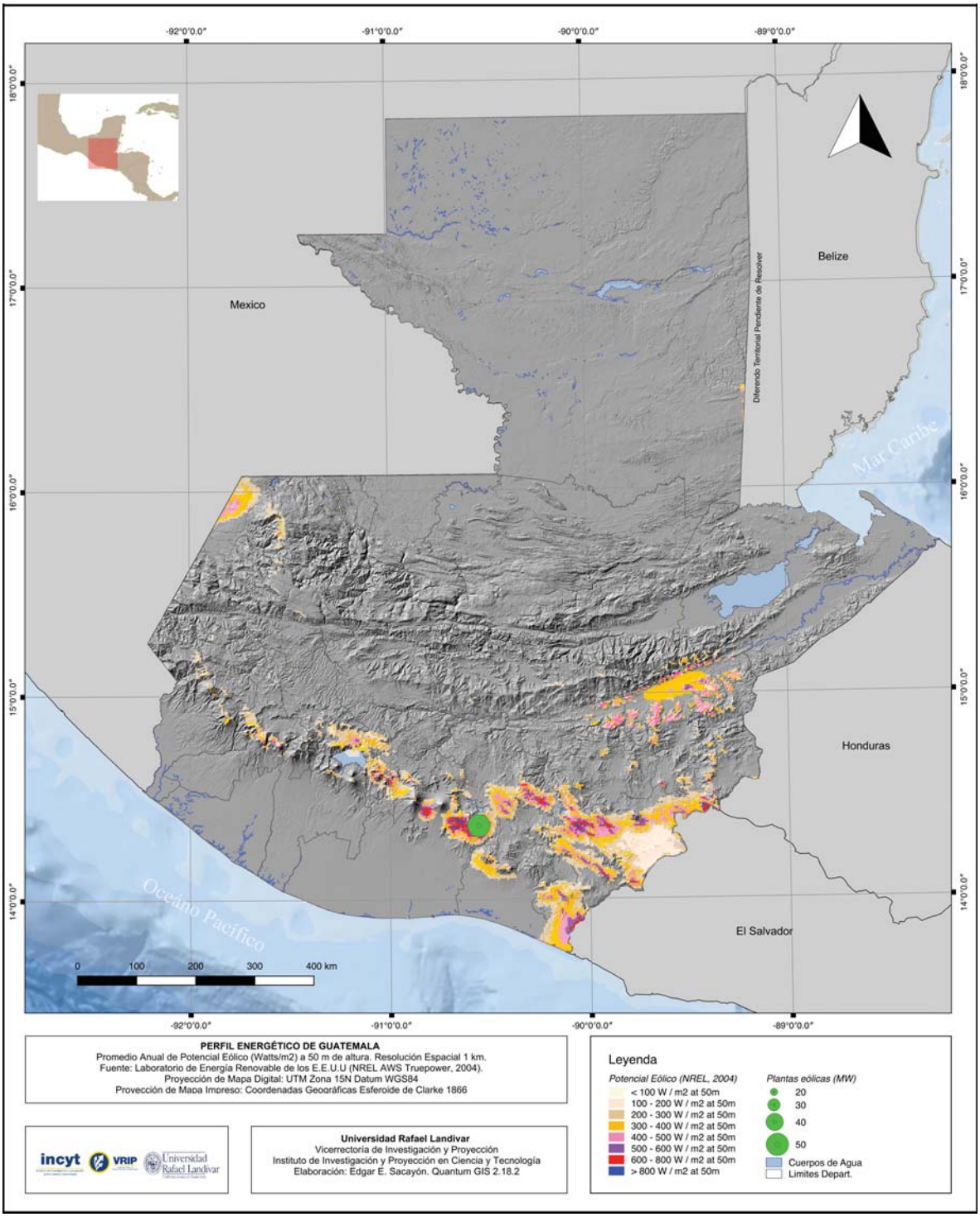
La planta de energía eólica Viento Blanco está ubicada en la finca La Colina, en San Vicente Pacaya, departamento de Escuintla y cuenta con siete aerogeneradores, cada uno con una potencia 3.3 MW que, en total, suman una potencia de 23.1 MW. Comenzó operaciones el 5 diciembre del 2015.

Existen otros proyectos en proceso de construcción, los cuales se estima que inicien operaciones en octubre 2017. El proyecto eólico Comapa, desarrollado por la empresa San Cristóbal, S.A., contará con 19 aerogeneradores de 3 MW cada uno y se espera generar un potencial total de 57.0 MW.

El parque eólico Las Cumbres tendrá una capacidad total de 30.0 MW y estará ubicado en Jutiapa (MEM, 2017). Con la incorporación de estos dos proyectos, la capacidad instalada de energía eólica incrementará a 162.9 MW, lo que representará un 3.9% de la matriz energética del SNI.

El mapa 11 muestra el potencial de energía eólica de Guatemala, así como la localización de las plantas eólicas en operación.

Mapa 11: Potencial eólico y capacidad instalada a partir de energía eólica en Guatemala



Fuente: Elaboración propia

4.5 Energía geotérmica

4.5.1 Características

La energía geotérmica proviene del interior de la Tierra por el resultado de la desintegración radioactiva de elementos (uranio 238, torio 232, potasio 40, etc.), y los procesos geológicos de la formación del planeta. El calor almacenado allí no se encuentra distribuido uniformemente, sino que tiende a ser más elevado (7,000 °C) en el núcleo. La energía se manifiesta en la superficie por procesos geológicos, como la formación de volcanes, aguas termales y géiseres que expulsan agua caliente.

Para el aprovechamiento de la energía geotérmica es necesario perforar un pozo para acceder a los reservorios subterráneos. Un reservorio geotérmico se forma cuando un manto freático (también conocido como acuífero), entra en contacto con lava volcánica u otro sistema de rocas calientes, produciendo vapor de agua a altas presiones. Este fluido puede alcanzar temperaturas elevadas en un rango de 108-310 °C. La fase exploratoria implica la perforación de pozos, con lo cual se determina el potencial del reservorio para la producción de energía. Este proceso, por lo general, implica un cierto grado de riesgo e incertidumbre, lo cual eleva el costo de inversión en proyectos geotérmicos.

Las plantas geotérmicas en operación extraen el fluido geotérmico del reservorio, el cual es llevado a la superficie por medio de un sistema de pozos y tuberías. El fluido geotérmico puede ser utilizado como fuente de calor para diversas aplicaciones, incluyendo energía eléctrica u otros procesos industriales. Luego de ser utilizado, el fluido geotérmico puede ser reinyectado al reservorio geotérmico para mantener la presión y temperatura del sistema. La energía geotérmica puede ser aprovechada durante las 24 horas del día y durante largos periodos de tiempo. Wairakei, una de las plantas más antiguas en Nueva Zelanda por ejemplo, tiene 50 años y aún sigue operando. A continuación, se describen las tecnologías para el aprovechamiento de energía geotérmica:

a) **Plantas flash**: este tipo de plantas utiliza un sistema de tuberías para llegar a los depósitos subterráneos más profundos. La presión en los depósitos es tan elevada, que el agua se encuentra en estado líquido a pesar de que su temperatura está por encima del punto de ebullición. Al subir a la superficie, la presión del agua disminuye y su temperatura se mantiene constante, lo que produce la evaporación del agua. A este proceso se le conoce como flash o flasheo. El vapor de agua es conducido hacia turbinas de vapor para generar energía eléctrica. El vapor de agua también puede ser directamente utilizado como energía térmica para procesos industriales.

   Por lo general, una vez que el vapor es utilizado, este se condensa en intercambiadores de calor y es regresado al yacimiento geotérmico manteniendo así, el depósito geotérmico durante muchos años. En sistemas geotérmicos de alta temperatura, el sistema de flasheo puede hacerse en dos o tres etapas consecutivas. A estos sistemas se les conoce como flash doble o flash triple.

b) **Plantas binarias:** en estas, el fluido geotérmico proveniente de los reservorios subterráneos se utiliza para calentar un líquido orgánico con bajo punto de ebullición. El isopentano es uno de los líquidos comúnmente utilizados en sistemas completamente cerrados. El vapor de isopentano es utilizado para mover una turbina. Las plantas geotérmicas Zunil en Quetzaltenango y Ortitlán en San Vicente Pacaya son plantas binarias.

c) **Plantas combinadas**: este tipo de tecnología combina las plantas flash con las binarias. En una primera etapa, el vapor de agua a alta temperatura es utilizado para mover una turbina. Al salir, el vapor de agua aún cuenta con suficiente temperatura para calentar un líquido orgánico, el cual puede generar energía en otra turbina. Estos sistemas son mucho más eficientes en términos energéticos.

d) **Sistemas geotérmicos mejorados (EGS[12]):** es un sistemas artificial, en donde el reservorio geotérmico es creado inyectando agua a un depósito de rocas calientes. Una de las ventajas de estos sistemas es que pueden aprovechar la energía de la tierra donde no hay depósitos geotérmicos naturales.

4.5.2 Potencial geotérmico de Guatemala

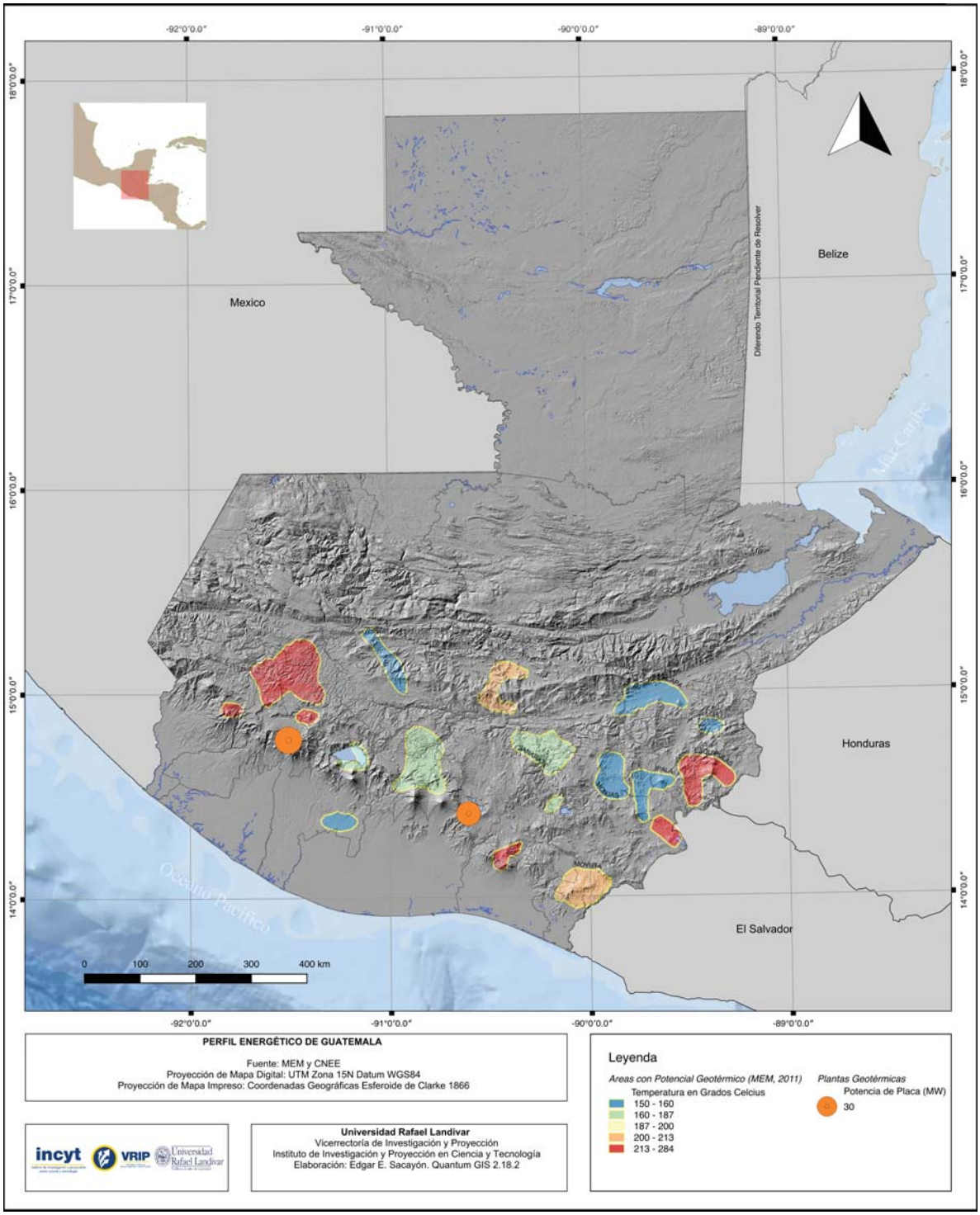
Centroamérica es rica en recursos geotérmicos, pero solo una pequeña parte se ha desarrollado. Debido a su posición geográfica, Guatemala inició su explotación geotérmica en los años cincuenta y a principios de los sesentas. De esta forma, se lograron identificar las áreas que poseen abundantes recursos geotérmicos, pues se ubican en la conjunción de tres placas tectónicas que son la de Norte América, la del Caribe y la del Coco.

Depósitos geotérmicos de alta entalpía se localizan a lo largo de la cadena volcánica que atraviesa al país, mientras que depósitos geotérmicos de mediana y baja entalpía se pueden encontrar a lo largo de las fallas del Motagua, Chixoy-Polochic y Jocotán (Roldán, 2005). El mapa 12 presenta la ubicación geográfica de las principales zonas geotérmicas del país.

Los recursos geotérmicos son, por ley, propiedad del Estado y considerados áreas de reserva nacional. Algunas áreas que poseen recursos geotérmicos son Amatitlán, Zunil, San Marcos y Moyuta. Estos solo pueden ser explotados por medio de concesiones que otorga el Inde, en contratos con las empresas que estén interesadas en el recurso. Los recursos geotérmicos de Guatemala se han estimado en 4,000 MW, aunque el MEM estima que el económicamente viable es de 1,000 MW (Koberle & Rivers, 2012).

12 *Enhanced Geothermal Systems.*

Mapa 12: Potencial geotérmico y plantas instaladas en Guatemala



Fuente: MEM (2011)

4.5.3 Generación de electricidad con energía geotérmica

Actualmente existen dos áreas de generación de energía geotérmica en el país: Orzunil y Ortitlán (DGE-MEM, 2015). El área Orzunil está localizada a 10 kilómetros de la ciudad de Quetzaltenango y tiene dos campos geotérmicos. En el campo geotérmico Zunil 1 está la planta de producción que utiliza tecnología binaria, diseñada y construida por la empresa Ormat Technologies. Cuenta con cinco pozos de producción y dos de reinyección que alimentan siete unidades de generación de 3.6 MW cada una, para proporcionar una capacidad instalada de 25.2 MW (DGE-MEM, 2015). El campo geotémico Zunil 2 se encuentra aún en fase de exploración.

El campo Ortitlán está ubicado en el área geotérmica de Amatitlán, departamento de Guatemala, en las faldas del volcán de Pacaya. La planta de producción Ortitlán posee cinco pozos de producción y dos de reinyección, los cuales alimentan tres unidades de generación: dos unidades de 12 MW y una de 1.2 MW, que en total le dan una potencia instalada de 25.2 MW (DGE-MEM, 2015).

En Guatemala, existen alrededor de 14 áreas con potencial para explotación de energía geotérmica, de las cuales 10 se encuentran en fase de estudios de pre-factibilidad. Adicionalmente, la planta Zunil podría rendir 50 MW más, Amatitlán podría llegar a producir 200 MW y El Ceibillo 25 MW, asimismo, Tecuamburro tiene una capacidad estimada de 50-190 MW y Moyuta un potencial de 30 MW. Cabe recalcar que los estudios de prospección sobre recursos geotérmicos de la región, aportan suficiente información para asegurar la producción de energía necesaria para abastecer las necesidades energéticas del país en el futuro. Anualmente, la energía geotérmica aporta 272 GWh al SNI, lo que representa alrededor de 2.9% del total de la matriz energética (tabla 14).

Tabla 14. Plantas geotérmicas en Guatemala en el 2016

Planta	Propietario	Status	Tipo	Unidades	Potencia de placa (MW)	Potencia efectiva (MW)	Generación anual (GW)
Orzunil 1	Orzunil Ltd.	Operación	Binaria	7	28.6	11.4	135.48
Ortitlán	Ortitlán Ltd.	Operación	Binaria	1	25.2	15.6	137
El Ceibillo	US Geothermal de Guatemala, S.A.	Construcción			25	-	-
Cerro Blanco	Geotermia Oriental de Guatemala, S.A.	Trámite			50	-	-
					128.8	**27**	**272.48**

Fuentes: Montalvo (2013), Roldán (2005), Asturias y Grajeda (2010) y DGE-MEM (2015)

4.6 Energía hidroeléctrica

4.6.1 Características

La energía hidroeléctrica proviene del movimiento del agua. Por lo general, se obtiene mediante la construcción de presas, donde se acumula un volumen de agua suficientemente grande, para luego permitirle fluir y así, mover una turbina (Demirel, 2012). La potencia que se puede obtener depende del diferencial de altura y del caudal agua de la corriente (Demirel, 2012). Dependiendo de la tecnología, el agua puede ser dirigida por medio de canales o tuberías. En otros casos, la energía puede ser obtenida directamente de la corriente del río.

Existen tres tipos de tecnologías utilizadas para producir energía hidroeléctrica en ríos y cuerpos de agua superficiales. Las centrales hidroeléctricas al filo del río utilizan la corriente para mover una turbina. En este tipo de plantas no se construyen presas, por lo que no existe capacidad de almacenar energía y debe ser utilizada inmediatamente. Las centrales con embalses o represas acumulan agua en un reservorio construido a base de cemento. Estas regulan el flujo de agua hacia una turbina siendo así posible aprovechar la energía según sea la demanda. Las centrales hidroeléctricas por bombeo utilizan una bomba para mover el agua hacia un punto elevado, de tal manera que el estanque se llena en periodos de baja demanda. El agua acumulada en el estanque puede ser liberada en periodos de alta demanda.

Adicionalmente, las plantas hidroeléctricas pueden ser clasificadas según su tamaño, consideradas como Pico-Hidro cuando generan menos de 5 kW y Micro-Hidro cuando generan de 5-100 kW. Por lo general, estas aprovechan el flujo natural de los ríos, no necesitan mucha infraestructura y son ideales para la generación eléctrica en zonas remotas o áreas rurales. Las pequeñas hidroeléctricas producen energía que oscila entre 1-20 MW. Estas son útiles para comunidades enteras o pequeñas industrias. Las grandes hidroeléctricas o megaproyectos hidroeléctricos usualmente oscilan entre 20-300 MW. El proyecto hidroeléctrico más grande del mundo es el de las Tres Gargantas en China, y produce 22.5 GW.

4.6.2 Potencial hidroeléctrico de Guatemala

El potencial hidroeléctrico depende de la disponibilidad hídrica en cuencas y subcuencas del país. Por lo tanto, la disponibilidad hídrica ha sido estimada por medio del sistema de cuentas ambientales (Banguat-Iarna, 2009) y por un modelo hidrológico (Iarna-URL, 2015). El sistema de cuentas ambientales ha cuantificado los recursos hídricos disponibles en las cuencas y subcuencas de las tres vertientes del país (Pacífico, Caribe y la del Golfo de México), en un promedio anual de 93,388.5 millones de m^3 de agua (Banguat-Iarna, 2009).

Por otro lado, el modelo hidrológico Weap[13] ha estimado la disponibilidad hídrica a nivel de cuencas y subcuencas (IARNA-URL, 2015). Las cuencas que

13 WEAP= *Water Evaluation And Planning System.*

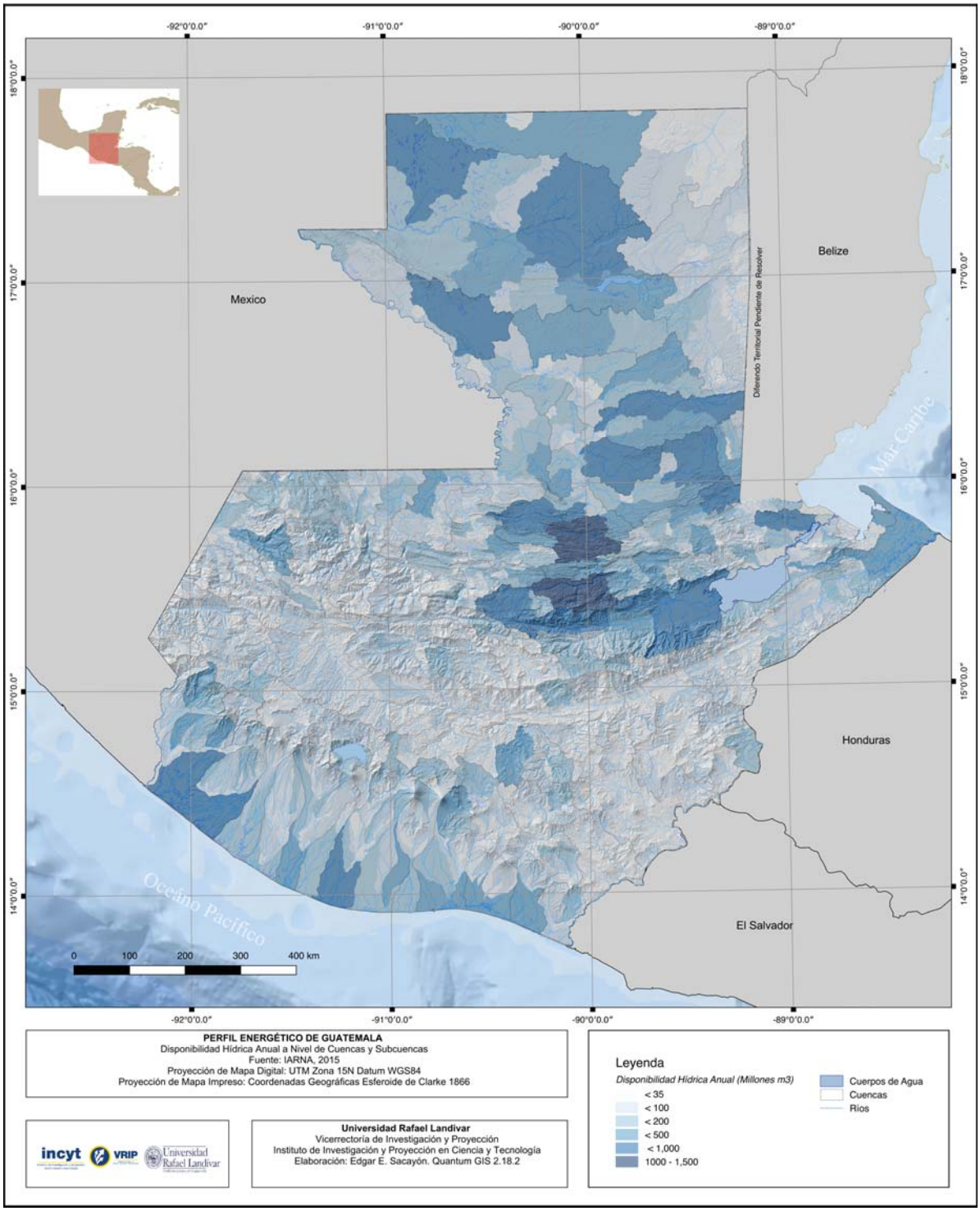
presentan recursos hídricos mayores a 1.5 millones de m^3 por km^2 al año, son las del río Ocosito, Naranjo y Suchiate en el suroccidente del país; y Cahabón, Chixoy, Ixcán, Xacbal, Tzea, Icbolay, Sebol, Sarstún, Río Dulce y Livingston en la parte central hacia la franja transversal del norte.

El mapa 13 presenta la disponibilidad hídrica de cuencas y subcuencas, usando el modelo Weap desarrollado por el Iarna. Con base en esto, se estima que el potencial hidroeléctrico de Guatemala es de 6,000 MW. El AMM reporta para el 2016 un total de 1,248.21 MW de potencia de placa instalada; lo cual significa que actualmente se aprovecha el 25% del potencial hidroeléctrico.

4.6.3 Generación de electricidad con hidroeléctricas

Actualmente existen 40 plantas hidroeléctricas en operación y conectadas al SNI. En promedio, aportan 3,624 GWh al año (AMM, 2016b). De acuerdo con los registros de la Dirección General de Energía del MEM, existen alrededor de 30 proyectos de plantas hidroeléctricas que aportarían 1,128 MW adicionales al sistema (DGE, 2014). En la Tabla 15, se presenta un listado de todas las plantas hidroeléctricas conectadas al SNI. Por otro lado, el Mapa 14 presenta la ubicación geográfica de estas plantas.

Mapa 13: Disponibilidad hídrica de Guatemala a nivel de cuencas



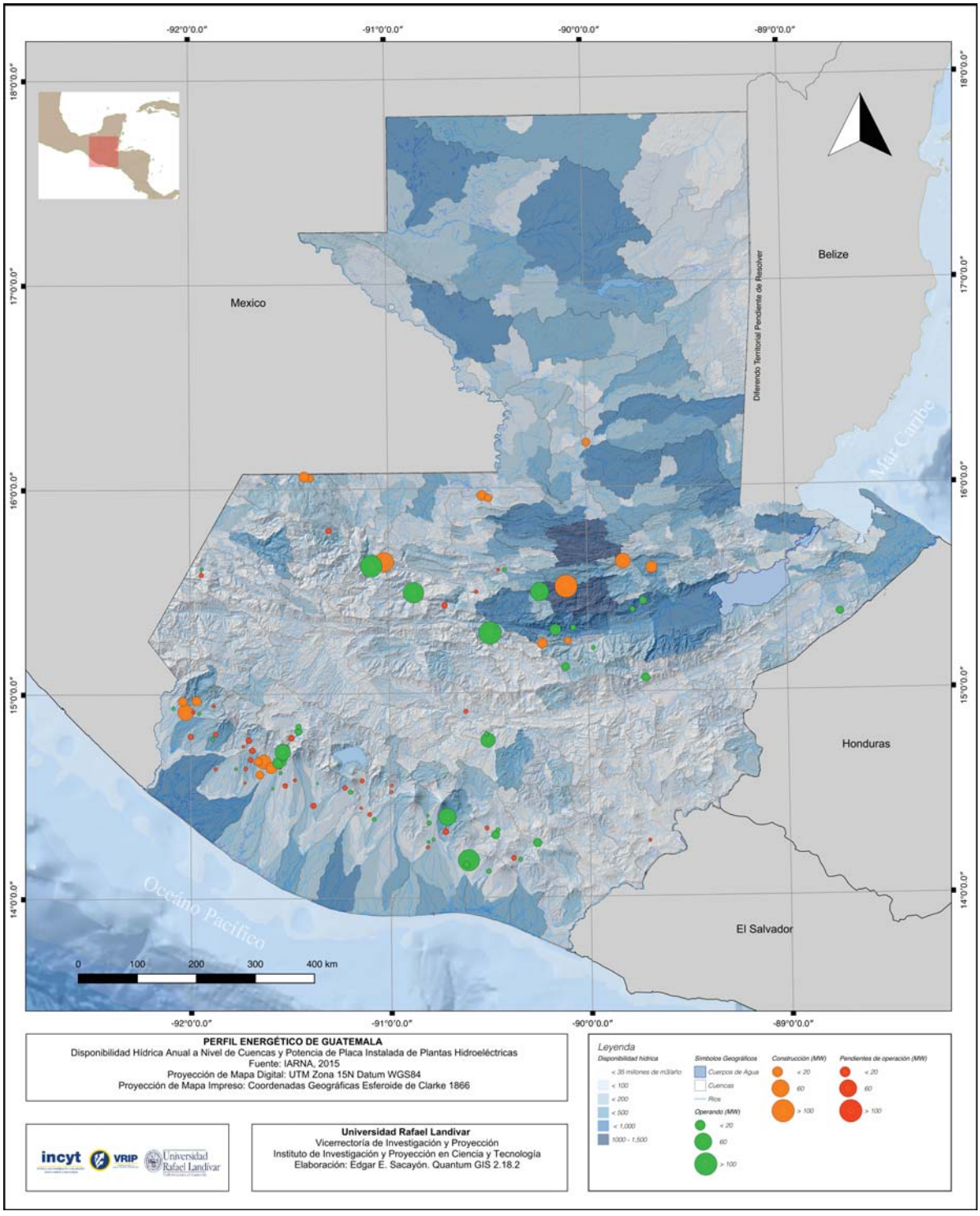
Fuente: Iarna-URL (2015)

Tabla 15. Plantas hidroeléctricas en Guatemala al 2016

Planta	Instalación	Unidades	Placa (MW)	Efectiva (MW)	Anual (GW)	%	Municipio	Departamento
Aguacapa	01/02/1982	3	90.0	79.8	259.4	33%	Pueblo Nuevo Viñas	Santa Rosa
Candelaria	01/05/2006	1	4.6	4.3	24.4	61%	Senahú	Alta Verapaz
Chichaic	01/07/1979	2	0.6	0.5	0.0	-	Cobán	Alta Verapaz
Chixoy	01/11/1983	5	300.0	284.2	980.0	37%	San Cristobal	Alta Verapaz
Choloma	01/12/2011	1	9.7	9.5	25.2	30%	Senahú	Alta Verapaz
El Canadá	01/11/2003	2	48.1	47.2	160.4	38%	Zunil	Quetzaltenango
El Capulín	01/01/1990	2	3.5	0.0	0.0	-	Siquinalá	Escuintla
El Cóbano	01/02/2015	2	11.0	8.4	29.1	30%	Pueblo Nuevo Viñas	Santa Rosa
El Manantial 1	22/02/2015	3	3.8	3.3	0.0	-	Nuevo San Carlos	Retalhuleu
El Manantial 2	22/02/2015	8	27.4	21.9	46.9	20%	El Palmar	Quetzaltenango
El Porvenir	01/09/1968	1	2.3	2.1	0.0	-	San Pablo	San Marcos
El Recreo	01/07/2007	2	26.0	26.1	104.2	46%	El Palmar	Quetzaltenango
El Recreo 2	01/10/2007	2	24.4	24.4	14.5	7%	El Palmar	Quetzaltenango
El Salto	01/01/1938	2	2.0	2.4	-	-	Escuintla	Escuintla
El Cafetal	29/05/2016	2	7.7	8.0	29.4	44%	Purulhá	Baja Verapaz
La Libertad	20/03/2016	1	9.4	9.5	-	-	Colomba	Quetzaltenango
Las Fuentes 2	22/05/2016	2	14.0	13.0	23.0	19%	El Palmar	Quetzaltenango
Jurun Marinalá	01/02/1970	3	60.0	59.9	255.8	49%	Palín	Escuintla
Las Vacas	01/05/2002	2	39.0	35.8	87.0	25%	Chinautla	Guatemala
Los Esclavos	01/08/1966	2	15.0	13.2	41.7	32%	Cuilapa	Sant Rosa
Matanzas	01/07/2002	1	12.0	11.8	54.2	52%	San Jerónimo	Baja Verapaz
Montecristo	01/05/2006	2	13.5	13.0	44.1	37%	Zunil	Quetzaltenango
Oxec	01/11/2015	2	26.1	24.4	58.6	26%	Cahabón	Alta Verapaz
Palin 2	01/07/205	2	5.8	3.9	13.3	26%	Palín	Escuintla
Palo Viejo	01/05/2012	2	85.0	87.4	110.4	15%	San Juan Cotzal	Quiché
Panan	01/09/2011	3	7.3	7.5	19.9	31%	San Miguel Panán	Suchitepéquez
Pasabien	01/06/2000	2	12.8	12.4	38.7	35%	Río Hondo	Zacapa
Poza Verde	01/06/2005	3	12.5	9.6	36.0	33%	Pueblo Nuevo Viñas	Santa Rosa
Raaxha	01/01/2016	2	5.1	5.1	16.0	36%	Chisec	Alta Verapaz
Renace 1	01/03/2004	3	68.1	66.7	260.0	44%	San Pedro Carchá	Alta Verapaz
Renace 2	03/04/2016	4	114.7	114.0	374.5	37%	San Pedro Carchá	Alta Verapaz
Renace 3	27/11/2016	3	108.0	62.2	58.1	6%	San Pedro Carchá	Alta Verapaz
Rio Bobos	01/08/1995	1	10.0	10.5	38.5	44	Quebradas, Morales	Izabal
San Isidro	01/07/2002	2	3.9	3.4	0.0	-	San Jerónimo	Baja Verapaz
San Jerónimo	01/12/1996	1	0.3	0.2	-	-	San Jerónimo	Baja Verpaz
Santa María	01/06/2027	3	6.0	4.1	-	-	Zunil	Quetzaltenango
Santa Teresa	01/10/2011	2	17.0	16.7	59.6	40%	Tucurú	Baja Verapaz
Secacao	01/07/1998	1	16.5	16.1	95.9	66%	Senahú	Alta Verapaz
Visión de Aguila	01/12/2013	2	2.1	2.1	7.7	42%	Cobán	Alta Verapaz
Hidro Xacbal	01/08/2010	2	94.0	100.0	302.3	37%	Chajul	Quiché
		1319.1	**1224.6**	**3668.8**				

Fuente: AMM (2016)

Mapa 14: Plantas instaladas de energía hidroeléctrica en Guatemala



Fuente: Elaboración propia

4.6.4 Conflictividad social asociada a proyectos hidroeléctricos

Algunos estudios recientes han puesto en evidencia el alto grado de conflictividad social asociada a proyectos hidroeléctricos en Guatemala (Icefi, 2016; Iralep, 2010; Normanns & Morales, 2016). Según estos estudios, del total de licencias autorizadas para proyectos hidroeléctricos en el periodo de 1997 al 2010, más del 80% generó conflictos sociales. Uno de los casos más severos es el de la hidroeléctrica Chixoy, que inició su construcción en 1975. Este proyecto produjo las masacres de Río Negro y el desplazamiento forzado de las comunidades aledañas al embalse. Además, la construcción de la hidroeléctrica implicó la desaparición de 23 aldeas, 471 viviendas, 10 edificios públicos y 45 sitios arqueológicos (Icefi, 2016).

Una revisión exhaustiva de diversas fuentes bibliográficas, entre estudios y publicaciones de periódicos nacionales, permitió identificar que actualmente se contabilizan 26 proyectos hidroeléctricos (en operación y con licencia de construcción), que presentan conflictos ambientales o sociales (tabla 16). Estos representan más del 50% de los proyectos en operación actual y se presentan en el mapa 15, donde además, se visualiza el porcentaje de cobertura eléctrica.

Como se puede notar, los departamentos donde se presenta el mayor número de conflictos sociales poseen los índices de menor cobertura eléctrica. Estos departamentos presentan además, los índices de pobreza más altos, y los índices de desarrollo humano más bajos de Guatemala (PNUD, 2016). En contraste, estos poseen la mayor abundancia de recursos hídricos (ver mapa 13 sobre disponibilidad hídrica).

Si bien los beneficios de las centrales hidroeléctricas son percibidos por toda la población con acceso a energía eléctrica, las externalidades son asumidas por las comunidades donde se instalan estos proyectos. Los motivos que generan conflictividad social han sido identificados (DIP-URL, 2015), y pueden ser resumidos como: a) una mala gestión en la fase de construcción, b) falta de responsabilidad social empresarial, c) ilegitimidad de las instituciones públicas, y d) carencia de un marco regulatorio ambiental para la gestión de los recursos naturales.

En general, las empresas hidroeléctricas carecen de mecanismos para socializar los estudios de impacto ambiental e incluir a los actores locales en las etapas de construcción. Esto genera incertidumbre y descontento. Adicionalmente, las instituciones públicas no responden a las necesidades de las comunidades afectadas (Icefi, 2016), lo cual, con la llegada de proyectos de inversión privada a las comunidades, provoca expectativas para que se les apoye con necesidades que le corresponden al Estado, como por ejemplo, la construcción de escuelas, centros de salud, etc.

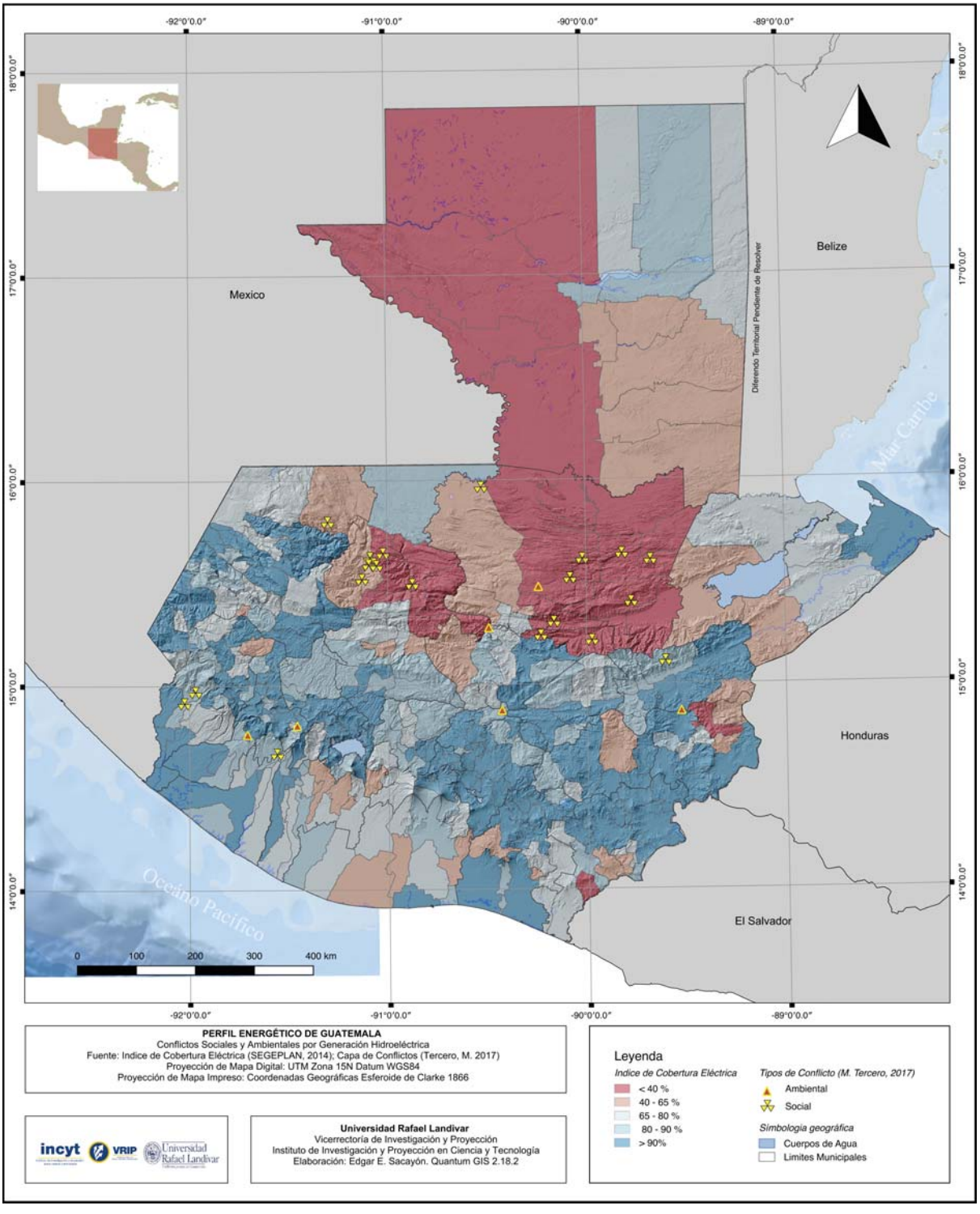
Uno de los mayores problemas es la carencia de una legislación fuerte en torno a los recursos naturales. Como ejemplo se puede citar una iniciativa de ley de agua, que no ha logrado avanzar en el Congreso de la República, lo que deja en el limbo la gestión territorial de los recursos naturales. Además, muchas empresas

Tabla 16. Conflictos sociales y ambientales asociados a proyectos hidroeléctricos en Guatemala

Proyecto hidroeléctrico	Departamento	Municipio	Estado del proyecto	Capacidad (MW)	Tipo de conflicto	Descripción	Fuente
Chixoy	Alta Verapaz	San Cristóbal Verapaz	Operando	300	Social y ambiental	Desplazamiento de personas y masacre de Río Negro	DIP, URL (2014)
Cuevamaría	Quetzaltenango	Cantel	Operando	9.3	Social y ambiental	Comunidades y autoridades se oponen por ambiente	Republicagt (2014) s.f.
El Recreo	Quetzaltenango	El Palmar	Operando	26	Social	Opresión tras masacres	Solano (2009)
Finca Lorena	San Marcos	San Rafael Pi de la Cuesta	Construcción	16.5	Social	Oposición de vecinos	Solano (2009)
Sulin	Baja Verapaz	Purulha	Construcción	19	Social	Desinformación a la población	Analistas Independientes DeG
Hidro Xacbal	Quiché	Chajul	Operando	94	Social	Controversia por instalación	Koberle (2012)
Renace IV	Alta Verapaz	San Pedro Carchá	Trámite	85	Social		s.f.
Santa Teresa	Alta Verapaz	San Miguel Tucur	Operando	24	Social	Problemas de tenencia de tierras	Republicagt (2014)
Candelaria	Alta Verapaz	Senahú	Operando	4.5	Social	Desalojos violentos en 2004	Solano 2009
El Sisimite	Guatemala	Chuarrancho	Prefactibilidad	40	Social y ambiental	Vulnerabilidad por desarrollo hidroeléctrico	IARNA
Entre Ríos	Alta Verapaz	Lanquín	Prefactibilidad	8.25	Social	Se rechazó la hidroeléctrica tras una consulta	Republicagt (2014)
Renace II"	Alta Verapaz	San Pedro Carchá	Operando	68.1	Social y ambiental	Contaminación al río	La Marea (2016) s.f.
Palo Viejo	Quiché	El Regado	Operando	84	Social	Oposición de las comunidades	Nómada (2016)
Río Hondo II	Zacapa	Río Hondo	Prefactibilidad	32	Social	Rechazo de construcción por pobladores	Skarwan (2011)
Tres Ríos	San Marcos	Tajumulco	Construcción	49.19	Social	Oposición de pobladores	Skarwan (2011)
Santa Rita	Alta Verapaz	Cobán	Construcción	19.47	Social	Incumplimiento de la empresa con la comunidad	Republicagt (2014)
Hidro Xacbal Delta	Huehuetenango	San Mateo Ixtatn	Construcción	75	Social	Fuerte	IARNA
El Orégano	Chiquimula	Jocotán	Prefactibilidad	120	Social y ambiental		ISE, URL (2016)
Oxec	Alta Verapaz	Santa María Cahabón	Construcción	25.5	Social	Generación de confusión en las poblaciones	Rodríguez (2016)
Oxec II	Alta Verapaz	Santa María Cahabón	Construcción	45	Social	Generación de confusión en las poblaciones	Rodríguez (2016)
La Vega I	Quiché	Nebaj	Prefactibilidad	38	social	Moderado	IARNA (2017)
La Vega II	Quiché	Nebaj	Prefactibilidad	18.75	social	Leve	IARNA (2017)
Las Brisas	Quiché	Nebaj	Prefactibilidad	25	social	Moderado	IARNA (2017) s.f.
Sac-Ja	Baja Verapaz	Purulhá	Operando	2	Social	Conflictos sociales que paralizaron la hidroeléctrica	Rodriguez-Carmona (2016)
Canbalam I	Huehuetenango	Santa Cruz Barillas	Pendiente de op	4.96	Social	Tensión comunitaria y asesinatos	Viaene (2015)
Talcanac	Quetzaltenango	San Martín Sacatepéquez	Pendiente de op	4.95	Social y ambiental	Oposición de comunidad Municipalidad	Republicagt (2014) s.f.

Fuente: Elaboración propia

Mapa 15: Conflictos por generación hidroeléctrica en Guatemala



Fuente: Elaboración propia

no socializan los estudios de impacto ambiental y no toman en cuenta a todos los actores afectados, lo que resulta en malas prácticas y una clara deficiencia en su responsabilidad social empresarial.

Por otro lado, Guatemala es firmante del Convenio 169 de la Organización Internacional del Trabajo (OIT), referente a las consultas a pueblos indígenas y tribales. A raíz de una resolución de la Corte Suprema de Justicia durante el caso OXEC, se realizó el primer manual para abordar de manera apropiada la consulta a pueblos indígenas y tribales. La aplicación del manual para la realización de la consulta comunitaria permitió la resolución de la conflictividad entre la empresa Energy Resources Capital Corp y un grupo de comunidades aledañas a la zona del proyecto hidroeléctrico. Este manual es el primer caso en Guatemala en el cual se realiza un procedimiento donde se involucra a todos los actores locales (comunidades, Estado y empresa privada), y se espera que su replicación ayude a solventar otros casos.[14]

4.7 Conclusiones

- **Guatemala posee abundantes recursos energéticos renovables,** por ejemplo cuenta con potencial solar, eólico, geotérmico e hidroeléctrico, de los cuales actualmente solo se aprovecha el 0.01%; 14%; 12% y 20%, respectivamente. Sin considerar las limitaciones de los aspectos económicos y sociales, en el país existen suficientes recursos energéticos renovables para su aprovechamiento a largo plazo.

- **La basura es una fuente energética desperdiciada.** En Guatemala existen varios basureros municipales y clandestinos de los cuales se podría aprovechar la basura para generar energía. La planta InBio en el vertedero municipal de la ciudad capital, es un ejemplo de que la generación de energía a partir de la basura, es posible. Por lo tanto, es sumamente importante que se cuantifique el potencial energético en basureros municipales. Esto podría ayudar a replicar la experiencia de InBio en otros rellenos sanitarios del país y así obtener beneficios económicos, sociales y ambientales.

- **La producción de biogás en agroindustrias presenta beneficios ambientales**. Por una parte, reduce la emisión de metano al ambiente, el cual es un gas de efecto invernadero 25 veces más potente que el dióxido de carbono. Por otro lado, reduce la contaminación del agua, ya que los efluentes residuales son tratados de una forma más efectiva. Un buen ejemplo es la planta Gabiosa, que utiliza los efluentes residuales de la extracción de aceites vegetales para producir biogás, el cual alimenta una turbina de 1 MW de electricidad.

- **Se produce etanol para mezclas E5 y E10 en gasolina.** La capacidad instalada para producir 1,390,000 de litros diarios es suficiente para suministrar mezclas al 5 y 10% de gasolina con etanol. Sin embargo, el marco regulatorio no ha logrado implementarse.

14 Caso OXEC/OXEC II, febrero 2018. Presentación organizada por la Cámara de Industria Alemana.

- **No existe producción de biodiésel a escala comercial.** Lo que se produce en Guatemala es a escala de laboratorio y por iniciativa privada. No se puede hablar de una producción nacional de biodiésel. Algunos experimentos han logrado producir técnicamente biodiésel a partir de microalgas y jatropha; sin embargo, han dado resultados negativos desde el punto de vista económico. Producir biodiésel a partir de aceites vegetales tampoco es una alternativa viable, debido a los altos costos de producción.

La hidroelectricidad presenta una alta tasa de conflictividad social. De 40 proyectos hidroeléctricos en Guatemala, 26 presentan o han presentado conflictividad social durante la etapa de construcción y operación. Esto representa más del 50% de los proyectos hidroeléctricos en operación. Esta conflictividad se debe a un conjunto de causas como una mala gestión o la falta de responsabilidad social por parte de las empresas desarrolladoras, la falta de reglamentación o la falta de proceso de consulta según lo establece el Convenio 169 de la OIT, así como la conflictividad promovida por grupos terceros.

4.8 Recomendaciones

- Guatemala es un buen ejemplo a nivel regional en cuanto a la potencia instalada y generación de energía renovable. Se recomienda impulsar el marco regulatorio e incentivar la exportación de energía a México y Centroamérica para incrementar la oferta de energía y aprovechar de mejor manera la capacidad instalada actualmente.

- Es sumamente importante que el Estado utilice instrumentos políticos y mecanismos financieros para la descentralización energética, es decir, cualquier sistema de generación de energía que se produzca en el punto de uso. Existen suficientes fuentes de energía renovable, así como opciones tecnológicas para la instalación de sistemas energéticos aislados en zonas remotas, donde no llega la red de transmisión y distribución.

Debido a las oportunidades que presenta la generación de energía a partir de la basura, es recomendable que se realicen estudios de prefactibilidad para evaluar el potencial de generación y los costos, así como desarrollar un marco legal referente al aprovechamiento de los residuos para la generación de energía.

- Estudios sobre el potencial energético de residuos y desechos de procesos industriales pueden incentivar la inversión en sistemas de energía a partir de desechos.

- La implementación de una política nacional para introducir mezclas de etanol debe ser abordada. La mezcla de etanol en combustibles tiene ventajas ambientales que deben ser consideradas, pues ayudarían a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero producidas por el sector transporte.

- Es sumamente importante que los desarrollos de plantas de energía, sobre todo las hidroeléctricas, tomen en cuenta dentro de sus planes de responsabilidad social empresarial a las comunidades vecinas de las plantas, previo a la construcción y

durante la operación. Se debe hacer la inversión necesaria, tanto en tiempo como en recursos económicos, para que los actores locales puedan estar totalmente informados sobre los beneficios e impactos asociados al proyecto.

- El proceso de consulta establecido en el Convenio 169, debe ser reglamentado por parte del Estado de Guatemala lo antes posible.

4.9 Referencias bibliográficas

Asociación de Combustibles Renovables de Guatemala (ACRG). (2017). *Etanol en Guatemala*. Recuperado de: www.acrguatemala.com/etanol.shtml

AMM. (2016a). *Capacidad Instalada en el Sistema Eléctrico Nacional*. Guatemala: Administrador del Mercado Mayorista. Recuperado de: www.amm.org.gt

AMM. (2016b). *Despacho de Carga Ejecutado del Sistema Nacional Interconectado 2016*. Guatemala: Administrador del Mercado Mayorista. Recuperado de: www.amm.org.gt

Banguat-Iarna. (2009). *Cuenta integrada de recursos hídricos (CIRH): Sistema de Contabilidad Ambiental y Económica Integrada de Guatemala*. Guatemala: Universidad Rafael Landívar, Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente y Banco de Guatemala.

BNDES-CGEE. (2008). *Sugarcane-based bioethanol: energy for sustainable development*. Río de Janeiro: BNDES. Recuperado de: www.sugarcanebioethano.org

Bons, N. (2005). *Swera Informe Nacional (Borrador)*. Guatemala: Dirección General del Ministerio de Energia y Minas.

Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnol Adv*, *25*(3), 294–306. Recuperado de: https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001

CNEE. (2014). *Informe Estadístico de Mercado 2014*. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. Recuperado de: http://www.cnee.gob.gt/wp/?page_id=253

Demirel, Y. (2012). *Energy: Production, Conversion, Storage, Conservation, and Coupling. Green Energy and Technology* (Vol. 69). Recuperado de: https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2372-9

DGE. (2014). *Registro de Centrales Hidroeléctricas Menores o Iguales a 5MW*. Guatemala: Dirección General de Energía, Departamento de Desarrollo Energético del Ministerio de Energía y Minas. Recuperado de: http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2012/04/Hidros-Menores-de-5-MW_Vigentes_Tramite16.pdf

DGE-MEM. (2015). *Recursos Geotérmicos de Guatemala*. Guatemala: Ministerio de Energía y Minas.

Díaz Cabrera, J. M. (2011). *Evaluación de Pre-Factibilidad Técnico-Económica de las Potencialidades Energéticas de las Microalgas que Contaminan el Lago de Amatitlán*

para la Obtención de Biodiesel. Guatemala: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Proyecto Fodecyt No. 49-2009.

DIP-URL. (2015). *Gestión e Inclusión Social en Proyectos Hidroeléctricos: Cinco Propuestas*. Guatemala: Dirección de Incidencia Pública de la Universidad Rafael Landívar.

Farinelli, U. (Ed.). (1999). *Energy as a tool for sustainable development for African, Caribbean and Pacific countries*. New York, NY. Recuperado de: http://inis.iaea.org/Search/search.aspx?orig_q=RN:31030395

González, J. A. C., Pérez, R. C., Santos, A. C. & Gil, M. A. C. (2009). *Centrales de energías renovables*.

Iarna-URL. (2015). *Balance hidrológico de las subcuencas de la República de Guatemala: Bases Fundamentales para la Gestión del agua con visión a largo plazo*. Guatemala: Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente, Universidad Rafael Landívar. Recuperado de: http://www.url.edu.gt/publicacionesurl/FileCS.ashx?Id=40416

Icefi. (2016). *Brechas y puentes entre la política fiscal y las energías renovables: Guatemala*. Guatemala: Autor.

Icefi. (2017). *Financiamiento climático y descentralización energética en Centroamérica*. Autor.

Inab, Iarna-URL, & FAO/GFP. (2012). *Oferta y demanda de leña en la República de Guatemala/Woodfuel Integrated Supply/Demand Overview Mapping*. Guatemala: FAO/GFP/Facility.

Iralep. (2010). *Comprendiendo la conflictividad por hidroeléctricas en Guatemala: para tender puentes de gobernabilidad*. Guatemala: Instituto Regional de Altos Estudios Políticos.

Klass, D. L. (2004). Biomass for renewable energy and fuels. *Encyclopedia of Energy*, *1*, 193-212.

Knothe, G., & Gerpen, J. Van. (2010). *The Biodiesel Handbook*. (G. Knothe, J. Krahl & J. Van Gerpen, Eds.) (2da ed.). Urbana, Illinois: AOCS Press. Recuperado de: https://doi.org/doi:10.1201/b17510-1

Koberle, A. (2012). *An Alternative Power Development Plan for Guatemala*. Guatemala: International Rivers.

Koberle, A., & Rivers, I. (2012). *An Alternative Power Development Plan for Guatemala*. Berkeley California.

Aguilar, K., (2015). *Mapas de Recurso Solar en Guatemala*. Recuperado de http://incyt.org/web/mapas-de-recurso-solar-en-guatemala/

Lee, S., Speight, J. G., & Loyalka, S. K. (2007). *Handbook of Alternative Fuel Technologies*. Boca Raton, Fl: CRC Press.

MEM. (2016). *Balance Energético 2016*. Guatemala: Ministerio de Energía y Minas de Guatemala.

Ministerio de Energía y Minas. (2017). *Energía eólica*. Guatemala: Autor.

Normanns, G. & Morales, B. (2016). *Nuestro futuro: Conflictos y naturaleza*. Guatemala: Instituto de Investigación y Proyección Sobre el Estado de la Universidad Rafael Landívar.

Olade. (2014). *Acceso a mercados energéticos, Fase 2, Guatemala*. Organización Latinoamericana de Energía.

PNUD. (2016). *Mas Allá del Conflicto, Luchas por el Bienestar*. Guatemala: Autor.

Roldán, A.R. (2005). *Desarrollo de Energía Geotérmica en Guatemala 2000-2005*. Antalaya, Turquía.

Sathaye, J., Lucon, O., Rahman, A., Christensen, J., Denton, F., Fujino, J. & Rudnick, H. (2011). Renewable energy in the context of sustainable development. In O. Edenhofer, R. P. Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, Mp. Matschoss, S. Kadner, C. von Stechow (Eds.), *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation* (pp. 707-790). New York, USA: Cambridge University Press. Recuperado de: http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/Chapter 9 Renewable Energy in the Context of Sustainable Development.pdf

Solano, L. (2009). Estudio del destino de la producción de caña de azúcar y palma africana y la situación de la producción y el mercado de agrocombustibles en Guatemala. *Action Aid*, 1–74. Recuperado de: http://valledelpolochic.files.wordpress.com/2010/09/cac3b1aypalmaluissolano2011.pdf

Solomon, B. & Bailis, R. (2014). *Sustainable development of Biodiesel in Latin America and the Caribbean*. Recuperado de: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9275-7

Speight, J. G. (2011). *The Biofuels Handbook*. Cambridge, UK: RSC Publishing. Recuperado de: https://doi.org/10.1039/9781849731027

Tester, J. W., Drake, E. M., Driscoll, Mi. J., Golay, M. W., & Peters, W. A. (2012). *Sustainable energy: choosing among options* (2nd ed.). Cambridge, Mass: MIT Press.

Tomei, J., & Diaz-Chavez, R. (2014). Guatemala. In B. D. Solomon & R. Bailis (Eds.), *Sustainable Development of Biofuels in Latin America and the Caribbean* (pp. 179–201). New York, NY: Springer New York. Recuperado de: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9275-7_8

5
CAPÍTULO

ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL DEL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO

5. Análisis de sostenibilidad ambiental del Sistema Nacional Interconectado

Autor: Edgar E. Sacayón

5.1 Introducción

En esta sección se presenta el análisis de sostenibilidad ambiental del Sistema Nacional Interconectado. Esto incluye a todos los sistemas utilizados en el territorio nacional para generar, transmitir y distribuir energía eléctrica en bajo voltaje. El estudio de sostenibilidad ambiental incluye el análisis de ciclo de vida (ACV) y el análisis de huella de agua. La metodología del ACV se encuentra descrita en el primer capítulo y está estandarizada bajo la norma ISO 14040 y 14044. El análisis de huella de agua está estandarizado bajo la norma ISO 14046.

El primer objetivo de este análisis es demostrar la aplicación del ACV a sistemas energéticos. Se espera que esto influya en la replicación del método en otros sistemas, por ejemplo: minería, extracción de petróleo y cadenas agroindustriales. El segundo objetivo es facilitar indicadores ambientales del ciclo de vida para el suministro de electricidad. Actualmente, los indicadores ambientales del ciclo de vida, como la huella de carbono y la huella de agua, se utilizan para evaluar el desempeño ambiental de cadenas de suministro global. Por lo tanto, cuantificar impactos ambientales de ciclo de vida contenidos en la electricidad, contribuye directamente a reducir la incertidumbre al evaluar otros sistemas de producción en Guatemala.

El tercer objetivo es evaluar los efectos de la emisión de gases de efecto invernadero, debido a los escenarios de expansión del sistema nacional interconectado (CNEE, 2012). Se espera que esta información pueda influir positivamente en la creación de políticas públicas que ayuden a incrementar la transición a sistemas energéticos sostenibles y ambientalmente eficientes en el futuro.

5.2 Análisis del ciclo de vida del Sistema Nacional Interconectado

El análisis de ciclo de vida es uno de los impactos ambientales de un producto durante todas sus etapas; es decir, desde su extracción, fabricación, uso y finalización de su vida útil. Es por esto que dicho análisis también es conocido como análisis de la "cuna a la tumba".

La energía eléctrica residencial es un producto de alta demanda y uso diario. La generación de energía eléctrica está compuesta de una mezcla de tecnologías, por ejemplo, hidrológica, carbón, bunker, cogeneración, solar, entre otras. Posteriormente, la energía generada llega a los usuarios por medio de redes de transmisión y distribución.

Siendo el sistema eléctrico un conjunto de actividades sumamente complejo, realizar un análisis de ciclo de vida a nivel nacional es de suma importancia.

A continuación, se presenta el análisis de ciclo de vida (ACV) para el Sistema Nacional Interconectado.

5.2.1 Fase 1: definición de alcances y objetivos

a) Unidad funcional

De acuerdo a las directrices del estándar ISO 14040, esta sección describe los alcances y objetivos del estudio. Para el presente análisis el propósito principal es evaluar los impactos de ciclo de vida por la generación de 1 kWh de energía eléctrica de bajo voltaje en el territorio nacional durante el año 2016.

b) Límites del sistema

Para la mayoría de los sistemas de generación que participan en la producción y distribución de 1 kWh de electricidad en el territorio de Guatemala, se utilizó el enfoque "de la cuna a la tumba". Este considera todas las etapas de la cadena de suministro de cada sistema energético, incluyendo el tratamiento de desechos sólidos. En la figura 30 se muestra el sistema que se analizó, incluyendo los intercambios ambientales entre la tecnosfera y la biosfera. A continuación, se describen las etapas que fueron consideradas dentro del sistema de análisis:

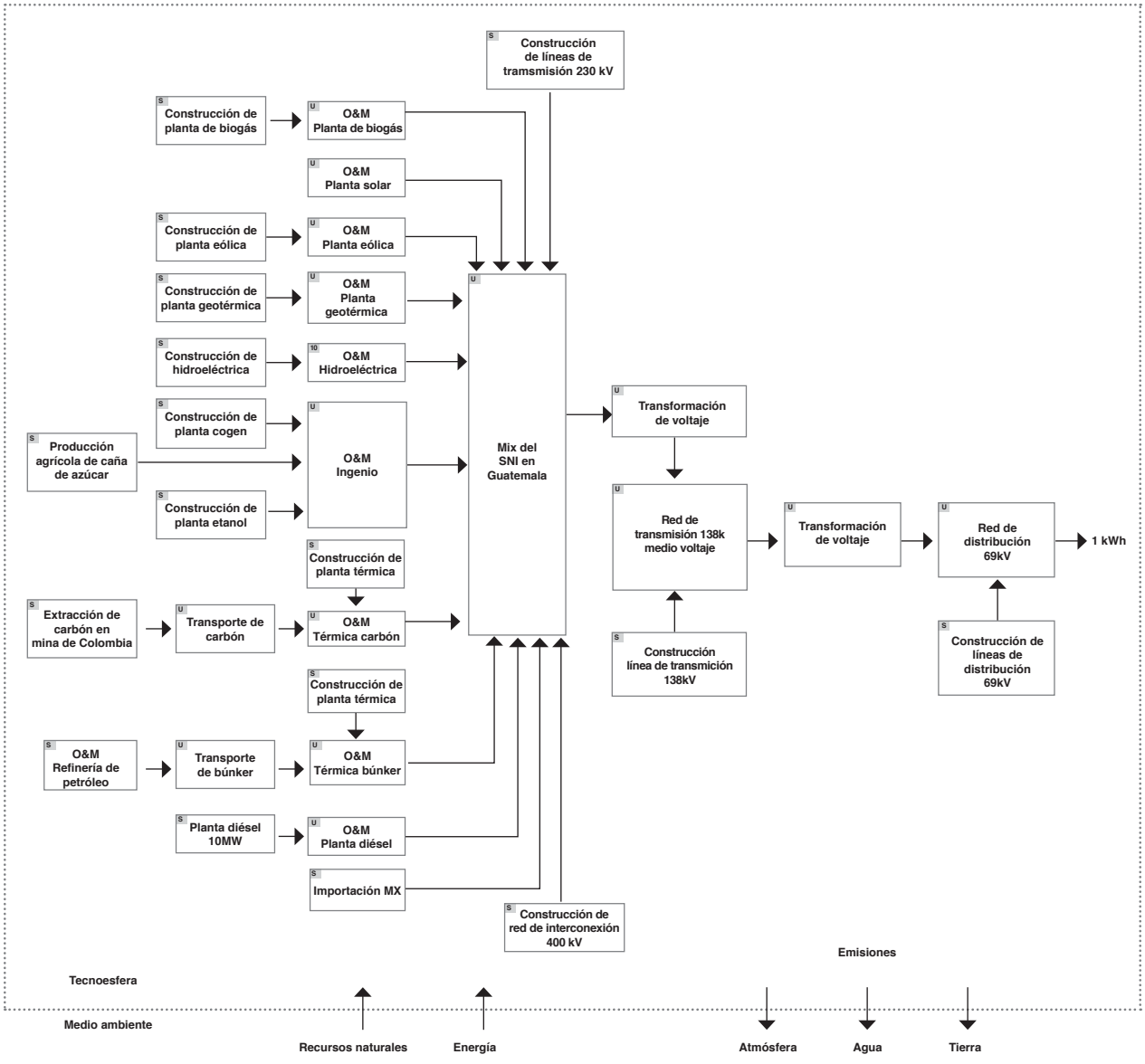
1) **Procesos de extracción:** incluye todos los procesos para la extracción y producción de combustibles fósiles, la operación y mantenimiento de minas de carbón en Colombia, así como una refinería en Estados Unidos para la producción de búnker. También se considera la etapa agrícola para la producción de caña de azúcar cuyos residuos son utilizados por los sistemas de cogeneración en los ingenios azucareros.

2) **Infraestructura:** incluye la construcción de la infraestructura para plantas de procesamiento, plantas de generación de energía y las líneas de transmisión y distribución (T&D).

3) **Operación y mantenimiento (O&M)**: incluye actividades relacionadas con la operación de plantas de generación de electricidad, transporte de personal, pérdidas asociadas a la red de T&D.

4) **Transporte**: se considera el transporte de combustibles fósiles, así como materiales necesarios para la construcción y operación de las plantas de electricidad.

Figura 30. Sistema de producción para 1 kWh de electricidad de bajo voltaje (110-240V), que se distribuye a usuarios domésticos en Guatemala



Fuente: Elaboración propia.

PU = Procesos Unitarios; PS = Procesos de Sistema

c) El *software* OpenLCA

Para realizar el análisis de ciclo de vida se usó el *software* de código abierto OpenLCA[1] 1.6.1. Los modelos se basan en procesos unitarios y de sistemas. Un proceso unitario cuantifica los intercambios ambientales y los flujos de una actividad particular, dentro de una cadena de suministro. Por otro lado, un proceso de sistema contiene toda la información de los intercambios ambientales de una cadena de suministro completa. Por ejemplo, la generación de electricidad en una planta hidroeléctrica es un proceso unitario que incluye la información durante la O&M. Por otra parte, la electricidad importada de México es un proceso de sistema, es decir, incluye la cadena de suministro (energía nuclear, hidroeléctrica, térmica, etc.) para producir 1kWh de electricidad de alto voltaje en México.

5.2.2 Fase 2: análisis del inventario

En Guatemala, las fuentes de información de procesos industriales del sector energético son limitadas. Para construir el inventario de ciclo de vida, se utilizaron los procesos unitarios y de sistema contenidos en la base de datos *Ecoinvent*[2] *3.2. cut-off*. Para adaptar estos procesos al contexto guatemalteco, se consultaron estadísticas de producción del año 2016 del Ministerio de Energía y Minas (MEM), la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE), el Administrador del Mercado Mayorista (AMM). Esto hizo posible determinar un caso promedio para la generación de electricidad en Guatemala.

La mezcla de electricidad que se suministra a un usuario final corresponde al reportado por la AMM para el 2016. A continuación, se describen cada uno de los sistemas energéticos que se incluyeron en el modelo de ciclo de vida del SNI.

a) Modelo de Planta Hidroeléctrica

El modelo de una planta hidroeléctrica incluye las siguientes etapas: 1) construcción, y 2) operación y mantenimiento. En Guatemala, la mayoría de plantas hidroeléctricas es construida con embalses y pueden ser consideradas de regulación diaria o regulación anual (com. Pers. C. Guzmán, 2017). La construcción de una planta hidroeléctrica se modeló usando un proceso descrito para la construcción de plantas hidroeléctricas con embalse, en regiones no alpinas de Europa. El periodo de vida para la represa es de 150 años y 80 para las turbinas. La operación y mantenimiento incluyen emisiones de metano biogénico con un valor de 0.00136 kg/kWh. Las emisiones de metano biogénico en embalses de plantas hidroeléctricas en los trópicos ya han sido descritas (Hertwich, 2013), y provienen tanto de la biomasa inundada en el embalse como de aguas residuales que llegan al embalse.

1 OpenLCA es un *software* de código abierto y gratuito, utilizado a nivel mundial, para realizar análisis de ciclo de vida en distintos procesos.

2 *Ecoinvent* es una base de datos que provee información documentada, consistente y confiable de procesos y productos, para los análisis de ciclo de vida y de impacto ambiental.

b) Modelo del parque eólico

El modelo del parque eólico incluyó: 1) la construcción del parque eólico, y 2) operación y mantenimiento. El modelo representa la producción de electricidad de alto voltaje, en un parque eólico terrestre con turbinas mayores a los 3 MW de potencia. La construcción incluye el transporte de partes y la construcción de la red de conexión. La operación y mantenimiento incluyen el transporte y uso de aceite mineral usado en los servicios a las turbinas.

c) Modelo de planta solar

Para el modelo de planta solar se utilizó uno genérico de producción de energía solar de bajo voltaje. Este modelo incluye solo la etapa de operación. *Ecoinvent* no posee modelos de plantas solares de alto voltaje y trata a todas las instalaciones solares de la misma manera.

d) Modelo de planta de biogás

El modelo de una planta de biogás incluyó: 1) construcción de la planta de biogás, 2) suministro de biogás y 3) operación y mantenimiento de la planta de biogás. La construcción y los componentes de la planta de biogás fueron modelados para una planta de 1 MWe. El suministro de biogás proviene de efluentes residuales y estiércol, pues no hay un proceso para rellenos sanitarios. Durante la operación y mantenimiento se consideran emisiones de metano que se escapan de las tuberías y emisiones de dióxido de carbono, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, dióxido de sulfuro, y compuestos orgánicos volátiles que se dan por combustión.

e) Modelo de la planta geotérmica

Para modelar la planta geotérmica se utilizó el modelo de una planta binaria de un sistema mejorado. Los sistemas geotérmicos mejorados representan los mayores avances en plantas geotérmicas. El modelo considera las siguientes etapas: 1) construcción de una planta geotérmica y 2) operación y mantenimiento de la planta geotérmica. Durante la operación y mantenimiento se consideran: el consumo de benceno como materia prima para el ciclo orgánico y las emisiones de benceno al medio ambiente. Se usó el valor por defecto del modelo del poder calorífico de la energía geotérmica (7.14 MJ/kWh), asumiendo que la eficiencia térmica de la planta es del 14%.

f) Modelo de cogeneración

El modelo base para Guatemala se fundamenta en el sistema de producción de Brasil. Dicho modelo tiene cuatro subproductos: azúcar, etanol, electricidad y bagazo. Puesto que la electricidad generada en Guatemala es un subproducto de la producción de azúcar, el modelo de Brasil es adecuado para utilizarlo de referencia. Todos los insumos para cogenerar en un ingenio azucarero fueron considerados: 1) construcción de la planta de cogeneración, 2) operación y mantenimiento de la planta de cogeneración, 3) producción agrícola de caña de azúcar, 4) transporte de caña de azúcar, y 5) tratamiento de desechos sólidos.

Durante la producción agrícola de caña de azúcar, el modelo incluye todas las actividades agrícolas como aplicación de fertilizantes y pesticidas, combustible y energía requeridos para la siembra y las actividades de cosecha. En cuanto a la cosecha, se estima que un 20% se realiza por medios mecánicos y el 80% de forma manual. Esto incluye las emisiones asociadas con los sistemas de cosecha, incluyendo emisiones por la roza de los cañaverales.

g) Modelo de plantas térmicas búnker (*Fuel oil* No. 6)

Para el modelo de una planta térmica (motores reciprocantes) usando combustible búnker (*fuel oil* No. 6), se utilizó una planta genérica de 500 MW con tecnología promedio para el 2012. El modelo incluyó las siguientes etapas: 1) construcción de planta térmica; 2) suministro de *fuel oil* No. 6; 3) operación de una refinería de petróleo en Estados Unidos; 4) operación y mantenimiento de planta térmica; y 5) tratamiento de residuos sólidos (cenizas, aceite, etc.). El modelo incluye el consumo energético, químicos y emisiones ambientales. También considera el agua y las pérdidas de vapor necesarias para el enfriamiento y para el circuito de vapor.

Para determinar la cantidad de búnker necesario para producir 1 kWh de energía eléctrica, primero fue necesario establecer el poder calorífico del búnker. Según el MEM, el poder calorífico del búnker usado en las plantas térmicas de Guatemala es de 42.6 MJ/kg (Anexo 11). Según la literatura, la eficiencia de combustión reportada para plantas térmicas con motores reciprocantes es del 30%. Con esta información es posible estimar la cantidad de búnker necesario para la producción de 1 kWh o 3.6 MJ de energía:

$$Eficiencia = \frac{E\ salida}{E\ ingreso}$$

$$30\% = \frac{3.6\ MJ}{E\ ingreso}$$

$$E\ ingreso = \frac{3.6\ MJ}{0.30} = 12\ \text{MJ}$$

$$12\ MJ \times \frac{kg}{42.6\ \text{MJ}} = 0.282\ \text{kg búnker}$$

h) Modelo de plantas térmicas de carbón

El modelo de la planta térmica de carbón incluye las siguientes etapas: 1) operación y mantenimiento de una mina de carbón en Colombia, 2) suministro de carbón desde Colombia a Guatemala, 3) construcción de una planta de carbón de 100 MW[3], 4) operación y mantenimiento de la planta de carbón, y 5) tratamiento de desechos.

Para poder estimar la cantidad de carbón necesario para producir 1 kWh de energía eléctrica fue necesario conocer el poder calorífico del carbón usado en plantas térmicas guatemaltecas. En Guatemala, se importa hulla-bituminosa de Colombia, la cual posee un menor contenido de carbón que la antracita y un poder calorífico más bajo (Olade, 2014). El 80% del carbón colombiano es producido en las regiones de Guajira y Cesar, localizadas en la vertiente del Atlántico de Colombia (Upme, 2012). El poder calorífico de

3 En Guatemala, hay un total de 585 MW de plantas de carbón instaladas, las cuales tienen una potencia de placa promedio de 97 MWe y un factor de planta promedio de 63%.

la hulla bituminosa de estas regiones es reportado en 27 MJ/kg (Upme, 2012). Las plantas térmicas usadas en Guatemala, según la AMM (2015), son las turbinas de vapor. La eficiencia reportada para plantas térmicas de combustión de ciclo convencional es del 35% (Tester *et al.,* 2012). Para determinar la cantidad de carbón necesario para producir 1kWh de energía eléctrica, se utilizó la eficiencia de combustión. De tal manera, por cada 1 kWh = 3.6 MJ de energía, es necesario:

$$Eficiencia = \frac{E\ salida}{E\ ingreso}$$

$$35\% = \frac{3.6\ MJ}{E\ ingreso}$$

$$E\ ingreso = \frac{3.6\ MJ}{0.35} = 10.29\ \text{MJ}$$

$$10.29\ MJ x \frac{kg}{27\ \text{MJ}} = 0.381\ \text{kg carbón}$$

Para representar la extracción de hulla bituminosa en Colombia, se seleccionó un proceso de sistema de una mina de carbón a cielo abierto. En este modelo, todas las emisiones por la extracción de carbón y el tratamiento de los desechos de carbón son incluidos. Para representar el suministro de hulla bituminosa desde Colombia hacia Guatemala, se determinó con *Google Earth* una distancia de 1,700 km por vía marítima. Por lo tanto, el proceso de transporte marítimo que incluye sus emisiones asociadas se adaptó de la siguiente manera:

$$T_{mar} = m x d$$

$$T_{mar} = 0.001\ t\ x\ 1{,}700\ km$$

$$T_{mar} = 1.7\ \text{tkm}$$

Donde:

T = transporte (tkm)

m=masa (toneladas)

d=distancia (km)

Igualmente, para adaptar el proceso de transporte terrestre con un camión de carga se utilizó una distancia de 345 km (300 km de Guajira a Puerto Bolívar y 45 km desde Puerto Quetzal hacia las plantas térmicas de Escuintla).

i) Modelo de plantas térmicas diésel

La planta térmica diésel se modeló usando el modelo de un generador de 10 MW; este modelo no incluye la construcción, únicamente la operación del generador. Los valores de emisiones y el poder calorífico se estimaron usando los valores por defecto de la base de datos *Ecoinvent 3.2 cut-off*.

j) Modelo de la red de transmisión y distribución

Para la red de transmisión y distribución (T&D) se consideraron: 1) construcción de la red de alta tensión (400 kV) México-Guatemala, 2) construcción de las redes de transmisión de alto (230 kV) y medio voltaje (138 kV), 3) construcción de la red distribución de bajo voltaje (69 kV), y 4) operación y mantenimiento de las redes.

Para estimar la cantidad de red de transmisión y distribución por kWh de electricidad, se usaron 11,400 GWh reportados para el 2016 (AMM, 2016),

y las distancias en km de las redes de T&D (CNEE, 2012). El tiempo de vida de la red se asumió en 50 años. Por lo tanto, los cálculos para estimar la cantidad de redes en km, por cada kWh de electricidad que se transmite y distribuye son los siguientes:

$$Red\ 400\ kV = \frac{71\ \text{km}}{11{,}400\ \frac{\text{GWh}}{\text{año}} \times \left(\frac{1{,}000{,}000\ \text{kWh}}{1\ \text{GWh}}\right) \times 50\ \text{años}} = 1.24\ E^{-10}\ \text{km/kwh}$$

$$Red\ 230\ kV = \frac{691\ \text{km}}{11{,}400\ \frac{\text{GWh}}{\text{año}} \times \left(\frac{1{,}000{,}000\ \text{kWh}}{1\ \text{GWh}}\right) \times 50\ \text{años}} = 1.20\ E^{-9}\ \text{km/kwh}$$

$$Red\ 138\ kv = \frac{321\ \text{km}}{11{,}400\ \frac{\text{GWh}}{\text{año}} \times \left(\frac{1{,}000{,}000\ \text{kWh}}{1\ \text{GWh}}\right) \times 50\ \text{años}} = 5.47\ E^{-10}\ \text{km/kwh}$$

$$Red\ 69\ kv = \frac{2{,}724.85\ \text{km}}{11{,}400\ \frac{\text{GWh}}{\text{año}} \times \left(\frac{1{,}000{,}000\ \text{kWh}}{1\ \text{GWh}}\right) \times 50\ \text{años}} = 4.78\ E^{-9}\ \text{km/kwh}$$

Se consideraron las pérdidas de energía eléctrica por autoconsumo, transporte y distribución. El valor de pérdidas por autoconsumo se estima en un 3%; por transporte, un 3%; y por distribución, en otro 3%; lo cual suma un total de 9%. Estos valores se incluyeron en el proceso de "Mix del SNI en Guatemala", en los procesos de la red de transmisión de alto voltaje y en la red de distribución de bajo voltaje.

k) Calidad de los datos, suposiciones y limitaciones de los inventarios de ciclo de vida en Guatemala

En Guatemala no existen fuentes de información de procesos de construcción e instalación de plantas de energía. Dicha información es considerada confidencial y raramente se hace pública. Debido a esta limitación, para las etapas de construcción e infraestructura se han usado los valores por defecto de la base de datos *Ecoinvent*, usando modelos de plantas europeas, mexicanas y sudamericanas. Esta información es considerada como estado del arte e incluyen tecnologías de control y mitigación de emisiones.

La adaptación de los modelos descritos previamente al contexto guatemalteco, se hizo con la participación de expertos del sector académico, público y privado durante una serie de talleres de validación en la Universidad Rafael Landívar. Se espera que los modelos de análisis de ciclo de vida aquí presentados puedan ir mejorando conforme se adopte esta metodología en los diferentes sectores del país.

El uso de algunas suposiciones es común en la práctica de los ACV, por lo tanto acá se presentan aquellas relevantes para el sistema de análisis. En primer lugar se asume que los sistemas de cogeneración en Guatemala no alternan el combustible. O sea, todo el combustible utilizado para la cogeneración de electricidad es bagazo de caña. Esta suposición se hace debido a que no se conoce la cantidad de combustible fósil que es utilizado para contrarrestar la falta de bagazo durante las épocas que no hay zafra. A pesar de la falta de estudios referentes a las emisiones de plantas hidroeléctricas se asume que estas deben ser similares a las emisiones de metano y dióxido de carbono, por descomposición de biomasa que sucede en regiones tropicales. La tabla 17 describe los parámetros y suposiciones realizadas en el estudio para estimar los impactos de ciclo de vida.

5.2.3 Fase 3: evaluación de impactos

a) Categorías de impacto del método *CML[4] baseline*

Para la evaluación de impactos se utilizó el método CML (Línea Base) 2001, desarrollado por la Universidad de Leiden en Holanda, para evaluar los impactos ambientales del ciclo de vida. Este método presenta 12 categorías de impacto, que se describen en la tabla 18 junto con su unidad de referencia y acrónimo. Los modelos de caracterización y las rutas de impacto están descritos en el manual operativo CML (Guinée, 2002).

4 CML es el Instituto de Ciencias Ambientales de la Universidad de Leiden, Holanda. Es un centro de investigación y educación, especializado en temas de sostenibilidad y gobernanza de recursos naturales y biodiversidad.

Tabla 17. Parámetros y suposiciones para la elaboración del modelo ACV del Sistema Nacional Interconectado

Variable	Unidad	Cantidad	Descripción
Cogeneración			
Combustible utilizado			100 % Bagazo de caña
Carbón (hulla bituminosa)			
Poder calorífico	MJ/kg	27	
Eficiencia	%	35	
Transporte terrestre	Km	300	Minas en la región César hacia el Puerto de Cartagena, Colombia
Transporte marítimo	km	1,700	Cartagena a Puerto Quetzal, Guatemala
Transporte terrestre	kn	45	Puerto Quetzal hacia las plantas térmicas de la Costa Sur
Operación de mina			Se considera una mina a cielo abierto
Búnker C (fuel oil No. 6)			
Poder calorífico	MJ/Kg	43	
Transporte (marítimo)	Km	2,133	Distancia Houston - Guatemala
Hidroeléctrica			
Emisiones de metano	kg/kWh	0.00136	Basados en Hertwich, 2013
Emisiones de CO_2	kg/kWh	0.0285	Basados en Hertwich, 2013
Eólica			
Turbinas >3MW			
Solar			
Paneles	kWp	570	Instalación en el suelo a cielo abierto
T&D			
Distancia red 400kV	km	71	Distancia México-Guatemala, CNEE 2012
Distancia red 230kV	km	691	CNEE, 2012
Distancia red 138kV	km	312	CNEE, 2012
Distancia red 69kV	km	2,724	CNEE, 2012
Años de vida de la red	años	50	
GWh transportados	GWh	11,400	Basado en AMM, 2016
Pérdidas bajo voltaje	%	3	Pérdidas en la red de bajo voltaje
Pérdidas alto Voltaje_	%	3	Pérdidas en la red de alto voltaje
Pérdidas sistema (autoconsumo)	%	3	Carga parasítica

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18. Categorías de impacto que conforman la línea base del método CML 2001

Nombre	Acrónimo	Unidad de Referencia	Descripción
Potencial de Acidificación	AP	kg SO_2-eq	Esta categoría de impacto cuantifica la capacidad de acidificar el medio ambiente. La unidad de referencia utilizada es kilogramos equivalentes de dióxido de azufre (kg SO_2 eq). El dióxido de azufre es una de las sustancias más tóxicas que pueden producir la lluvia ácida. Por lo tanto, emisiones de otras sustancias como NO_x y NH_x que tienen el potencial para acidificar el medio ambiente, se estandarizan en relación al efecto de una molécula equivalente de dióxido de azufre. Los efectos en el medio ambiente por la acidificación, incluyen deterioro de infraestructura, impactos en cuerpos acuáticos superficiales, ecosistemas y organismos biológicos (Guinée, 2002). En términos químicos, el potencial de acidificación cuantifica la capacidad de las sustancias emitidas por unidad funcional de producir iones H+ en el medio ambiente.
Potencial de Calentamiento Global	GWP 100	kg CO_2 -eq	El potencial de calentamiento global (GWP por sus siglas en inglés) cuantifica la capacidad que tiene una sustancia de alterar el "forzamiento radiactivo" de la atmósfera a lo largo de 100 años. En términos más simples, este indicador mide el incremento en la capacidad de atrapar el calor en la atmosfera por la emisión de gases de efecto invernadero en el planeta, lo que también es conocido como la "huella de carbono". Este indicador ha sido estandarizado usando una unidad de kilogramo de dióxido de carbono equivalente (kg CO_2-eq), el cual incluye todas las emisiones de los gases de efecto invernadero (CO_2, CH_4, SO_x, NO_x, CO, VOCs y NVOCs). Los efectos por la emisión de gases de efecto invernadero en el planeta producen el calentamiento global y a su vez tienen efectos en la salud humana, cambios en los ciclos climáticos de la tierra, tormentas y sequías que afectan directamente a los organismos y ecosistemas del planeta.
Potencial de Agotamiento Abiótico de Recursos Minerales	ADP Elements	kg Sb-eq	Este indicador cuantifica el agotamiento de recursos no renovables como minerales y otros elementos puros en la corteza de la tierra. El modelo de caracterización está basado en tasas de extracción con relación al stock comercialmente disponible, y se mide en kilogramos equivalentes de antimonio.
Potencial de Agotamiento Abiótico de Recursos Fósiles	ADP Fossil	MJ	Mide el consumo de energía fósil primaria por el sistema de producción, y es expresado en megajoules (MJ), por unidad funcional.
Potencial de Eutrofización	EP	kg PO43-eq	Este indicador cuantifica los impactos asociados por la producción excesiva de macronutrientes (nitrógeno y fósforo), y su contribución con la formación de biomasa, independientemente si se emite a un medio acuático o terrestre. La eutrofización de ecosistemas acuáticos y terrestres puede ocasionar cambios en la composición de especies, y un incremento en la producción de biomasa en ecosistemas acuáticos y terrestres. Además, puede deteriorar la calidad del agua debido al incremento de demanda biológica de oxígeno, requeridas para la descomposición de materia orgánica. En términos más simples, el potencial de eutrofización mide el incremento de nutrientes en el medio ambiente, usando un kilogramo equivalente de fosfato (kg PO43-eq), como unidad de referencia.
Potencial de Deterioro de la Capa de Ozono	ODP	kg CFC-11	Mide el efecto de las emisiones atmosféricas en la disminución de la capa de ozono. Esto hace que una mayor fracción de rayos UV-B lleguen a la superficie de la tierra, ocasionando impactos en las tres áreas de protección: salud humana, ecosistemas y recursos naturales. La unidad de referencia es kilogramos equivalentes de clorofluorocarbono 11.
Potencial de Toxicidad Humana	HTP inf	kg 1,4- diclorobenzeno eq.	Mide el efecto de las emisiones ambientales potenciales de ocasionar efectos nocivos para la salud humana. El modelo de caracterización incluye la ruta causa-efecto, la transferencia, la exposición a la sustancia, el destino final y su efecto sobre algunas áreas de protección ambiental. La unidad de referencia es kilogramos equivalentes de clorofluorocarbono 11.
Potencial de Toxicidad de Ecosistemas de Agua Dulce	FAETP inf	kg 1,4- diclorobenzeno eq.	El presente indicador usa los límites de tolerancia de contaminación acuática, establecidos por la Agencia de Protección Ambiental (EPA), para evaluar el potencial de las emisiones que puedan ocasionar daños en los ecosistemas acuáticos, considerando que muchas de las emisiones ambientales, llegan a destinos diferentes del lugar donde se emitieron. La unidad de referencia es kilogramos equivalentes de clorofluorocarbono 11.
Potencial de Toxicidad de Ecosistemas Marinos	MAETP inf	kg 1,4-diclorobenzeno eq.	Este indicador utiliza los límites de tolerancia de contaminación acuática, establecidos por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) para evaluar las emisiones con potencial de ocasionar daños, en los ecosistemas marinos, considerando que muchas de las emisiones ambientales llegan a destinos diferentes del lugar donde se emitieron. La unidad de referencia es kilogramos equivalentes de clorofluorocarbono 11.
Potencial de Toxicidad de Ecosistemas Terrestres	TETP inf	kg 1,4- diclorobenzeno eq.	Esta categoría usa los límites de tolerancia de contaminación terrestre establecidos por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) para evaluar el potencial de las emisiones que puedan ocasionar daños en los ecosistemas terrestres; considerando que muchas de las emisiones ambientales llegan a destinos diferentes del lugar donde se emitieron. La unidad de referencia es kilogramos equivalentes de clorofluorocarbono 11.
Potencial de Formación Fotoquímica de Ozono	POCP	kg etileno eq.	El presente indicador cuantifica el potencial de producción de oxidantes fotoquímicos en la atmósfera. El ozono y el peroxiacetilnitrato son compuestos químicos con alta capacidad oxidativa. Por lo general, este tipo de compuestos químicos se forman por la acción de la luz UV, con compuestos orgánicos volátiles (VOCs) y monóxido de carbono, en la presencia de óxidos de nitrógeno (NOx). En otras palabras, este indicador evalúa el potencial de producir smog oxidativo en la atmósfera.
Uso del suelo - Competición	LUC	m_2 año	Esta categoría de impacto cuantifica la pérdida de tierra como un recurso con relación a su ocupación temporal.

Fuente: Guinée (2002)

b) Impactos ambientales de ciclo de vida por el suministro de 1 kWh de electricidad de bajo voltaje

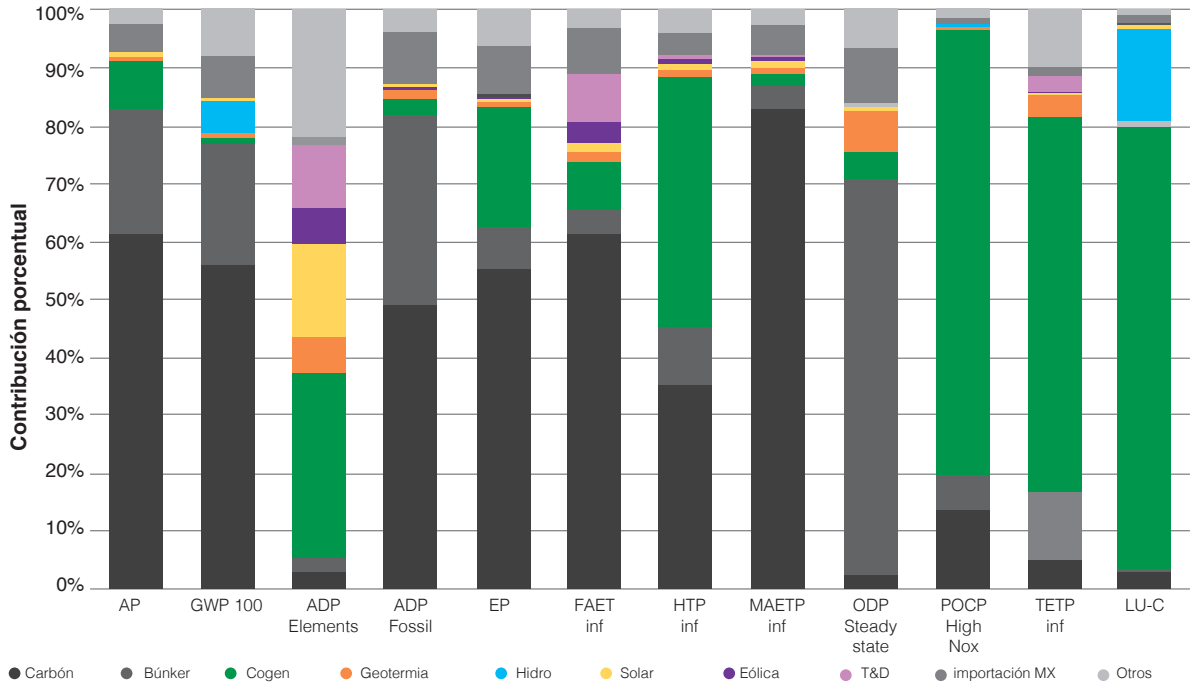
Los resultados de la evaluación de impacto se muestran en la tabla 19 organizados por categoría de impacto. Los indicadores representan el total por unidad funcional (1 kWh), por ejemplo, la categoría de impacto acidificación representa la generación de 0.004 kg equivalentes de dióxido de azufre al ambiente, por cada kWh de electricidad que se consume en el territorio de Guatemala. En otras palabras, la producción de 1 kWh de electricidad tiene un potencial de producir 0.004 kg de SO_2 equivalentes, que acidifican el medio ambiente. En la figura 31 se presenta la contribución porcentual de cada sistema de generación a cada categoría de impacto.

Tabla 19. Impactos ambientales del ciclo de vida por el suministro de 1 kWh de electricidad de bajo voltaje, en el territorio de Guatemala en 2016

Categoría de impacto	Acrónimo	Resultados	Unidad
Potencial de Acidificación	AP	0.004	kg SO_2 eq.
Potencial de Calentamiento Global	GWP 100	0.418	kg CO_2 eq.
Potencial de Agotamiento Abiótico de Recursos Minerales	ADP Elements	2.67E-07	kg antimonio eq.
Potencial de Agotamiento Abiótico de Recursos Fósiles	ADP Fossil	4.258	MJ
Potencial de Eutrofización	EP	7.41E-04	kg PO43-eq.
Potencial de Toxicidad de Ecosistemas de Agua Dulce	FAETP inf.	0.132	kg 1,4-diclorobenceno eq.
Potencial de Toxicidad Humana	HTP inf.	0.287	kg 1,4-diclorobenceno eq.
Potencial de Toxicidad de Ecosistemas Marinos	MAETP inf.	549.205	kg 1,4-diclorobenceno eq.
Potencial de Deterioro de la Capa de Ozono	ODP	2.59E-08	kg CFC-11 eq.
Potencial de Formación Fotoquímica de Ozono	POCP	5.29E-04	kg etileno eq.
Potencial de Toxicidad de Ecosistemas Terrestres	TETP	0.007	kg 1,4-dichlorobenzene eq.
Uso del Suelo - Competición	LU-C	0.07921	m_2 año

Fuente: Elaboración propia

Figura 31. Contribución porcentual de los sistemas de generación en cada categoría de impacto, en la cadena de suministro de electricidad en Guatemala (2016)



AP = Potencial de acidificación
ADP Elements = Potencial de Agotamiento Abiótico de Recursos Minerales
EP = Potencial de eutrofización
HTP inf = Potencial de Toxicidad Humana
ODP = Potencial de Deterioro de la Capa de Ozono
TETP inf = Potencial de Toxicidad de Ecosistemas Terrestres
T&D = Transmisión y Distribución de Electricidad
GWP100 = Potencial de Calentamiento Global
ADP Fossil = Potencial de Agotamiento Abiótico de Recursos Fósiles
FAETP inf = Potencial de Toxicidad de Ecosistemas de Agua Dulce
MAETP inf = Potencial de Toxicidad de Ecosistemas Marinos
POCP High NOx = Potencial de Formación Fotoquímica de Ozono
LU-C = Uso del Suelo
Importación MX = Electricidad de Alto Voltaje importada de México.

Fuente: Elaboración propia

Los resultados muestran que la mayoría de los impactos por el suministro de electricidad provienen de la generación de energía eléctrica con plantas térmicas de carbón y búnker (colores gris claro y oscuro en la figura 31). Las plantas térmicas de carbón (color gris oscuro), contribuyen con más del 50% de los impactos en las categorías de potencial de acidificación (AP), potencial de calentamiento global (GWP100), potencial de agotamiento abiótico de recursos fósiles (ADP fossil), potencial de eutrofización (EP), potencial de toxicidad de ecosistemas de agua dulce (FAETP inf.) y potencial de toxicidad de ecosistemas marinos (MAETP inf.). Las plantas térmicas de búnker contribuyen con el 80% del potencial de deterioro de la capa de ozono (ODP Steady state).

Los sistemas de cogeneración contribuyen con el 80% de impactos por uso del suelo (LU-C), el 75% del potencial de formación fotoquímica de ozono (POCP High NO_x) 60% de toxicidad de ecosistemas terrestres (TETP inf.), 40% de toxicidad humana (HTP), 30% del potencial de agotamiento abiótico de recursos minerales (ADP Elements) y 20% del potencial de eutrofización.

Las plantas solares, geotérmicas y eólicas tienen un efecto del 6 al 15% en el potencial de agotamiento abiótico de recursos minerales (ADP Elements). La construcción de las redes de transmisión y distribución contribuyen también con el 10% del potencial agotamiento de recursos minerales.

Por otro lado, las hidroeléctricas únicamente presentan un efecto sobre el potencial de calentamiento global (GWP100) y uso de suelo (LU-C).

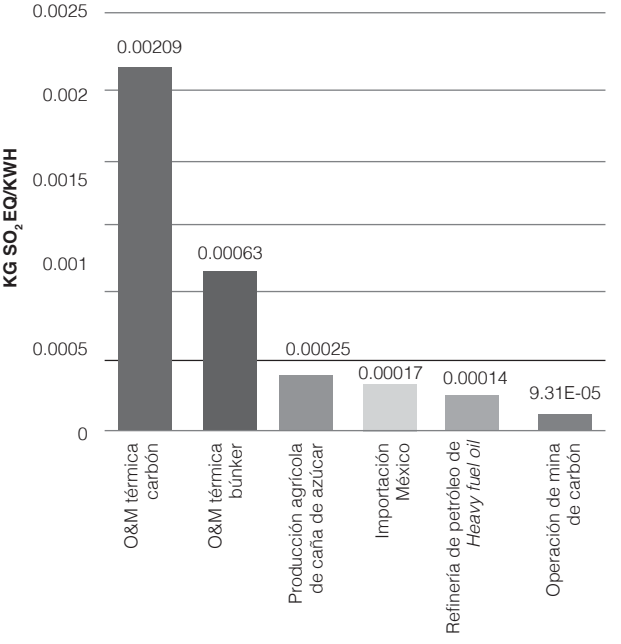
La figura 31 también muestra que la importación de electricidad de México contribuye del 4 al 9% en todas las categorías de impacto. Es posible que esto sea resultado del alto porcentaje de combustibles fósiles usados en la matriz de electricidad mexicana.

Para identificar cuáles son los procesos que contribuyen con cada una de las categorías de impacto se presenta un análisis "hot spot" que identifica los procesos de la cadena de suministro que producen la mayor cantidad de impactos ambientales.

c) Análisis *hot spots*

Potencial de acidificación (AP): Los impactos potenciales de acidificación al medio ambiente se deben principalmente a los procesos de combustión de materia fósil; en primer lugar, durante la operación de una planta térmica de carbón, y en segundo lugar durante la operación de una planta térmica de búnker. Estos procesos de combustión emiten una cantidad significativa de óxidos de nitrógeno (NO_x) y óxidos de azufre SO_x. Los NOx y SOx son los principales compuestos químicos que reaccionan con el agua, oxígeno y otros compuestos químicos en la atmósfera para formar la lluvia ácida. La figura 32 muestra el detalle de dichos impactos.

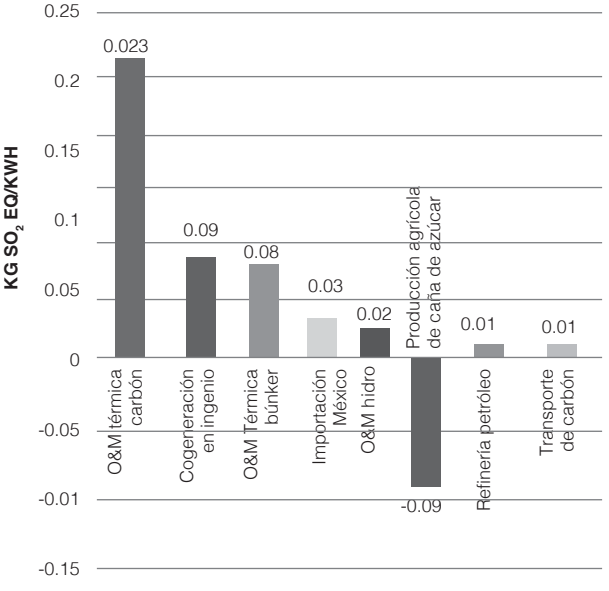
Figura 32. Procesos que contribuyen con la categoría potencial de acidificación (AP), en kg SO_2 eq/kWh, por la cadena de suministro de electricidad en Guatemala (2016)



Fuente: Elaboración propia

Potencial de calentamiento global (GWP 100): Los principales procesos que contribuyen a los efectos de cambio climático se muestran en la figura 33. La combustión de carbón y búnker produce emisiones de dióxido de carbono (CO_2). La producción de caña de azúcar tiene un aporte negativo a esta categoría debido a la fijación de carbono de los cultivos. La hidroelectricidad, a pesar de que es considerada una energía limpia, contribuye con emisiones de dióxido de carbono y de metano (CH_4) provenientes de biomasa que se descompone en el embalse de represas.

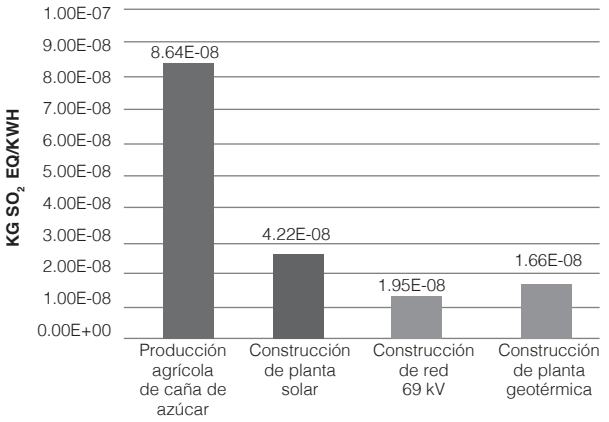
Figura 33. Procesos que contribuyen en la categoría de Potencial de calentamiento global (GWP 100), en kg de CO_2 eq/kWh, por la cadena de suministro de electricidad en Guatemala (2016)



Fuente: Elaboración propia

Potencial de agotamiento abiótico de recursos minerales (ADP Elements): La figura 34 muestra que la etapa agrícola de la caña de azúcar es el proceso que contribuye en mayor proporción a esta categoría de impacto, ya que la caña de azúcar absorbe minerales de la tierra durante su crecimiento. La construcción de plantas solares, redes de T&D y plantas geotérmicas también tienen un efecto significativo en esta categoría de impacto. La construcción de infraestructura para las plantas solares, geotérmicas y la red de distribución (69 kV) usa metales como cadmio, plomo, cromo, cobre y plata, que deben ser extraídos de la corteza de la Tierra para fabricar cables de distribución, componentes electrónicos, cajas de distribución, inversores y tuberías.

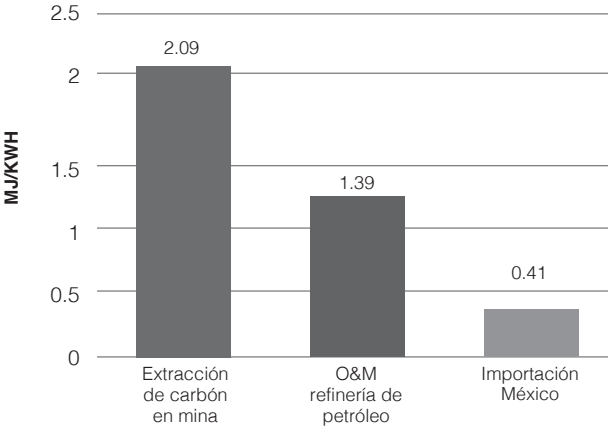
Figura 34. Procesos que contribuyen al potencial de agotamiento abiótico de recursos minerales (ADP Elements), en kg de Sb eq/kWh, en la cadena de suministro de electricidad en Guatemala (2016)



Fuente: Elaboración propia

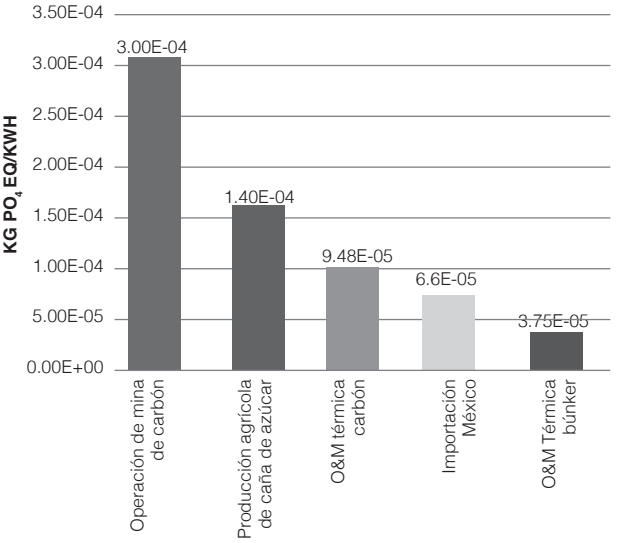
Potencial de agotamiento abiótico de recursos fósiles (ADP Fossil): La figura 35 exhibe los procesos con mayor impacto en esta categoría. La extracción de carbón en minas ubicadas en Colombia, la producción de hidrocarburos en refinerías de petróleo y la importación de electricidad en México, agotan las fuentes de energía como carbón mineral, gas natural y petróleo de la naturaleza.

Figura 35. Procesos que contribuyen con el potencial de agotamiento abiótico de recursos fósiles (ADP Fossil), en MJ/kWh, por la cadena de suministro de electricidad en Guatemala (2016)



Fuente: Elaboración propia

Figura 36. Procesos que contribuyen al Potencial de Eutrofización (EP), en kg PO_4 eq/kWh, en la cadena de suministro de electricidad en Guatemala (2016)



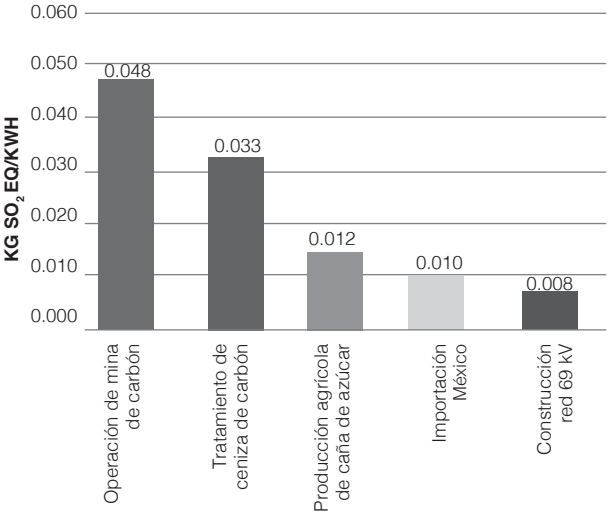
Fuente: Elaboración propia

Potencial de eutrofización (EP): La extracción de carbón en minas a cielo abierto es el proceso que contribuye en mayor proporción a los impactos potenciales de eutrofización. En esta etapa se producen desechos minerales que son depositados en la tierra. La lluvia provoca el drenaje ácido característico de operaciones mineras, lo cual contribuye a un enriquecimiento de nutrientes en el medio ambiente.

El drenaje de agroquímicos durante la producción agrícola de caña de azúcar genera emisiones de fosfatos y nitratos a ríos y cuerpos acuáticos. La combustión de búnker y de carbón también libera emisiones de óxido de nitrato que contribuyen con la eutrofización de ambientes acuáticos y terrestres. La contribución de estos procesos se presenta en la figura 36.

Potencial de toxicidad de ecosistemas de agua dulce (FAETP): La operación de una mina de carbón a cielo abierto y el tratamiento de las cenizas de carbón luego de la combustión son procesos que producen emisiones de níquel, berilio, vanadio y cobalto. Dichas emisiones eventualmente drenan hacia acuíferos y producen daños en los ecosistemas de agua dulce. Adicionalmente, los pesticidas usados durante la etapa agrícola de producción del azúcar producen emisiones de aldrin, linurón y atrazina que son sumamente contaminantes en el suelo y ocasionalmente también drenan hacia ríos y otros cuerpos acuáticos superficiales. La construcción de la red de distribución de 69 kV produce emisiones de cobre que llegan directamente al agua. Los impactos descritos anteriormente pueden verse en la figura 37.

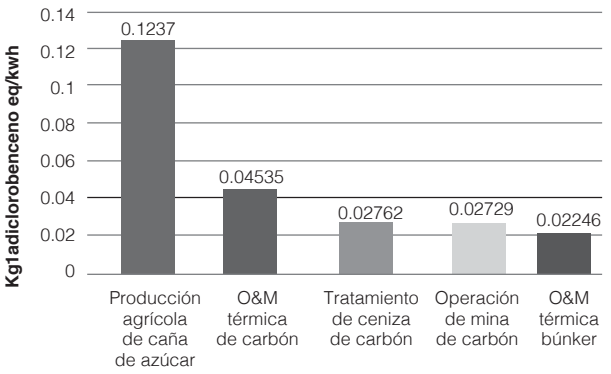
Figura 37. Procesos que contribuyen al Potencial de Toxicidad de Ecosistemas de Agua Dulce (FAETP), en kg 1,4-diclorobenceno eq/kWh, por la cadena de suministro de electricidad en Guatemala (2016)



Fuente: Elaboración propia

Potencial de toxicidad humana (HTP): En la figura 38 se observan los procesos con mayor contribución a esta categoría de impacto. Las emisiones de aldrin, pesticida de uso común durante la producción agrícola de caña de azúcar, son sumamente nocivas para la salud humana. Por otra parte, la combustión de carbón produce emisiones de fluoruro de hidrógeno, gas que irrita las vías respiratorias, los ojos y la piel. Metales como el níquel, vanadio, cromo y arsénico también son liberados como partículas en suspensión durante los procesos de combustión de combustibles fósiles. Estos metales producen efectos carcinogénicos en las vías respiratorias, los riñones y la piel; además, pueden afectar el sistema nervioso y cardiovascular. Adicionalmente, la ceniza de carbón y los desechos de la extracción de una mina producen emisiones de metales como níquel, berilio, bario, vanadio, talio, selenio y molibdeno hacia los mantos freáticos de la Tierra y son nocivos para la salud humana.

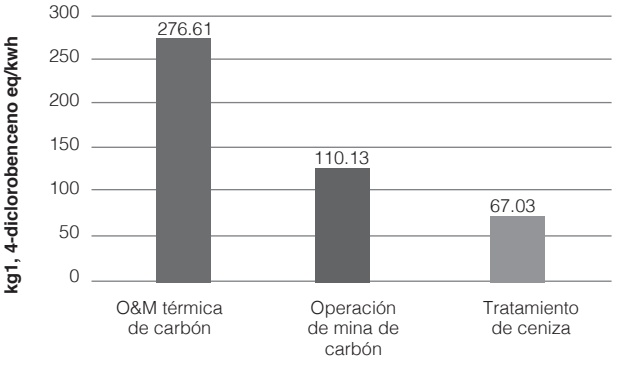
Figura 38. Procesos que contribuyen al Potencial de Toxicidad Humana (HTP), en kg 1,4-diclorobenceno eq/kWh, por la cadena de suministro de electricidad en Guatemala (2016)



Fuente: Elaboración propia

Potencial de toxicidad de ecosistemas marinos (MAETP): Las emisiones de fluoruro de hidrógeno por la combustión de carbón ocasionan daños en los ecosistemas marinos. El drenaje ácido producido por los desechos de la mina de carbón también produce una alta concentración de metales pesados como el berilio, el níquel, el cobalto y el selenio. Estos elementos, después de ingresar a los mantos freáticos y cuerpos de agua superficiales, llegan posteriormente al océano. Las cenizas de la combustión de carbón además, producen metales como el berilio y el vanadio que terminan en acuíferos del subsuelo. Los procesos que causan más toxicidad en los ecosistemas marinos se presentan en la figura 39.

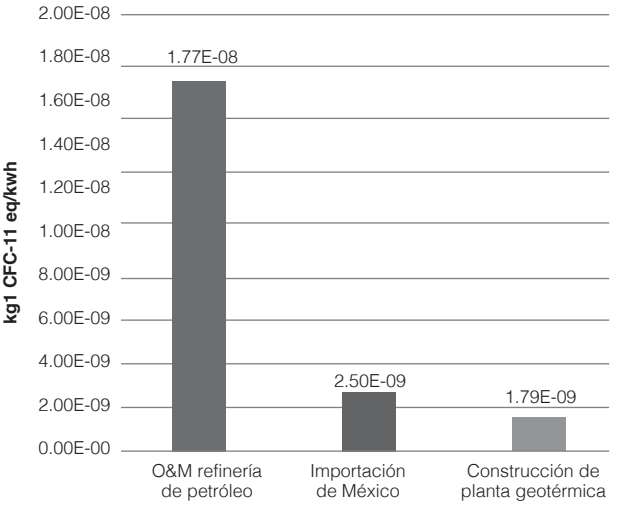
Figura 39. Procesos que contribuyen al Potencial de Toxicidad de Ecosistemas Marinos (MAETP), en kg 1,4-diclorobenceno eq/kWh, por la cadena de suministro de electricidad en Guatemala (2016)



Fuente: Elaboración propia

Potencial de deterioro de la capa de ozono (ODP): Durante la refinación de petróleo se producen emisiones de bromotrifluorometano (también conocido como halón 1301). Este es un gas utilizado como refrigerante y en la prevención de incendios por fugas de gas natural. El halón 1301 ocasiona daños en la capa de ozono; por lo que su uso como refrigerante está siendo desfasado. Por otro lado, la importación de energía desde México es el segundo proceso que tiene mayor impacto potencial en el deterioro de la capa de ozono, como consecuencia de su alto porcentaje de generación a partir de combustibles fósiles. Por último, el proceso de construcción de plantas geotérmicas es el tercer contribuyente de esta categoría. La figura 40 muestra los procesos que más impacto tienen en cuanto al agotamiento de la capa de ozono.

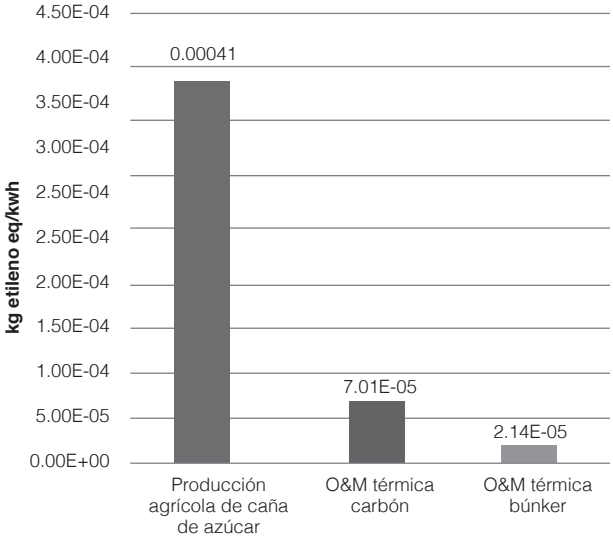
Figura 40. Procesos que contribuyen con el Potencial de Deterioro de la Capa de Ozono, en kg CF-11 eq/kWh, en el suministro de electricidad en Guatemala (2016)



Fuente: Elaboración propia

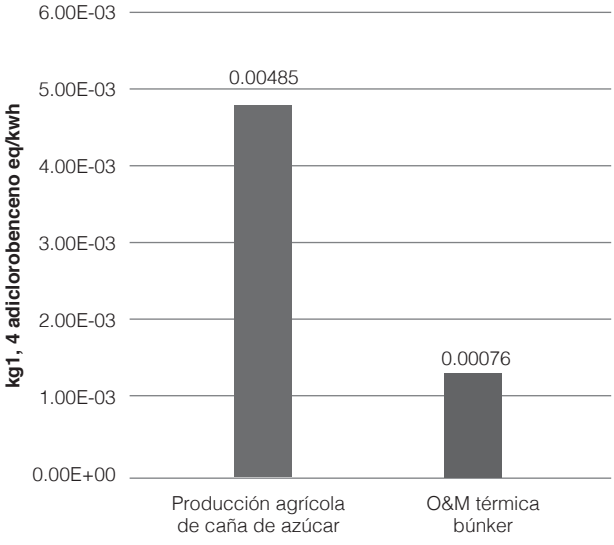
Potencial de formación fotoquímica de ozono (POCP): En la figura 41 se observa el efecto de la etapa agrícola en esta categoría de impacto. Esto es ocasionado por emisiones de monóxido de carbono (CO) que se producen por la quema de caña. La combustión de carbón y búnker también produce emisiones de CO.

Figura 41. Procesos que contribuyen al Potencial de Formación Fotoquímica de Ozono (POCP), en kg etileno eq/kWh, por el suministro de electricidad en Guatemala (2016)



Fuente: Elaboración propia

Figura 42. Procesos que contribuyen a la categoría de Potencial de Toxicidad de Ecosistemas Terrestres (TETP), en kg 1,4-diclorobenceno eq/kWh, por la cadena de suministro de electricidad en Guatemala (2016)

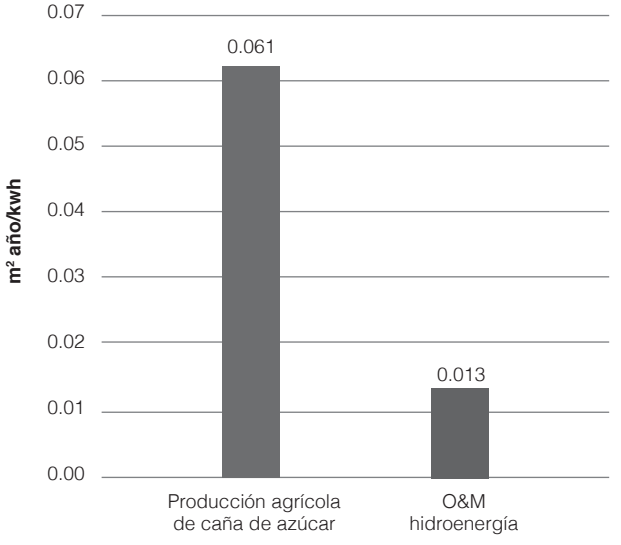


Fuente: Elaboración propia

Potencial de Toxicidad de Ecosistemas Terrestres (TETP): La figura 42 exhibe los procesos con mayor contribución a esta categoría de impacto. La etapa de producción agrícola de caña de azúcar genera emisiones de arsénico y cromo al suelo. Estos metales pesados están presentes en herbicidas, fungicidas y pesticidas y tienen un efecto negativo sobre los ecosistemas terrestres.

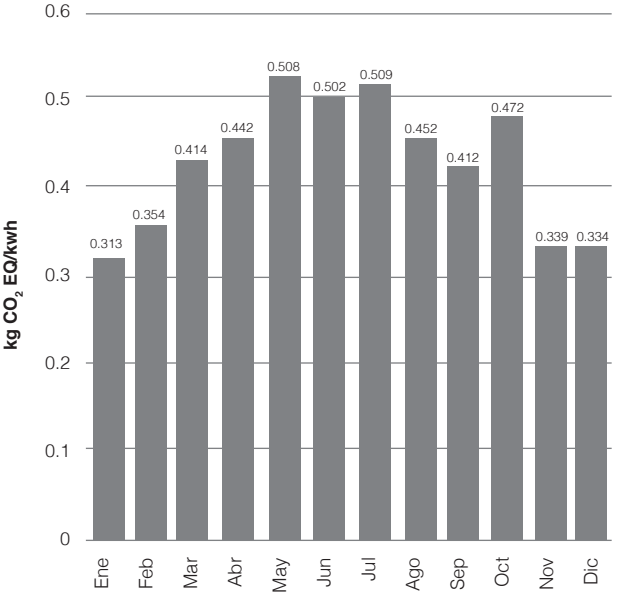
Uso del suelo (LU-C): La figura 43 muestra los procesos más significativos que contribuyen con el uso del suelo por unidad funcional. Los sistemas de cogeneración utilizan 0.06 m^2 al año por kWh de electricidad, que proviene de la etapa agrícola durante el cultivo de caña. Por otro lado, la construcción de represas hidroeléctricas produce una transformación del suelo.

Figura 43. Procesos que contribuyen al uso de suelo (LU-C), en m²-año/kWh, en la cadena de suministro de electricidad en Guatemala (2016)



Fuente: Elaboración propia

Figura 44. Potencial de Calentamiento Global (GWP 100), en kg CO_2 eq/kWh y su variación estacional durante el año 2016



Fuente: Elaboración propia

d) Variación estacional de la huella de carbono, 2016

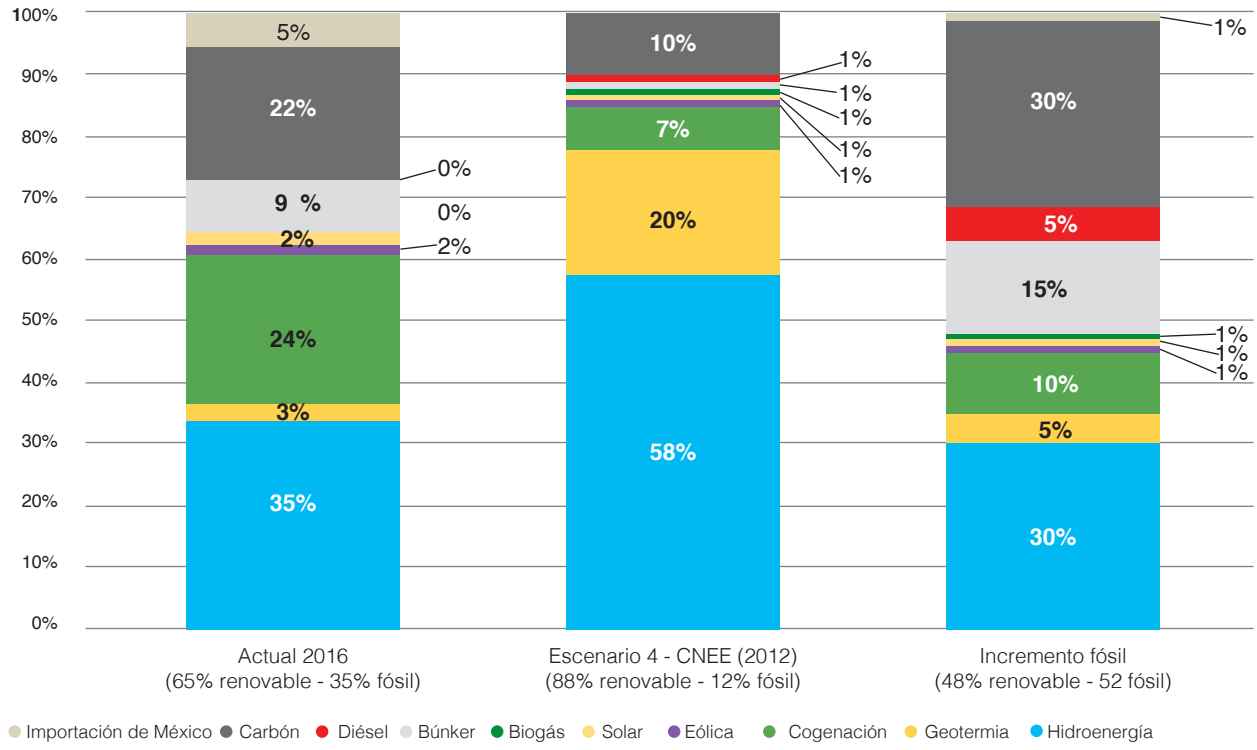
Para entender los efectos de la variación estacional en las emisiones de gases de efecto invernadero se evaluaron los cambios para 2016. Los resultados que se observan en la figura 44 muestran que la huella de carbono puede alcanzar valores mayores a los 0.500 kg de CO_2 eq. por kWh, en los meses de mayo a julio, y puede ser tan bajo como 0.310 kg de CO_2 eq. por kWh en los meses de diciembre y enero.

e) Efecto de los escenarios de expansión 2026, en la huella de carbono de la electricidad

Para ayudar en el proceso de toma de decisiones sobre las tecnologías apropiadas para la mitigación del cambio climático se evaluaron los efectos potenciales de los planes de expansión del SNI (CNEE, 2012). El plan de expansión hacia 2026 plantea seis escenarios de incremento en la potencia instalada.

El análisis mostrado a continuación presenta tres escenarios: a) como año base se usó el escenario actual de 2016; b) el escenario 4 del plan de expansión del SNI (CNEE, 2012), el cual propone un incremento en la potencia geotérmica al 20% y un incremento en la hidroelectricidad al 58%; y c) un escenario hipotético con incremento de combustibles fósiles a un 50%. Los tres escenarios se muestran en la figura 45.

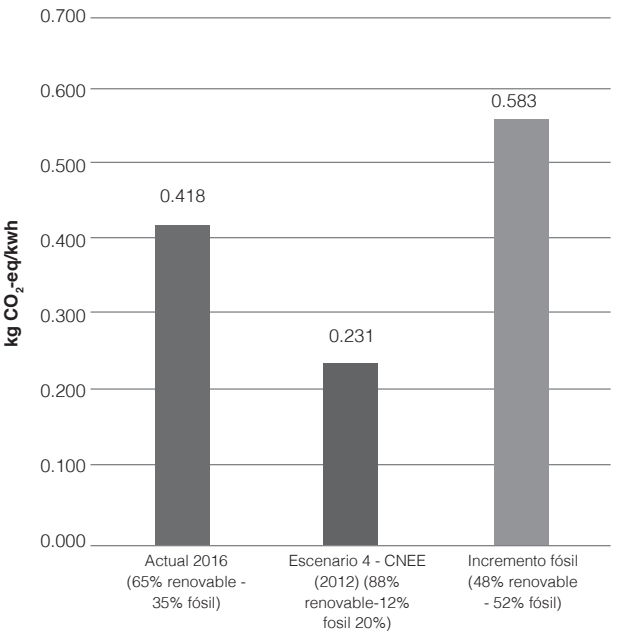
Figura 45. Composición porcentual de tres escenarios del SNI. El escenario actual usa la composición del SNI en el 2016. El escenario 4 usa el modelo descrito por la CNEE (2012) y el escenario de incremento de energía no renovable es hipotético



Fuente: Elaboración propia

Los resultados del análisis (figura 46), evidencian que en el escenario 4 se produce una reducción en los efectos sobre el cambio climático de 0.418 a 0.213 CO_2eq, lo cual representa una disminución de emisiones de más del 50%; mientras que un incremento en la participación de combustibles fósiles aumentaría a 0.583 CO_2eq, lo que representa un incremento del 28% en las emisiones de gases de efecto invernadero.

Figura 46. Potencial de Calentamiento Global (GWP 100) en kg de CO_2 eq/kWh, de los tres escenarios del 2026, propuestos en la categoría de cambio climático



Fuente: Elaboración propia

5.2.4 Fase 4: interpretación de resultados

a) Impactos ambientales de ciclo de vida por el suministro de 1 kWh de electricidad de bajo voltaje

Los resultados del ACV demuestran que los sistemas energéticos del SNI más dañinos para el medio ambiente son aquellos que utilizan combustibles fósiles (carbón y búnker, figura 31), ya que contribuyen con la mayor proporción y al mayor número de categorías de impacto. La contribución porcentual hacia las categorías de impacto es alta si se considera que constituyen el 20% del total del SNI (figura 18).

En segundo lugar, los sistemas de cogeneración contribuyen con más del 60% de los impactos a las categorías de formación de oxidación fotoquímica, toxicidad de ecosistemas terrestres, uso del suelo y contribuyen con el 40% de impactos de agotamiento de recursos minerales y toxicidad humana (figura 31). Estos impactos no consideran el porcentaje de combustibles fósiles usados por los sistemas de cogeneración para suplementar la falta de biomasa en la época de no zafra. Debido a la demanda de metales necesarios para su fabricación, los sistemas de energía renovable como plantas solares, geotérmicas y eólicas contribuyen con el agotamiento de recursos minerales. Finalmente, importar electricidad de la red mexicana agrega los costos ambientales de la producción en su país de origen.

b) Identificación de *hot spots*

El análisis *hot spot* permitió identificar las etapas críticas dentro de las cadenas de suministro de los diferentes sistemas energéticos que integran el Sistema Nacional Interconectado. En total, se identificaron tres *hot spots* ambientales o puntos críticos que se describen a continuación.

O&M de plantas térmicas de carbón y búnker: La operación de plantas térmicas con combustibles fósiles de carbón (hulla bituminosa) y búnker, produce emisiones ambientales que tienen efectos de acidificación, cambio climático, eutrofización, formación de oxidantes fotoquímicos, toxicidad humana y de ecosistemas marinos. La producción de NO_x, SO_x, CO_2

y partículas de metales pesados, durante la combustión de combustibles fósiles, son los responsables de la alta contribución a estas categorías de impacto.

Extracción de carbón en mina de Colombia: La extracción de carbón en Colombia tiene efectos adversos debido al agotamiento de recursos fósiles, potencial de eutrofización, toxicidad de ecosistemas de agua dulce y ecosistemas marinos. Por lo general, la lluvia produce drenaje ácido de los desechos por minería, que arrastra sustancias tóxicas para el medio ambiente y produce efectos adversos en ecosistemas, ríos y en la salud humana.

Producción agrícola de la caña de azúcar: A pesar de que los sistemas de cogeneración con biomasa (bagazo de caña) usan fuentes renovables y su combustión es un proceso carbono neutral, la etapa de producción agrícola de caña de azúcar realiza actividades de irrigación de fertilizantes, pesticidas, plaguicidas y herbicidas que producen impactos en el agotamiento de recursos minerales, uso del suelo, oxidación fotoquímica, toxicidad humana y ecosistemas terrestres. Estos impactos forman parte de la cadena de suministro del combustible para generar electricidad. Se podría argumentar que estos impactos se deben a la producción de azúcar y no al de la electricidad; sin embargo, el modelo de la base de datos *Ecoinvent* por defecto tiene distribuidas las cargas ambientales a los subproductos como azúcar, bagazo, vinaza, etanol y electricidad. Por lo tanto, los impactos asociados con el sistema de cogeneración representan una porción de los impactos totales del sistema de producción de azúcar, y son considerados como parte de la cadena de suministro.

c) Efectos sobre el cambio climático, variación estacional y los escenarios de expansión

El valor de la huella de carbono que se presenta en este trabajo de 0.418 kg CO_2-eq por kWh de electricidad de bajo voltaje, es un valor preliminar y puede estar subestimado. Como se mencionó anteriormente, en este estudio no se considera el porcentaje de combustibles fósiles que utilizan los sistemas de cogeneración cuando no hay disponible bagazo de caña. Por lo tanto, la huella de carbono por unidad funcional puede ser mayor.

Considerando los 0.418 kg de CO_2-eq por kWh, y el total de electricidad que se suministró en el año 2016, según la AMM de 11,446 GWh; se estima que se emitieron 4,795,534 toneladas de CO_2 eq por suministro de electricidad de bajo voltaje. Sin embargo, estos datos son menores a las 6,072,264 toneladas de CO_2 eq reportadas por el MEM.

Las diferencias entre el balance energético del MEM y el presente estudio son las siguientes: en primer lugar el factor de emisión del carbón mineral usado por el MEM es de 1.3173 kg CO_2 eq por kWh. Este factor de emisión es mucho mayor que el que se utilizó en el modelo de ciclo de vida (0.96 kg CO_2 eq por kWh). Esta diferencia puede ser causada por distintos valores de eficiencia de plantas de carbón, usados para el análisis. En segundo lugar, el método de estimación de emisiones por tecnología no está publicado en el balance energético y se desconoce de dónde obtuvieron los datos de la generación anual.

Por ejemplo, si se intenta multiplicar el factor de emisión reportado por el MEM de 1.3173 kg CO_2 eq por kWh por el total de 2,857 GWh que reporta la AMM para plantas térmicas de vapor (carbón) se obtiene un valor 3,764,482 toneladas; lo cual es mucho menor a lo que el MEM reporta para generación de electricidad con carbón mineral (5,217,203 toneladas). En tercer lugar, el MEM no considera las emisiones de dióxido de carbono y metano en embalses hidroeléctricos. Es sumamente importante que el MEM haga pública la metodología de estimación de emisiones por suministro de energía y electricidad para que sean útiles en otros sectores académicos y privados.

La variación climática produce una reducción en la disponibilidad de hidroelectricidad en los meses de enero a mayo. El ciclo de producción agrícola de la caña de azúcar también reduce la disponibilidad de biomasa en los meses de junio a septiembre. En ambos casos, las plantas térmicas con combustibles fósiles suplementan esta carencia de energía eléctrica renovable, lo que produce una variación en la huella de carbono que va desde 0.310 hasta 0.500 kg de CO_2 eq. por kWh. Este incremento en emisiones de gases de efecto invernadero afecta otras cadenas de suministro que utilizan electricidad como materia prima y, por lo tanto, debe ser considerado en los inventarios de GEI.

Al analizar los efectos de los tres escenarios se pueden observar los beneficios de aumentar la producción de energía eléctrica con fuentes renovables, específicamente incrementar la energía geotérmica, solar, eólica e hidroeléctrica; lo cual podría reducir la huella de carbono casi a la mitad. Por lo tanto, es recomendable que se busquen iniciativas para el desarrollo de energía geotérmica en el país.

5.3 Análisis de huella de agua

Los recursos hídricos son vitales para el bienestar de la humanidad y muchas de sus actividades económicas. El uso ineficiente de agua y la falta de estrategias de protección de este recurso han incrementado su deterioro, por lo cual se ha convertido en uno de los problemas ambientales más importantes que afectan a nuestra sociedad. En particular, en Guatemala el deterioro del agua ocasiona conflictividad social debido a las deficiencias ocasionadas por su mala gestión pública (Iarna-URL, 2012).

Según el perfil ambiental de Guatemala (Iarna-URL, 2012), más de 20,000 millones de m^3 de agua se utilizan con fines extractivos. En el área rural, hay un incremento en la demanda y actualmente solo el 58% de las familias tiene acceso a este recurso (Iarna-URL, 2012). Adicionalmente, 14 de los 38 ríos del país y cuatro de los lagos más importantes de Guatemala se encuentran altamente contaminados, lo cual está ocasionando un incremento de enfermedades humanas ligadas al deterioro de este recurso (Iarna-URL, 2012).

Debido a esta problemática, es necesario que en Guatemala se empiecen a utilizar herramientas de gestión ambiental que utilicen una perspectiva de ciclo de vida para disminuir los impactos a los recursos hídricos debido a las actividades del sector industrial. Por lo tanto, la huella de agua (ISO 14046:2014) está basada en las normas ISO 14040 y 14044.

Debido a que en Guatemala no existe hasta el momento una metodología establecida para evaluar la huella de agua tampoco publicaciones al respecto en esta sección, se introdujo el concepto de huella de agua, se describió el estado del arte de la metodología y se presentó una guía para su aplicación en Guatemala. A continuación, se presenta el análisis de huella de agua del Sistema Nacional Interconectado, como estudio de caso para identificar las etapas y procesos que generan mayor impacto a los recursos hídricos del país.

5.3.1 Evolución del concepto de huella de agua

El concepto de huella hídrica fue introducido por Hoekstra y estuvo basado en las nociones de agua virtual (Hoekstra & Hung, 2002). Según esta corriente, la huella hídrica de un producto es el volumen de agua que se consume directa e indirectamente durante la etapa de fabricación (Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M., & Mekonnen, M.M., 2011). Hoekstra (2011) también desarrolló una clasificación de la huella hídrica según su fuente. Denominó huella verde a toda el agua proveniente de lluvia; huella azul, al agua de fuentes naturales, tanto superficiales como subterráneas; y huella gris al agua contaminada que regresa a fuentes naturales (Mekonnen & Hoekstra, 2011).

Si bien, Hoekstra logró hacer la primera definición de huella hídrica, este concepto fue criticado (Pfister & Hellweg, 2009). El principal argumento de Pfister y Hellweg (2009) en contra del concepto de huella hídrica es que cuantificar únicamente el volumen de agua según su origen y clasificarlo en los tres tipos (azul, verde y gris), no evalúa el efecto ocasionado por el consumo en regiones con un alto grado de escasez del recurso. Como ejemplo, se podría mencionar que no es lo mismo consumir un litro de agua en la región del corredor seco de Guatemala que consumir un litro de agua en Cobán, donde el recurso hídrico es más abundante.

Por esta razón, Pfister y Hellweg (2009) propusieron incluir un indicador de estrés hídrico, para representar el impacto ocasionado por el consumo de agua en una región. Con esta noción, estos autores lograron dar un paso hacia la regionalización de impactos dentro del análisis de huella hídrica.

La organización de estándares internacionales (ISO, 2014) desarrolló la norma ISO 14046 para la evaluación de huella hídrica. Esta se basó en las normas 14040 y 14044 (ISO, 2006a, 2006b), por lo que utiliza una perspectiva de ciclo de vida. La norma ISO 14046 propone el concepto de huella hídrica como: "métrica que cuantifica el potencial impacto ambiental relacionado con el agua", y define una evaluación de huella hídrica como: "el proceso de compilación y evaluación de los ingresos, egresos y los potenciales impactos ambientales, relacionados con el agua debido a una actividad, servicio o producto" (ISO, 2014). Además, la norma exige que una evaluación de huella hídrica debe presentar, tanto los impactos ocasionados en la disponibilidad del recurso (potencial de producir escasez), como los impactos ocasionados por un cambio en la calidad del recurso hídrico (potencial de degradación) (Bayart *et al.,* 2010).

Para armonizar las diferentes metodologías para evaluar la escasez, el grupo de expertos del proyecto Wulca[5], desarrolló un indicador de escasez generalizado (Bayart *et al.,* 2010; Boulay, Bare, *et al.,* 2015; Kounina *et al.,* 2013). Para llegar a este indicador se evaluaron todas las metodologías publicadas en los últimos diez años, las rutas de impacto descritas y los indicadores de punto intermedio y punto final de dichas rutas (Kounina *et al.,* 2013; Mila i Canals *et al.,* 2009, 2010).

El indicador generalizado ha sido denominado como indicador de escasez Aware (Bayart *et al.,* 2010; Boulay, *et al.,* 2015; Kounina *et al.,* 2013), y el acrónimo se refiere a la disponibilidad de agua remanente (*Available Water Remaining*, por sus siglas en inglés). Este indicador cuantifica el agua que hay disponible en cuencas hidrográficas, una vez se satisfacen las necesidades humanas y para usos ecosistémicos. Este se describirá con más detalle en las siguientes secciones.

Si bien la norma ISO 14046 establece como requerimiento que se deben cuantificar impactos en la cantidad (escasez) y en la calidad (degradación) de los recursos hídricos, la norma deja en libertad al analista los métodos de evaluación de impacto (tanto de escasez como de degradación). Para reducir esta ambigüedad en la norma, un grupo de expertos latinoamericanos en huella de agua[6] ha sugerido usar el indicador Aware para evaluar los impactos potenciales en la escasez, mientras que para evaluar los impactos en la calidad se utilicen los potenciales de toxicidad acuática del método UseTox, y el potencial de eutrofización del método ReCiPe (Cadis/Cosude, 2016). Adicionalmente, para diferenciar la metodología de Hoekstra (2011) de la metodología propuesta por la norma ISO, el grupo de expertos latinoamericanos sugiere que se use el término de "huella hídrica" para el método del *Water Footprint Network* y el término "huella de agua" para el método de la norma ISO.

Por esta razón, se propone en este trabajo la siguiente definición para la huella de agua: *métrica que determina los impactos ocasionados a la cantidad y calidad de los recursos hídricos de una región, debido a las actividades de un sistema de producción, a lo largo de su ciclo de vida.*

5.3.2 Terminología asociada al concepto de huella de agua

Puesto que existe una diversidad de términos y conceptos asociados a la metodología de evaluación de la huella de agua, se describen a continuación los más importantes para su comprensión:

- **Cuerpo de agua:** entidad hidrológica de una región geográfica con características físico-químicas y biológicas definidas (Cadis/Cosude, 2016).

- **Cuenca hidrográfica:** área geográfica que limita los flujos de agua que drenan por gravedad en una misma dirección hacia un cuerpo de agua en común.

5 Uso de agua dentro del Análisis de Ciclo de Vida (por sus siglas en ingles *Water Use in Life Cycle Assessment*) http://www.wulca-waterlca.org

6 El autor participó como representante de la Universidad Rafael Landívar en el grupo de expertos latinoamericanos que desarrollaron la guía metodológica para la aplicación de huella de agua.

- **Agua dulce:** recursos hídricos con menos 1,000 ml/l de sólidos disueltos y que pueden ser tratados para producir agua potable (Kounina *et al.,* 2013). El agua salobre y marina no son considerados como agua dulce.

- **Extracción de agua:** remoción de agua de un cuerpo o cuenca hidrográfica, por causas antropogénicas (Cadis/Cosude, 2016).

- **Uso de agua:** sumatorio total del agua dulce que ingresa y egresa al sistema productivo, ya sea por extracción de agua de cuerpos superficiales o subterráneos o proveniente de agua de lluvia.

- **Consumo de agua**: es el total de agua que se ha incorporado al sistema productivo y que no regresa a fuentes de agua superficial, subterránea, o que ya no está disponible en la misma cuenca hidrográfica debido a su traslado o por la evaporación.

- **Escasez de agua**: cuantificación de la cantidad de agua disponible en una cuenca hidrográfica, con respecto a su capacidad de reabastecimiento (Cadis/Cosude, 2016).

- **Agua verde**: agua de lluvia o agua dulce depositada como parte de la humedad del suelo.

- **Huella de agua**: métrica que determina los impactos ocasionados en la calidad y cantidad de los recursos hídricos de una región debido a las actividades de un sistema de producción a lo largo de su ciclo de vida.

- **Categoría de impacto**: clasificación de emisiones ambientales en un área de protección ambiental.

- **Factor de caracterización:** factor que transforma los resultados del inventario, a un valor común de una categoría de impacto.

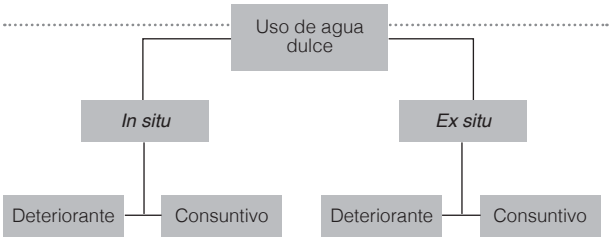
- **Uso *in situ*:** se refiere al agua dulce utilizada directamente en el cuerpo de agua (ejemplo, hidroeléctrica o un barco).

- **Uso *ex situ:*** cuando es necesario el transporte desde el cuerpo de agua, hacia el sistema de producción (Berger & Finkbeiner, 2010; Pfister, Koehler & Hellweg, 2009).

- **Uso degradador:** cambio negativo en la calidad del agua (por ejemplo: temperatura, demanda biológica de oxígeno, contaminación de nutrientes o metales pesados).

En la figura 47 se muestra un esquema para categorizar el uso de agua de acuerdo a las definiciones previas.

Figura 47. Esquema para categorizar el uso de agua dulce dentro de la huella hídrica



Fuente: Elaboración propia. Basado en Bayart *et al.* (2010) y Berger y Finkbeiner (2010)

5.3.3 Metodología de huella de agua según la Norma ISO 14046:2014

La metodología para el análisis de la huella de agua ha sido estandarizada bajo la norma ISO 14046:2014, y está basada en las normas de gestión ambiental para el análisis del ciclo de vida (ISO 14040:2006). El estándar 14046 contiene los pasos y procedimientos para realizar un análisis de la huella de agua. Según el estándar 14046, el análisis de huella de agua puede incluirse dentro de un análisis del ciclo de vida, pero también puede ejecutarse como un análisis aislado. Las fases de un análisis de la huella de agua siguen los pasos de un ACV, por lo que son muy similares. Estos se describen a continuación.

a) Fase 1: Definición del alcance y objetivos

Durante la etapa de definición de alcance y objetivos, se determina el objetivo principal y la aplicación prevista del estudio. Por ejemplo, en esta fase se establece si el objetivo es cuantificar el volumen de agua consumido, o cuantificar la eutrofización hacia los sistemas acuáticos, o evaluar los potenciales efectos ambientales relacionados con el agua, dentro de una cadena de suministro. La aplicación puede ser para comunicación pública o interna, caso en el que los datos no pueden ser de dominio público. Durante esta fase, también se establece la unidad funcional del estudio, que es la unidad que produce el sistema de producción y bajo la cual se establecen los parámetros a cuantificar. Adicionalmente, se deben establecer los límites del sistema, las dimensiones temporales y geográficas bajo las cuales se realiza el análisis.

b) Fase 2: Inventario de flujos hídricos

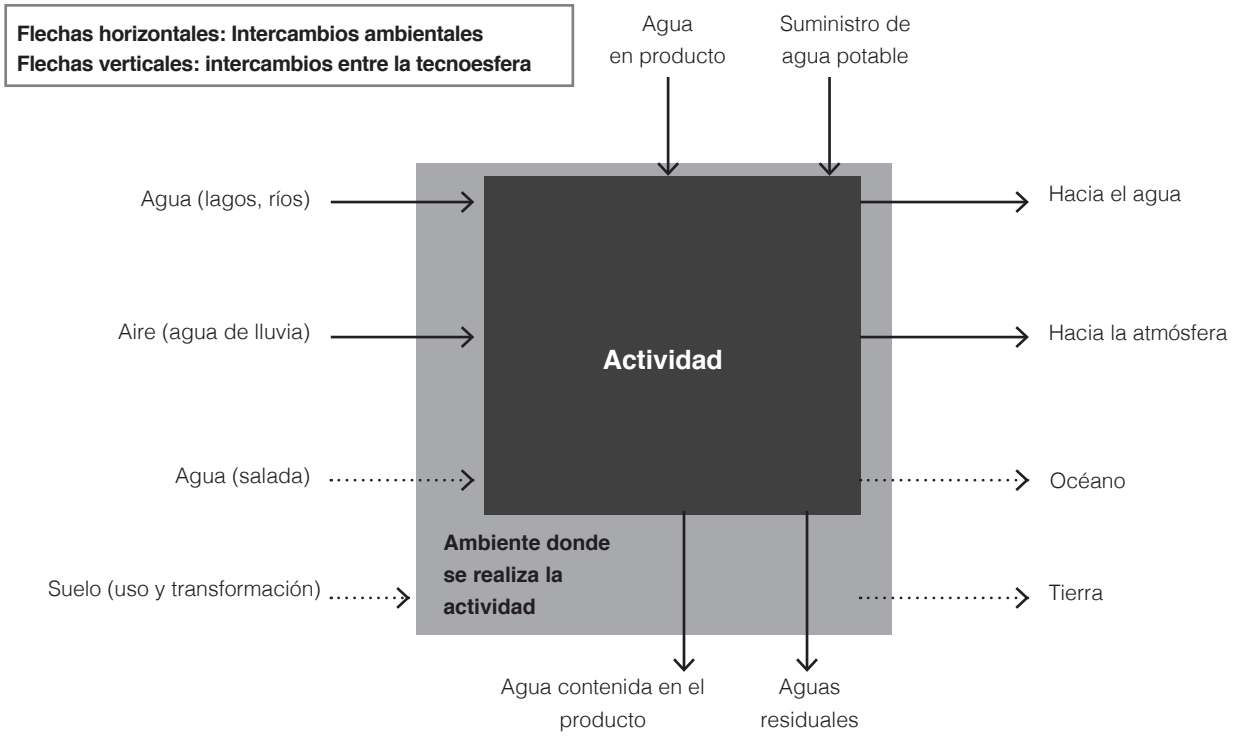
Durante esta fase, se elabora el inventario de los ingresos y egresos de los recursos hídricos al sistema de producción. Un flujo hídrico es el intercambio que existe entre el sistema de producción y el medio ambiente. Por lo general, un flujo hídrico puede tener un origen natural, ya sea de fuentes superficiales, subterráneas o del océano; o bien, puede ser de una fuente artificial. La base de datos *Ecoinvent 3.2*, que es utilizada para construir los modelos de ciclo de vida de los sistemas de producción, posee dentro de su estructura una clasificación de los diferentes flujos hídricos según su fuente (superficial, subterránea, lluvia), o su destino final (Pfister, Vionnet, Levova, & Humbert, 2015). La tabla 20 describe los flujos hídricos presentes en la base de datos, utilizados para la elaboración del inventario de la huella de agua. En la figura 48 se muestra un esquema general a nivel de proceso unitario y sus respectivos intercambios ambientales.

Tabla 20. Flujos elementales presentes en la base de datos *Ecoinvent 3.2* para la cuantificación la huella de agua

	Compartimiento	Sub compartimiento	Flujos	Unidades
Ingresos				
	Recursos naturales	En agua	Agua, enfriamiento, de origen natural sin especificaar	m^3
			Agua, lago	m^3
			Agua, río	m^3
			Agua, salada, océano	m^3
			Agua, salada	m^3
			Agua, turbinas, de origen natural sin especificar	m^3
			Agua de origen natural sin especificar	m^3
			Agua de pozos subterráneos	m^3
		Tierra	Cuerpo acúatico terrestre	m^2
			Transformación de cuerpos acuaticos terrestres	m^2
			Transformación de cuerpos acuaticos	m^2
		Aire	Agua en el aire	m^3
Egresos				
	Aire	Urbano cercano a la superficie	Agua	m^3
		No urbano de chimeneas industriales	Agua	m^3
		Población de baja densidad a largo plazo	Agua	m^3
		Estratósfera baja + tropósfera superior	Agua	m^3
		Sin especificar	Agua	m^3
	Agua	Agua superficial	Agua	m^3
		Océano	Agua	m^3
		Sin especificar	Agua	m^3
		Terrestre	Agua	m^3
		Terrestre a largo plazo	Agua	m^3

Fuente: Pfister *et al.* (2015)

Figura 48. Esquema general para el análisis del inventario de la huella de agua



Fuente: Pfister *et al.* (2015)

Adicionalmente, se sugiere que los flujos hídricos pueden ser identificados basados en su calidad. Sin embargo, Bayart *et al.* (2010), reconocen las dificultades de cuantificar la calidad del agua, por lo que proponen usar métodos de distancia al objetivo o por su funcionalidad. Por otro lado, Boulay *et al.* (2011) proponen clasificar los flujos hídricos por su funcionalidad, así como un marco metodológico para realizarlo (Boulay, Bouchard, Bulle, Deschênes & Margni, 2011); sin embargo, dada las características de la base de datos *Ecoinvent 3.2,* en esta investigación se seguirá la metodología de análisis de inventario incluidas en esta (Pfister *et al.,* 2015).

c) Fase 3: Evaluación de impactos

Rutas de impacto: Dentro de la perspectiva de ciclo de vida, una huella de agua debe ser capaz de cuantificar los potenciales impactos ambientales dentro de una cadena causa-efecto. Por lo tanto, los impactos se pueden cuantificar en puntos intermedios de la cadena o en el punto final. A pesar de que se han descrito diferentes rutas dentro de la cadena causa-efecto, se han reconocido tres áreas de protección ambiental, ya que, de una u otra manera, estas tres áreas de protección se ven afectadas por la escasez y por cambios en la calidad del recurso hídrico (Bayart *et al.,* 2010; Kounina *et al.,* 2013). Estas áreas

de protección ambiental son: 1) salud humana, 2) calidad ecosistémica y 3) recursos naturales.

Para Mila i Canals *et al.* (2009), los problemas por el uso del agua se relacionan con dos aspectos, el agotamiento del recurso para usos antropogénicos y el deterioro del agua para servicios ecológicos. Desde la perspectiva de Bayart *et al.* (2010), los problemas del agua se relacionan con el conflicto entre sus usuarios, el cual es generado por la escasez del recurso. El agotamiento, según Bayart *et al.* (2010), ocurre cuando la tasa de consumo en una cuenca hidrográfica es mayor que su tasa de regeneración, restringiendo el acceso a futuras generaciones. Los conflictos por el agua se incrementan cuando el acceso al recurso es restringido debido al aprovechamiento por otros usuarios (Bayart *et al.,* 2010).

Las rutas de impacto que se han propuesto, por lo tanto, se basan en la definición del problema. Por ejemplo, Mila i Canals *et al.* (2009), propusieron cuatro rutas de impacto relacionadas con los dos aspectos descritos previamente: 1) cambios en la disponibilidad de agua que afectan la salud humana; 2) cambios en la disponibilidad de agua que afectan la calidad ecosistémica; 3) agotamiento de fuentes de agua subterráneas, y 4) cambios de uso del suelo que afectan el ciclo hidrológico y, por ende, a los ecosistemas.

Bayart *et al.* (2010) por su parte, propusieron tres rutas de impacto con tres indicadores intermedios para las áreas de protección. La ruta de impacto que afecta la salud humana se debe a la lucha que existe por el agua para diversas actividades antropogénicas, debido a la insuficiencia del recurso. Esto puede ser expresado por un indicador intermedio llamado "*déficit de agua para usos antropogénicos"*. Este indicador representa la intensidad por la que compiten los diferentes usuarios (Bayart *et al.,* 2010). La ruta de impacto que afecta la calidad de ecosistemas se relaciona con la insuficiencia del agua para mantener los procesos ecológicos debida a usos antropogénicos intensivos. El indicador intermedio para evaluar el efecto potencial sobre los ecosistemas es el "*déficit de agua en ecosistemas"*. La tercer área de protección (recursos naturales), se relaciona con la reducción del recurso hídrico para generaciones futuras. Esta ruta de impacto puede ser representada por el indicador intermedio "*agotamiento hídrico*". Este indicador expresa la reducción del volumen de agua de una cuenca hidrográfica a lo largo de un periodo prolongado del tiempo (Bayart *et al.,* 2010).

Kounina *et al.* (2012) realizaron una revisión exhaustiva de los métodos para cuantificar la huella de agua y proponen un marco metodológico, basado en la armonización de las diversas rutas de impacto y sus indicadores.

Consumo de agua: Algunos autores han propuesto que uno de los primeros pasos para evaluar una huella de agua es cuantificar su consumo (Berger & Finkbeiner, 2010; Kounina *et al.,* 2013). Este dato es análogo a la huella hídrica azul propuesto por Hoekstra *et al.* (2011). El análisis del inventario permite cuantificar uso y consumo de volúmenes de agua en el sistema de producción. Por ejemplo, al sustraer el total de salidas del sistema (efluentes de aguas residuales) de los ingresos de agua a este, se puede estimar el uso y el consumo de agua (Berger & Finkbeiner,

2010). El consumo de agua de lluvia[7] no es considerado, puesto que es un recurso que estaría disponible de todas maneras, y no se ve afectado por el sistema de producción.

El consenso científico actual dentro de la comunidad de analistas de ciclos de vida, es que el consumo de agua como tal, no es un indicador del daño ocasionado en las tres áreas de protección ambiental. Por lo tanto, se ha propuesto evaluar el impacto a los recursos hídricos mediante modelos que cuantifiquen el potencial del sistema de producción de crear escasez, y deteriorar la calidad de los recursos hídricos en una región. Los modelos que caracterizan la escasez están directamente relacionados con aspectos cuantitativos del agua, mientras que los modelos que caracterizan la calidad se enfocan en la toxicidad y deterioro de los recursos hídricos, debido a las emisiones de substancias. A continuación, se describen cada uno de estos aspectos.

Indicadores cuantitativos de agua: A pesar de que la metodología de evaluación de la huella de agua ha sido estandarizada, la norma ISO 14046:2014 deja abierta la posibilidad de aplicar el método para cuantificar los potenciales impactos en la cantidad de los recursos hídricos (ISO, 2014). Estos también son conocidos en el ámbito del análisis del ciclo de vida, como modelos de caracterización de escasez. Los modelos de caracterización, para cuantificar los potenciales impactos ambientales por el uso y consumo de agua, se encuentran aún en etapas tempranas de investigación y desarrollo (Bayart *et al.,* 2010; Berger, van der Ent, Eisner, Bach & Finkbeiner, 2014; Mila i Canals *et al.,* 2009, 2010; Pfister *et al.,* 2009). Estos modelos han sido evaluados y criticados por distintos autores (Berger & Finkbeiner, 2010; Flury, Jungbluth, Frischknecht & Muñoz, 2012; Kounina *et al.,* 2013).

En términos generales, los indicadores que cuantifican la escasez han sido desarrollados con base en la relación que existe entre consumo y disponibilidad del recurso, siendo la cuenca hidrográfica la unidad geográfica básica (Pfister *et al.,* 2009). Por ende, muchos de los métodos utilizan el balance hídrico de una cuenca o subcuenca para obtener un factor de disponibilidad (Berger & Finkbeiner, 2010). El factor de disponibilidad es definido como la relación entre la tasa de extracción de agua a su disponibilidad. Este valor es expresado por la relación WTA *(water-to-availability)*:

$$WTA = \frac{WU}{WA}$$

Donde:

WTA = Factor de disponibilidad
WU = Extracción de agua en la cuenca
WA = Disponibilidad de agua en la cuenca

Pfister *et al.* (2009) modifican el factor de disponibilidad introduciendo a su ecuación un factor de variación para compensar la variabilidad climática que existe en el medio ambiente. Pfister *et al.* (2009) argumentan que esta variabilidad climática es más leve

7 Para Hoekstra *et al.* (2011), el agua de lluvia representa la huella hídrica verde.

en lugares con flujos de agua fuertemente regulados. O sea, la existencia de depósitos, bancos y reservorios reducen fuertemente la variabilidad climática, por lo que introduce un factor de variabilidad reducido mediante su raíz cuadrática.

$WTA^* = \sqrt{VF}$ x WTA con flujos de agua regulados

$WTA^* =$ VF x WTA con flujos de agua normales

Donde:

VF: Factor de variabilidad

De acuerdo con Pfister *et al.* (2009), el factor de variabilidad es obtenido a partir de datos de precipitación pluvial, a escala de celdas geográficas, los cuales están construidos en modelos matemáticos de observación climática. Dichos modelos predicen distribuciones logarítmicas normales para datos de precipitación pluvial mensual y anual, por lo que desarrollan el factor de variabilidad basado en la medida de dispersión agregada de las desviaciones estándar de los datos anuales y mensuales. El factor de variabilidad se obtiene para cada celda geográfica en una cuenca, ponderándolo con la precipitación promedio anual. A continuación, se presenta la ecuación del factor de variabilidad desarrollada por Pfister *et al.* (2009).

$$VF_{ws} = \frac{1}{\sum P_i} \sum_{i=1}^{n} VF_i * P_i$$

Donde:

VF: Factor de Variabilidad

P: Precipitación

Considerando la variación climática, Pfister *et al.* (2009) utilizan el factor de disponibilidad modificado para obtener el índice de estrés hídrico. Puesto que no hay una relación lineal, en el factor de disponibilidad modificado, el índice de estrés hídrico se obtiene por medio de la siguiente función logística:

$$WSI = \frac{1}{1+e^{-6.4\,WTA^*\left[\frac{1}{0.01}-1\right]}}$$

Donde:

WSI: Índice de estrés hídrico

En la cual el estrés hídrico es mínimo cuando el valor es = 0.01, siendo 0.5 el valor umbral entre estrés moderado y estrés severo (Pfister *et al.,* 2009). El índice de estrés hídrico es utilizado por Pfister *et al.* (2009) para cuantificar la categoría de impacto "privación de agua".

El método de Pfister *et al.* (2009), que plantea la relación extracción-disponibilidad ha ido evolucionado hacia la relación: consumo-disponibilidad y demanda-disponibilidad (Boulay, Motoshita, *et al.,* 2015). Los esfuerzos por armonizar los modelos de caracterización de huella de agua, propiciados por la iniciativa de la Unep-Setac[8] con el proyecto Wulca[9], han dado como resultado, el desarrollo del indicador de escasez Aware (disponibilidad del agua

8 Unep-Setac es la iniciativa del Programa Ambiental de las Naciones Unidas *(United Nations Environmental Programme)* y la Sociedad de Toxicología y Química Ambiental *(Society for Environmental Toxicology and Chemistry)*, para promover la investigación en análisis de Ciclos de Vida.

9 Wulca es el proyecto para armonizar los métodos de huella hídrica, dentro de las metodologías de Análisis de Ciclos de Vida.

remanente, por sus siglas en inglés). El indicador pretende responder a la pregunta: ¿Cuál es el potencial de privar a otro usuario de agua (humano o ecológico), cuando se consume agua en una región determinada?

El indicador Aware, estandariza el potencial de crear escasez, de acuerdo a la región donde se realiza la actividad del sistema de producción. Para esto utiliza un balance hidrológico a nivel de cuenca y subcuencas, generado con el modelo mundial WaterGAP[10]. Basado en este modelo, el indicador caracteriza la cantidad de agua que queda disponible después que son satisfechas las demandas humanas y ecológicas, y lo estandariza con el promedio de m^3 de agua disponible en el mundo = 0.0136 m^3/m^2mes.

Otra forma de interpretar el indicador es la siguiente: si una región tiene cuatro veces más disponibilidad de agua que el promedio mundial, o sea un factor = 0.25; puede utilizar cuatro veces más agua que la misma actividad en una región promedio, y su impacto en m^3 equivalentes, será el mismo. A continuación, se presenta un ejemplo:

			Factor = 1/AMD	Consumo	Escasez
$\frac{AMD\ Guatemala}{AMD\ promedio\ Mundo}$	$\frac{0.0544\ m^3/m^2mes}{0.0136\ m^3/m^2mes}$	= 4	$\frac{0.25\ m^3\ mundiales}{m^3\ Guatemala}$	1m^3 Guatemala =	0.25 Eq-H_2O mundo
$\frac{AMD\ Israel}{AMD\ promedio\ Mundo}$	$\frac{0.0034\ m^3/m^2mes}{0.0136\ m^3/m^2mes}$	= 0.25	$\frac{4\ m^3\ mundiales}{m^3\ Israel}$	1m^3 Israel =	4 Eq- H_2O mundo

Donde AMD = Disponibilidad – Demanda

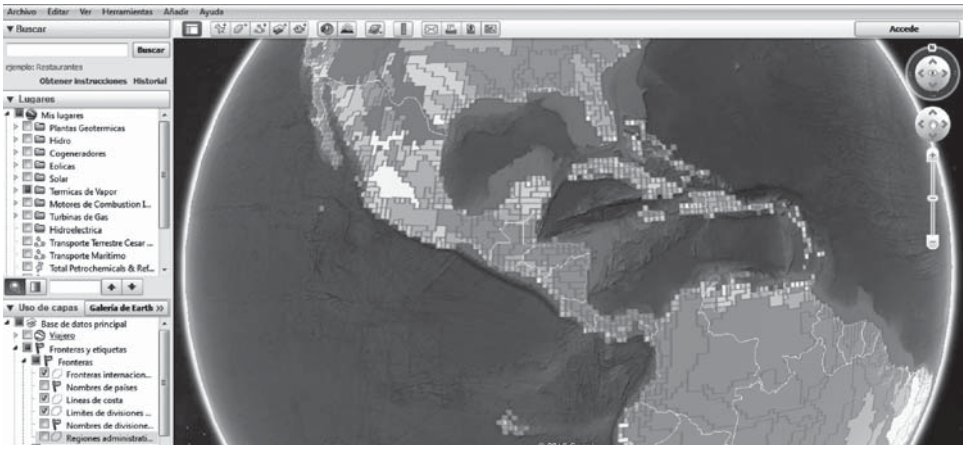
10 *Water Global Assessment and Prognosis* es un modelo desarrollado por la Universidad de Kassel en Alemania, el cual estima flujos de agua en todo el globo, utilizando sistemas de información geográfico y variables climáticas, obtenidas desde 1961. Documentación completa en: www.watergap.de

Los valores presentados en el ejemplo son únicamente demostrativos. Si en Guatemala existe cuatro veces más volumen de agua por unidad de área que en Israel, los factores de caracterización de escasez hídrica resultan respectivamente 4 y 0.25, respecto al promedio mundial. Puesto que se utiliza el factor inverso (Guatemala 1/4 e Israel 1/0.25), el consumo de 1 m^3 de agua en Guatemala representa 0.25 m^3 equivalentes del mundo. Igualmente, el consumo de 1 m^3 de agua en Israel, donde el agua es más escasa, representa 4 equivalentes de agua mundial. Esto hace que el consumo de 1 m^3 de agua en Israel, pueda crear un mayor potencial de escasez.

Los factores de caracterización de escasez para todo el mundo ya han sido estimados utilizando una escala regional a nivel de cuenca y sub-cuenca, y están basados en el balance hídrico *WaterGAP*. Estos están disponibles en el sitio web del proyecto Wulca[11]. La resolución espacial de los factores de caracterización posee una alta desviación estándar, lo que significa que en el futuro se debe afinar el detalle de la escala espacial para Guatemala.

La figura 49 presenta el mapa a nivel mundial de caracterización de escasez de agua.

Figura 49. Mapa global con factores de caracterización de escasez de agua a nivel de sub-cuencas



Fuente: http://www.wulca-waterlca.org/project.html

Por lo tanto, el indicador Aware ha sido propuesto como un indicador genérico a nivel intermedio en la cadena causa-efecto (Boulay, Bare, *et al.,* 2015). Este podría ser utilizado para modelos de caracterización que evalúan los impactos al final de la cadena, en las tres áreas de protección ambiental: salud humana, ecosistemas y recursos naturales. Sin embargo, hasta el momento, el indicador Aware se encuentra en fase de evaluación hasta que este sea aplicado a una serie de casos de estudio y se determine su desempeño.

11 www.wulca-waterlca.org

Indicadores cualitativos de agua: Para evaluar los impactos en la calidad del agua, Hoekstra *et al.* (2011), sugiere cuantificar el volumen de agua que ha sido contaminado por el sistema de producción, y el volumen de agua requerido para diluir los contaminantes y llevarlos a niveles aceptables de calidad (Hoekstra, A.Y. *et al.,* 2011). Esto es conocido como la huella hídrica gris (Hoekstra, A.Y. *et al.,* 2011).

Dentro del análisis del ciclo de vida, todos los métodos de evaluación de impacto incluyen modelos para caracterizar los potenciales impactos en la calidad del agua. El método CML (Guinée, 2002) contiene las categorías de impacto: Potencial de Toxicidad de Ecosistemas de Agua Dulce, Potencial de Eutrofización y Potencial de Acidificación. Mientras que las categorías de eutrofización y acidificación cuantifican impactos generales al ambiente, la categoría de impacto "Potencial de Toxicidad de Ecosistemas de Agua Dulce", evalúa los impactos directos a los recursos hídricos.

El método USEtox fue desarrollado por la Unep-Setac (Rosenbaum *et al.,* 2008) para evaluar los impactos tóxicos a la salud humana y ecosistemas acuáticos. Describe el destino, exposición y efectos de compuestos químicos, liberados al medio ambiente. Dos categorías pueden ser utilizadas de este modelo Ecotoxicidad Acuática y Toxicidad Humana.

Por otro lado, el método Impact 2002+ usa los factores de caracterización del modelo CML para acidificación acuática y eutrofización acuática. Para la categoría toxicidad acuática, Impact 2002+ usa un propio modelo de caracterización usando equivalentes de trietilenglycol en agua por kilogramo de substancia emitida al ambiente. El consenso generalizado de la comunidad científica es representar la huella de agua de un sistema o producto, a través de una serie de categorías de impacto. En otras palabras, se podría expresar como un perfil con varias categorías de impacto, el cual se presenta en la última fase del análisis de huella de agua que se describe a continuación.

d) Fase 4: Interpretación de resultados

Según el *Manual de aplicación para la evaluación de huella de agua* (FCH, 2016), durante la etapa de interpretación de resultados se debe identificar la etapa del sistema de producción que produce mayores impactos en la cantidad y calidad del agua. Por lo tanto, es necesario incluir los indicadores de ambos aspectos. También el manual sugiere identificar los efectos negativos, ya sea por consumo o por contaminación y si estos son efectos directos o indirectos del sistema de producción. Finalmente, se debe indicar cuáles son las conclusiones y limitaciones del estudio presentando para esto, un análisis de sensibilidad de los parámetros con mayor incertidumbre. Por lo tanto, los resultados de una huella de agua se presentan como un perfil de indicadores.

5.3.4 Huella de agua del Sistema Nacional Interconectado

a) Definición del alcance y objetivo

Siguiendo los pasos metodológicos descritos previamente, y usando los modelos de ciclo de vida para el SNI, se ejecutó un análisis de huella de agua de acuerdo a la norma ISO 14046. La unidad fun-

cional seleccionada, al igual que para el análisis de ciclo de vida fue de 1 kWh de electricidad de bajo voltaje, suministrado a un usuario doméstico. El *software* OpenLCA se usó para implementar el método Aware de evaluación de impactos de escasez y tres categorías de impacto del método CML (Guinee, 2001). Se usaron los datos de producción de energía del 2016 publicados por la AMM.

b) Análisis del inventario de flujos hídricos

Los resultados que se exhiben en el análisis del inventario (tabla 21) presenta los 16 flujos hídricos que ingresan y egresan al sistema de producción, por unidad funcional (1 kWh de electricidad). La base de datos *Ecoinvent 3.2* posee 22 flujos hídricos (12 flujos de ingresos y 10 flujos de egresos) y los clasifica en diferentes compartimentos ambientales, los cuales se presentan como categorías y subcategorías (Pfister *et al.,* 2015). Los resultados del inventario se encuentran balanceados y es una de las características de los procesos unitarios y procesos de sistemas de la base de datos *Ecoinvent 3.2* (Pfister *et al.,* 2015).

Tabla 21. Resultados del inventario de ciclo de vida para los flujos hídricos, del Sistema Nacional Interconectado, para 1 kWh de electricidad en Guatemala

Ingresos				
Nombre	**Categoría**	**Sub-Categoría**	**m^3**	**lt**
Agua, enfriamiento, de origen natural sin especificar	Recursos	en agua	0.020	20.4
Agua, lagos	Recursos	en agua	4.4E-05	4.40E-02
Agua, ríos	Recursos	en agua	0.0161	16.1
Agua, para turbinas, origen natural sin especificar	Recursos	en agua	3.478	3,478.2
Agua, de origen natural sin especificar	Recursos	en agua	2.8E-04	0.3
Agua, pozos, subterráneos	Recursos	en agua	0.004	3.6
Agua, salada, océano	Recursos	en agua	9.8E-06	9.8E-03
Agua, salada, único	Recursos	en agua	2.8E-05	2.8E-02
Total de ingresos			**3.519**	**3,519**

Egresos				
Nombre	**Categoría**	**Sub-Categoría**	**m_3**	**lt**
Agua	Emisiones al aire	baja densidad poblacional	5.3E-06	5.3E-03
Agua	Emisiones al aire	alta densidad poblacional	3.4E-07	3.4E-04
Agua	Emisiones al aire	sin especificar	0.020	19.92
Agua	Emisiones al aire	estratósfera baja + alta tropósfera	9.4E-14	9.4E-11
Agua	Emisiones al agua	sin especificar	3.488	3,488.13
Agua	Emisiones al agua	agua superficial	0.002	2.11
Agua	Emisiones al agua	agua subterránea	0.008	8.38
Agua	Emisiones al agua	Océano	0.000	0.00
Total de ingresos			**3.519**	**3,519**

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 22 se muestra el uso, pérdidas evaporativas, degradación y consumo por 1 kWh de electricidad que se suministra en el territorio nacional. Como se describió anteriormente, el uso de agua se obtiene sumando todos los flujos hídricos que ingresan al sistema de producción y que provienen de fuentes naturales (recursos). No se incluyen en la sumatoria agua que proviene del océano. De todos los flujos hídricos, el agua turbinada es el que utiliza la mayor cantidad de agua (3.48 m^3 o 3,478 litros por kWh). Esto se debe a que las plantas hidroeléctricas, utilizan una gran cantidad de agua en las turbinas para generar electricidad.

Tabla 22. Cuantificación del uso, pérdidas evaporativas, degradación y consumo de agua por cada kWh que se suministra en el territorio de Guatemala, usando valores por defecto de la base de datos *Ecoinvent 3.2*

	Unidades	
Por cada kWh consumido	**m^3**	**lt**
Uso de agua	3.519	3.519
Pérdidas evaporativas	0.020	20
Degradación	3.499	3.499
Consumo	**0.020**	**20.1**

Fuente: Elaboración propia

Las pérdidas evaporativas se obtienen sumando todos los flujos de emisiones al aire. En total, se estimó que se pierden 0.020 m^3 o 19.92 litros por kWh. Estas pérdidas evaporativas hacen referencia a las emisiones de vapor de agua que se dan en las distintas etapas de la cadena de suministro de electricidad en Guatemala. En el *software* openLCA, se determinó que la generación de energía hidroeléctrica es el proceso con mayores pérdidas evaporativas. Las pérdidas de agua durante la generación hidroeléctrica se dan por medio de evaporación en las represas o por filtración en los canales de conducción. Sin embargo, el valor de pérdidas evaporativas, es 0.029 m^3 por kWh en el modelo de hidroelectricidad, y no es representativo para plantas hidroeléctricas en Guatemala. Al realizar una evaluación con *Google Earth* se determinó que, en efecto, el área superficial de los embalses de represas guatemaltecas es reducido, en comparación con represas europeas (que son la base del modelo). Por lo tanto, las pérdidas evaporativas se consideraron nulas y se recomienda que este parámetro sea considerado en futuros modelos. En la tabla 23 se presentan los resultados del inventario, sin pérdidas evaporativas, de represas hidroeléctricas.

Tabla 23. Cuantificación del uso, consumo y pérdidas evaporativas por consumo de 1 kWh en el territorio de Guatemala, sin considerar pérdidas evaporativas de represas hidroeléctricas

	Unidades	
Por cada kWh consumido	**m^3**	**lt**
Uso de agua	3.519	3,519
Pérdidas evaporativas	0.009	9
Degradación	3.499	3,499
Consumo	0.009	9

Fuente: Elaboración propia

Como se puede notar, las pérdidas evaporativas estimadas inicialmente de represas hidroeléctricas son considerables, ya que suman más del 50% (11 de los 20 litros por kWh). Los 0.009 m^3 o 9 litros de pérdidas evaporativas, provienen de la etapa de producción agrícola de caña de azúcar. Por lo tanto, esta es una de las etapas que mayor impacto tiene en los recursos hídricos.

En la categoría de degradación se suman todos los flujos hídricos que salen del sistema y, por lo

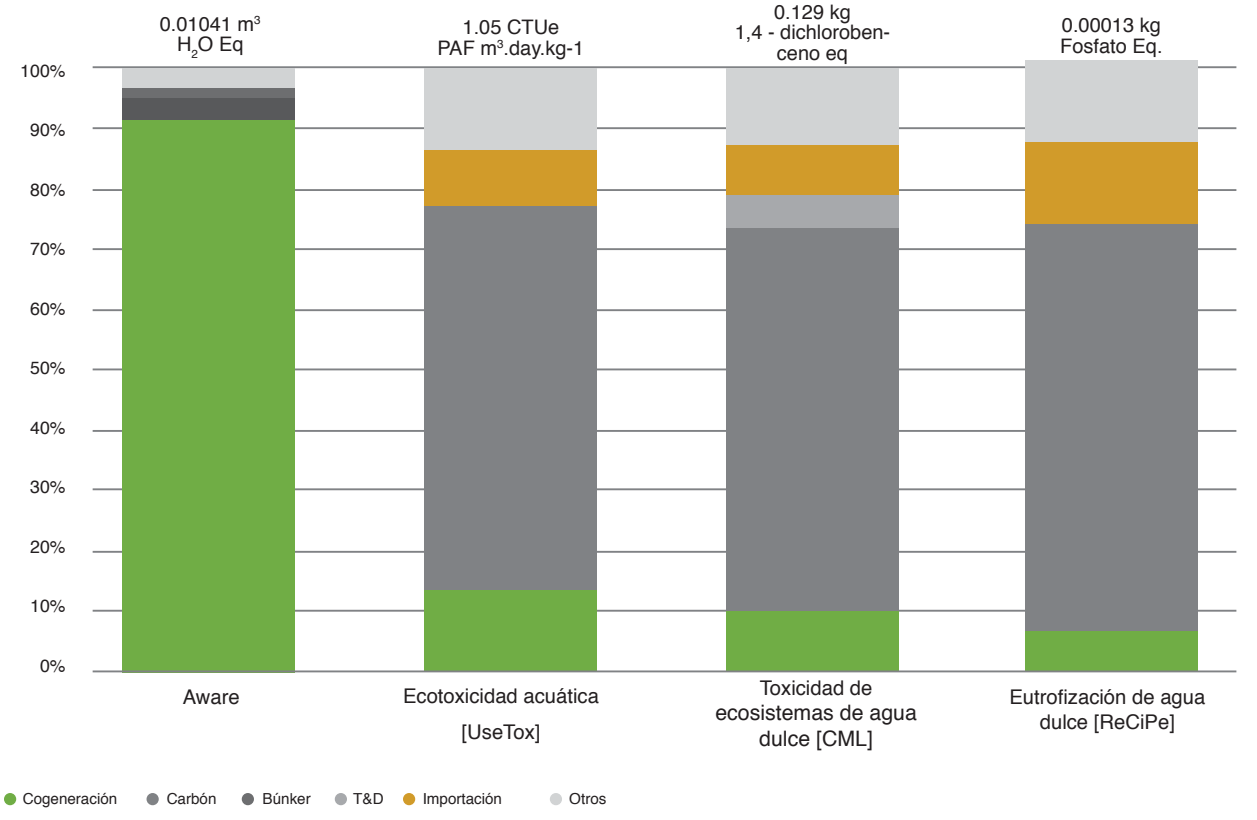
tanto, se asume que han perdido en cierto grado su calidad. La mayor parte del agua que sale del sistema es agua turbinada. Sin embargo, en Guatemala el agua turbinada puede en realidad ganar calidad, debido a que algunas represas filtran el agua y eliminan desechos para no dañar las turbinas. Esto se manifiesta como una disminución en la demanda biológica de oxígeno, pero este es otro parámetro que se tendría que investigar con mayor detalle. En todo caso, puede considerarse al agua degradada, como el total de agua que ha sido utilizada por el sistema de producción y que regresa a la cuenca hidrográfica.

El consumo representa el agua que se pierde del sistema, ya sea por evaporación o por incorporación al producto. Este valor se puede obtener restando los flujos hídricos que retornan a fuentes naturales, de los flujos hídricos que han ingresado de fuentes naturales. También se puede obtener sumando los flujos hídricos de pérdidas evaporativas más el contenido de agua del producto. En este caso, se utilizarán las pérdidas evaporativas como indicador del consumo, lo que da como resultado 0.009 m^3 o 9 litros por kWh. Considerando los 11,446 GWh de producción anual reportada por la AMM, esto representa un total de 101,856,695 m^3 perdidos anualmente.

c) Evaluación de impactos de escasez y degradación

La huella de agua presentada en la figura 50 está compuesta por cuatro indicadores: un indicador de escasez, uno de ecotoxicidad acuática, otro de toxicidad de ecosistemas de agua dulce y uno de eutrofización. El indicador de escasez se estimó mediante el método de impacto Aware. El factor de caracterización de escasez anual usado para Guatemala es de 1.17 (Boulay *et al.,* 2017, 2011). En la parte superior se encuentran el valor total del indicador y la unidad que utiliza. Las barras representan los porcentajes que aportan cada uno de los sistemas de generación al indicador.

Figura 50. Huella de agua para 1 kWh, con los indicadores de escasez Aware, Ecotoxicidad Acuática (Método UseTox), Toxicidad de Ecosistemas de Agua Dulce (Método CML) y Eutrofización de Agua Dulce (Método ReCiPe)



Fuente: Elaboración propia

El indicador de escasez Aware para el suministro de electricidad es de 0.0104 m^3 H_2O eq. Esto quiere decir que por cada kWh de electricidad que se consumen en el territorio de Guatemala, existe el potencial de consumir 0.0104 m^3 de H_2O equivalentes del mundo, lo cual es sumamente bajo. Sin embargo, la importancia del indicador está en identificar cuál de todas las etapas del sistema de producción tiene el potencial de generar mayor impacto. Para el suministro de electricidad, los sistemas de cogeneración contribuyen con más del 90% de los impactos potenciales de producción. El proceso que produce este impacto en la cadena de suministro es la producción agrícola de caña de azúcar.

Los indicadores de impacto en la calidad del agua se presentan también en la figura 50. En esta se presentan tres indicadores del método UseTox, CML y ReCiPe. La generación de electricidad a partir de carbón contribuye con la mayor cantidad de impacto, debido a que durante la operación de extracción en la mina de carbón (localizada en Colombia), los desechos sólidos producen drenaje ácido que contamina y eutrofiza ecosistemas acuáticos.

5.4 Conclusiones

- **El presente estudio expone el primer análisis de ciclo de vida y huella de agua para el suministro de 1 kWh de electricidad de bajo voltaje a un consumidor doméstico en el territorio de Guatemala.** El modelo del Sistema Nacional Interconectado se ha construido usando los procesos de *Ecoinvent* 3.2 y el criterio de expertos, documentado en una serie de talleres con sectores académicos, públicos y privados, así como visitas técnicas a las plantas de generación de energía eléctrica. Por lo tanto, los resultados no pretenden ser exhaustivos, sino más bien, presentar una primera aproximación de los efectos ambientales, por el suministro de electricidad en el país.

- **Se generó una línea base de 12 indicadores de impacto de ciclo de vida.** Este conjunto de indicadores permite tener una visión más amplia de los efectos ambientales de un sistema complejo como lo es el Sistema Nacional Interconectado, en el que intervienen una gama de tecnologías de generación eléctrica, tanto arriba como debajo de la cadena de suministro. Por lo tanto, estos resultados pueden ser utilizados como una línea base para el análisis de sistemas energéticos y su desempeño ambiental en Guatemala.

- **La generación de electricidad a partir de carbón y bunker, produce la mayor contribución de impactos ambientales**. Los impactos ambientales de ciclo de vida por el suministro de electricidad de bajo voltaje en Guatemala están afectados, en primer lugar, por los sistemas energéticos de carbón y búnker. En segundo lugar, por los sistemas de cogeneración que usan bagazo de caña como combustible. Estos dos sistemas contribuyen en mayor proporción en todas las categorías de impacto.

- **Se identificaron tres *hot spots* ambientales o etapas críticas en la cadena de suministros.** La combustión de carbón y búnker, la extracción de carbón en minas ubicadas en Colombia y la producción agrícola de caña de azúcar, son los "hot spots" ambientales que generan mayor impacto ambiental. A pesar de que los sistemas de cogeneración con biomasa (bagazo de caña) usan fuentes renovables, y su combustión es un proceso carbono neutral, la etapa de producción agrícola de caña de azúcar tiene asociada impactos por uso del suelo, toxicidad humana y deterioro de la capa de ozono, que forman parte de la cadena de suministro de los sistemas de cogeneración.

- **La huella de carbono para 1 kWh de electricidad de bajo voltaje se estimó en 0.418 kg CO_2-eq por kWh para el año del 2016**. Esto representa un total de 4,795,534 toneladas de CO_2-eq anuales. La variación climática en el SNI produce una variación en la huella de carbono con un rango de 0.310 a 0.500 kilogramos de CO_2-eq. por kWh. Un incremento para llegar a una generación del 20% de energía geotérmica y 58% de hidroelectricidad, podría representar un 50% de reducción de gases de efecto invernadero.

- **Primera estimación de la huella de agua por generación de electricidad**. El uso de agua por cada kWh de electricidad de bajo voltaje se estimó en 17.2 m^3 o 17,200 l. El consumo de agua por kWh se estimó en 0.009 m^3 o 9 l de agua dulce. El indicador de escasez de agua Aware para el suministro de electricidad es de 0.0104 m^3 H_2O eq. La etapa agrícola de cultivo de caña en los sistemas de cogeneración contribuye con el 90% a esta categoría de impacto. Más del 60% de los impactos en la calidad del agua, evaluados con la categoría de impacto toxicidad de ecosistemas acuáticos, se deben a la operación de minas de carbón en Colombia.

5.5 Recomendaciones

- Los impactos derivados de la etapa agrícola de la producción de caña de azúcar pueden ser reducidos y mitigados a través de la focalización de esfuerzos para reducir el uso de fertilizantes y pesticidas que producen la mayor cantidad de impactos.

- En el caso de la sostenibilidad ambiental del Sistema Nacional Interconectado, se recomienda el incremento de energía geotérmica, lo cual contribuiría a la reducción en la emisión de gases de efecto invernadero.

- Se recomienda construir inventarios de ciclo de vida de los sistemas energéticos de Guatemala, con información directa de las industrias que se dedican a la generación de energía. Es importante evaluar el tipo de tecnologías de mitigación de emisiones en plantas térmicas de carbón y búnker. También es importante revisar las cantidades de uso y consumo de agua en los modelos de ciclo de vida y comparar con datos de procesos de plantas de generación de energía en Guatemala.

- A pesar que la energía hidroeléctrica demuestra un buen desempeño ambiental, la gestión de estos proyectos ha sido afectada por altos niveles de conflictividad social. En tal sentido, es recomendable mejorar considerablemente la gestión multinstitucional e incluyente de dichos proyectos. Asimismo, es necesario incentivar engerías alternas como la geotermia, la eólica y la solar, las cuales evidencian un alto potencial en Guatemala y se caracterizan por tener un buen desempeño ambiental, especialmente bajas emisiones de GEI. Además, su gestión ha mostrado niveles adecuados de aceptación social. En todo caso es imprescindible incluir objetivos explícitos de desarrollo energético sostenible y de beneficio local en la propuesta y gestión de cualquier iniciativa.

5.6 Referencias bibliográficas

Bayart, J.-B., Bulle, C., Deschênes, L., Margni, M., Pfister, S., Vince, F., & Koehler, A. (2010). A framework for assessing off-stream freshwater use in LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *15*(5), 439-453. Recuperado de: https://doi.org/10.1007/s11367-010-0172-7

Berger, M., & Finkbeiner, M. (2010). Water Footprinting: How to Address Water Use in Life Cycle Assess-

ment? *Sustainability*, *2*(4), 919–944. Recuperado de: https://doi.org/10.3390/su2040919

Berger, M., van der Ent, R., Eisner, S., Bach, V., & Finkbeiner, M. (2014). Water Accounting and Vulnerability Evaluation (WAVE): Considering Atmospheric Evaporation Recycling and the Risk of Freshwater Depletion in Water Footprinting. *Environmental Science & Technology*, *48*(8), 4521-4528. Recuperado de: https://doi.org/10.1021/es404994t

Boulay, A.-M., Bare, J., De Camillis, C., Döll, P., Gassert, F., Gerten, D., Pfister, S. (2015). Consensus building on the development of a stress-based indicator for LCA-based impact assessment of water consumption: outcome of the expert workshops. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *20*(5), 577-583. Recuperado de: https://doi.org/10.1007/s11367-015-0869-8

Boulay, A.-M., Bouchard, C., Bulle, C., Deschênes, L., & Margni, M. (2011). Categorizing water for LCA inventory. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *16*(7), 639-651. Recuperado de: https://doi.org/10.1007/s11367-011-0300-z

Boulay, A.-M., Motoshita, M., Pfister, S., Bulle, C., Muñoz, I., Franceschini, H., & Margni, M. (2015). Analysis of water use impact assessment methods (part A): evaluation of modeling choices based on a quantitative comparison of scarcity and human health indicators. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *20*(1), 139-160. Recuperado de: https://doi.org/10.1007/s11367-014-0814-2

Cadis/Cosude. (2016). *Huella de Agua (ISO 14046:2014) en América Latina y el Caribe. Análisis y Recomendaciones para una Coherencia Regional* (1st ed.). Bogotá: Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación.

CNEE. (2012). *Perspectivas de los Planes de Expansión*. Guatemala: CNEE.

FCH. (2016). *Manual de Aplicación para la Evaluación de Huella Hídrica Acorde a la Norma ISO 14046*. Santiago de Chile.

Guinée, J. B. (2002). *Handbook on life cycle assessment : operational guide to the ISO standards / Jeroen B. Guinée (final editor). Eco-efficiency in industry and science: v. 7*. Dordrecht ; Boston : Kluwer Academic Publishers, c2002. Recuperado de: http://ezproxy.massey.ac.nz/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat00245a&AN=massey.b2285825&site=eds-live&scope=site

Hertwich, E. G. (2013). Addressing biogenic greenhouse gas emissions from hydropower in LCA. *Environ Sci Technol*, *47*(17), 9604-9611. Recuperado de: https://doi.org/10.1021/es401820p

Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M., & Mekonnen, M.M. (2011). *The Water Footprint Assessment Manual: setting the global standard*. London: Earthscan.

Hoekstra, A. Y., & Hung, P. Q. (2002). Virtual water trade. *A Quantification of Virtual Water Flows between Nations in Relation to International Crop Trade. Value of Water Research Report Series*, *11*, 166. Recuperado de: https://www.utwente.nl/ctw/wem/organisatie/medewerkers/hoekstra/reports/report11.pdf

Iarna-URL. (2012). *Perfil Ambiental de Guatemala 2010-2012. Vulnerabilidad local y creciente construcción de riesgo.* Guatemala: Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar.

ISO. (2006a). *14040:2006 Environmental Management, Life Cycle Assessment, Principles and Framework.* Geneva, Switzerland: International Organization for Standarization.

ISO. (2006b). *14044:2006 Environmental Management, Life Cycle Assessment, Requirements and Guidelines.* Geneve, Switzerland: International Organization for Standarization.

ISO. (2014). *14046:2014 Environmental management - Water Footprint - Principles and Guidelines.* International Standards Organization. Recuperado de: https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14046:ed-1:v1:en

Flury, K; Jungbluth, N; Frischknecht, R & Muñoz, I. (2012). *Recomendations for Life Cycle Inventory Analysis for Water Use and Consumption.* Zurich, CH: ESU-services Ltd. Recuperado de: http://www.esu-services.ch/fileadmin/download/flury-2012-water-LCI-recommendations.pdf

Kounina, A., Margni, M., Bayart, J.-B., Boulay, A.-M., Berger, M., Bulle, C., … Humbert, S. (2013). Review of methods addressing freshwater use in life cycle inventory and impact assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *18*(3), 707–721. Recuperado de: https://doi.org/10.1007/s11367-012-0519-3

Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, *8*(1), 763–809.

Mila i Canals, L., Chapagain, A., Orr, S., Chenoweth, J., Anton, A., & Clift, R. (2010). Assessing freshwater use impacts in LCA, part 2: case study of broccoli production in the UK and Spain. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *15*(6), 598–607. Recuperado de: http://link.springer.com/article/10.1007/s11367-010-0187-0

Mila i Canals, L., Chenoweth, J., Chapagain, A., Orr, S., Antón, A., & Clift, R. (2009). Assessing freshwater use impacts in LCA: Part I—inventory modelling and characterisation factors for the main impact pathways. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *14*(1), 28–42. Recuperado de: http://link.springer.com/article/10.1007/s11367-008-0030-z

Olade. (2014). *Acceso a mercados energéticos, Fase 2, Guatemala*. Organización Latinoamericana de Energía.

Pfister, S., & Hellweg, S. (2009). The water "shoesize" vs. footprint of bioenergy. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *106*(35), E93–E94.

Pfister, S., Koehler, A., & Hellweg, S. (2009). Assessing the Environmental Impacts of Freshwater Consumption in LCA. *Environmental Science & Technology*, *43*(11), 4098–4104. Recuperado de: https://doi.org/10.1021/es802423e

Pfister, S., Vionnet, S., Levova, T., & Humbert, S. (2015). Ecoinvent 3: assessing water use in LCA and facilitating water footprinting. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. Recuperado de: https://doi.org/10.1007/s11367-015-0937-0

Rosenbaum, R. K., Bachmann, T. M., Gold, L. S., Huijbregts, M. A. J., Jolliet, O., Juraske, R., … Hauschild, M. Z. (2008). USEtox---the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *13*(7), 532. Recuperado de: https://doi.org/10.1007/s11367-008-0038-4

Tester, J. W., Drake, E. M., Driscoll, Mi. J., Golay, M. W., & Peters, W. A. (2012). *Sustainable energy: choosing among options* (2nd ed.). Cambridge, Mass: MIT Press.

Upme. (2012). *La Cadena del Carbón*. Colombia: Unidad de Planeación Minero Energética, Ministerio de Energía y Minas. Recuperado de: http://www.upme.gov.co/Docs/Cadena_Carbon_2012.pdf

Consideraciones finales

La energía y los servicios que esta provee son considerados fundamentales para el funcionamiento adecuado y el desarrollo de una sociedad organizada. Muchos de los logros que se pueden esperar del desarrollo integral de un país están, por lo general, apoyados en la satisfacción de necesidades energéticas. De hecho, el suministro universal de energía y el suministro de energía limpia y eficiente son algunos de los principales pilares del desarrollo que se incluyen en las agendas internacionales en la materia, así como en los acuerdos globales para la mitigación de los efectos del cambio climático.

En este contexto, enmarcado en el cumplimiento de convenios internacionales y fundamentado en los sistemas normativo, sectorial e institucional de Guatemala; se ha desarrollado la *Política energética de Guatemala 2013-2027*, la cual tiene como objetivo general **contribuir al desarrollo energético sostenible, con equidad social y respeto al medio ambiente.** Entre los ejes estratégicos de este instrumento se encuentran: a) seguridad de abastecimiento de electricidad a precios competitivos; b) seguridad de abastecimiento de combustibles fósiles a precios competitivos; c) exploración y explotación de reservas petroleras; d) ahorro y uso eficiente de energía; y e) disminución del consumo de leña.

Basado en lo anterior, *Perfil energético de Guatemala* (*Pegua*) aporta insumos técnicos y científicos, analiza la situación actual del sector energético y propone elementos estratégicos para la orientación de políticas, esfuerzos e inversiones pertinentes. Con este derrotero, describe los principales atributos de la demanda y el consumo de energía, así como la disponibilidad y uso de energía renovable y no renovable. Además, desarrolla y valida una propuesta metodológica para evaluar la sostenibilidad de la generación de electricidad en Guatemala, con énfasis en el componente ambiental.

¿Cuáles son los principales atributos y desafíos del sector energético en Guatemala?

De acuerdo con el análisis de los balances energéticos y los flujos de la energía del país para el período 2001-2016, se evidencia que la demanda de energía se ha incrementado de manera sostenida en un promedio aproximado del 7% anual. Para el 2016 se contó con una demanda total de 85,000 KBEP, equivalentes a 5.0 BEP por habitante.

La matriz energética se integra con el fin de analizar la cantidad y fuentes de energía disponibles para atender la demanda de un país. En el caso de Guatemala, de manera simplificada, se ha definido que las principales fuentes de energía son: leña, 60%; combustibles fósiles y derivados, 30%; electricidad, 9%; otras fuentes, 1%. Cabe destacar que el análisis histórico interanual muestra pocos cambios relativos

en esta matriz; además, evidencia tendencias estables y se esperan pocos cambios en el futuro cercano. Todo esto, a pesar del lanzamiento de la referida política energética en el 2013, y pese a los objetivos de cambio propuestos en ella.

Entre los principales obstáculos para alcanzar un desarrollo energético sostenible en Guatemala se encuentra la alta dependencia de leña –principalmente vinculada con el abastecimiento de hogares (más del 90%)–, así como el consumo de combustibles fósiles y derivados –sobre todo relacionado con el abastecimiento del segmento de transporte.

El alto consumo de leña y su tendencia incremental se consideran insostenibles, ineficientes y la contaminantes. El balance entre la oferta natural y demanda es deficitario en cerca del 30%, lo que equivale a aproximadamente 6 millones de toneladas métricas adicionales a la capacidad de regeneración de la naturaleza. Este déficit detectado hace inferir que se está avanzando sobre las reservas forestales del país (Iarna/Inab, 2015) y se está poniendo en alto riesgo el abastecimiento futuro.

Además, los elevados niveles de demanda y consumo de leña son una presión importante, tanto sobre los recursos forestales, como sobre la prestación de servicios ecosistémicos que los bosques brindan a la sociedad y al sector económico, tales como la regulación hidrológica, la regulación local del clima y la biodiversidad, entre otros. De acuerdo con censos y encuestas poblacionales, se ha evidenciado que una gran proporción de hogares rurales y urbanos utiliza leña en fogones abiertos, lo cual es altamente ineficiente y genera emisiones nocivas para la salud (Iarna/Inab, 2015).

Otro problema vinculado con la matriz energética de Guatemala se evidencia en los índices de producción y consumo energético per cápita, los cuales demuestran que las fuentes primarias (no transformadas) de energía son insuficientes para abastecer la demanda local, contribuyendo así, a la dependencia de hidrocarburos importados para satisfacer la demanda.

Entre los hidrocarburos y los combustibles fósiles con mayor demanda cabe mencionar, en orden de importancia, los siguientes: diésel, gasolina y queroseno. Es destacable que estos combustibles abastecen principalmente al subsector de transporte y, en menor escala, a la generación de electricidad.

Derivado de lo anterior, el abastecimiento energético del país, además de ser relativamente caro, también es inestable, ya que es vulnerable frente a la volatilidad de precios del petróleo y frente a la situación política internacional, fenómenos que presentan significativos niveles de incertidumbre. Asimismo, la utilización de esta fuente energética es una de las actividades que conlleva mayor contaminación y emisión de gases de efecto invernadero.

Por otro lado, se logró evidenciar que las metas de abastecimiento universal de energía con equidad no se han alcanzado. Los índices de cobertura de electrificación han aumentado durante el período estudiado, alcanzando en el 2017 un 90% de cobertura a

nivel nacional. Sin embargo, en algunos municipios de los departamentos de Alta Verapaz, Quiché y Petén las tasas de electrificación son menores al 50%. Lo anterior contrasta con el hecho de que esos departamentos se encuentran entre los que mayor número de hidroeléctricas funcionales tienen. Esto puede considerarse alarmante si se toma en cuenta que, tanto la demanda energética nacional como la demanda por habitante, siguen en aumento.

Con respecto a los recursos energéticos renovables, se evidenció, de manera contrastante, que Guatemala cuenta con un gran potencial en la materia**.** Sin embargo, en la actualidad se aprovechan niveles muy bajos en comparación con ese potencial. Por ejemplo, del potencial solar, eólico, geotérmico e hidroeléctrico se aprovechan el 0.01, el 14, el 12 y el 20%, respectivamente.

Un aspecto destacable con relación a las fuentes de energía renovable es que la generada a partir de hidroeléctricas presenta altos niveles de conflictividad social. Por ejemplo, se evidenció que más del 50% de los proyectos hidroeléctricos en operación han presentado algún problema de conflictividad social debido a un conjunto de factores durante el proceso de desarrollo del proyecto.

Por su parte, la producción de etanol a nivel nacional cumple con los estándares de calidad más exigentes en el plano internacional. Destaca que la producción diaria de etanol es suficiente para tener una mezcla E5 y E10 con gasolina. Sin embargo, de acuerdo con expertos consultados, este no es utilizado como combustible, sobre todo debido a vacíos en el marco legal.

El biogás, que se puede obtener a partir de residuos agroindustriales o en rellenos sanitarios por medio de digestión anaerobia, es un recurso que necesita ser estudiado. De acuerdo con información obtenida de los productores energéticos, el vertedero municipal de El Trébol en la ciudad capital de Guatemala ya produce 4 MW de energía. Esto evidencia altos niveles de factibilidad técnica y económica con respecto al uso de desechos sólidos como fuente de energía.

A partir del análisis de sostenibilidad ambiental por medio de métodos relativos al ciclo de vida, se reveló que la generación de electricidad a partir de carbón y búnker produce la mayor contribución de impactos ambientales, especialmente la emisión de gases de efecto invernadero.

Más del 60% de los impactos ambientales es consecuencia de la generación de energía eléctrica mediante combustibles fósiles. La huella de carbono para 1 kWh de electricidad de bajo voltaje se estimó en 0.418 kg CO_2-eq por kWh para el año 2016. En referencia a la huella de agua, se estimó el uso de agua en 17.2 m^3 por kWh de electricidad y el consumo de agua en 0.009 m^3 por kWh para el mismo año. El indicador de escasez de agua Aware para el suministro de electricidad es de 0.0104 m^3 H_2O eq.

Asimismo, la etapa agrícola de cultivo de caña en los sistemas de cogeneración de energía contribuye con un 90% de los impactos de escasez de agua.

Más del 60% de los impactos en la calidad del agua evaluados mediante la categoría de impacto de toxicidad de ecosistemas acuáticos se debe a la operación de minas de carbón en Colombia, de donde proviene la mayor cantidad de carbón importado a Guatemala.

En síntesis, de acuerdo con el análisis de los atributos y tendencias del sector energético, se puede establecer que los objetivos de política trazados con respecto a alcanzar un desarrollo energético sostenible –el cual incluye aspectos de equidad y seguridad energética de los guatemaltecos– aún presenta retos y vacíos importantes. A continuación, se describen algunos elementos medulares que pueden contribuir a alcanzar los objetivos definidos de manera sectorial, plasmados, tanto en la *Política energética de Guatemala 2013-2027,* como en instrumentos técnicos, administrativos y financieros del sector.

Elementos estratégicos para alcanzar el desarrollo energético sostenible y la seguridad energética en Guatemala

Si bien el sector energético de Guatemala ha dado pasos en el abordaje del abastecimiento energético, de acuerdo con el marco de análisis presentado anteriormente resulta evidente que no se han alcanzado objetivos relativos a la seguridad energética de los guatemaltecos y el desarrollo energético sostenible.

Antes de definir los elementos estratégicos del sector energético para avanzar significativamente en el logro de sus objetivos, es preciso retomar como punto de partida aspectos conceptuales fundamentales. La Agencia Internacional de Energía (AIE) define la seguridad energética como la disponibilidad ininterrumpida de fuentes de energía a un precio asequible. La seguridad energética incluye diversos aspectos, entre los que destaca, por un lado, la seguridad energética a largo plazo, la cual se ocupa principalmente de inversiones oportunas para suministrar energía de acuerdo con los desarrollos económicos y las necesidades y límites ambientales.

Por el otro, se encuentra la seguridad energética a corto plazo, la cual se centra en la capacidad del sistema de energía para reaccionar rápidamente a los cambios repentinos en el equilibrio entre la oferta y la demanda.

Entre los objetivos a largo plazo es importante remarcar el concepto operativo de energía sostenible propuesto por Tester (2012), para quien esta se define como la armonía activa entre la disponibilidad equitativa de servicios de energía para todas las personas y la preservación de la tierra para las generaciones futuras.

A continuación, se presentan algunos aspectos relevantes para ser desarrollados o retomados por el sector energético, con énfasis en el sistema institucional vinculado con la rectoría y el fomento de la sostenibilidad energética en Guatemala.

a) **Alcanzar el abastecimiento universal de energía eléctrica.** Para este fin, es importante considerar que la demanda nacional y por habitante muestran una tendencia a incrementos anuales significativos y que la cobertura de ener-

gía eléctrica es del 90% a nivel nacional, aunque en algunos municipios es cercana al 50%. Entre las acciones de mayor relevancia para dinamizar al sector y alcanzar el abastecimiento universal se encuentran las siguientes: promover sistemas autónomos (preferiblemente de energías renovables); desarrollar instrumentos de política que incentiven la coordinación entre entidades del Gobierno: Instituto Nacional de Electrificación (Inde), Ministerio de Energía y Minas (MEM) y Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE) y las empresas distribuidoras de energía eléctrica. Esto último con el fin primordial de activar procesos de electrificación rural masiva. Para ello, también se requiere contar con el soporte de avances tecnológicos, como el desarrollo de sistemas energéticos autónomos de la red de transmisión y distribución.

b) **Implementar acciones efectivas para la reducción del consumo de leña y, al mismo tiempo, fomentar un uso más eficiente.** Para este fin es importante considerar que, de acuerdo con la matriz energética, la leña abastece cerca del 50% de la energía a nivel nacional y que el mayor usuario de este biocombustible es el sector doméstico. Además, los sistemas bioenergéticos son altamente complejos, de manera que requieren un sistema cíclico de operación que incluya procesos de planificación, implementación, revisión, adaptación y mantenimiento.

Sin embargo, estos sistemas cuentan con elementos básicos para su implementación, tales como fomento de masas boscosas con fines de producción de biomasa para usos energéticos (leña); fomento de estufas mejoradas, entre otros, para hacer más eficiente el uso de la leña; información confiable con respecto a la demanda, de acuerdo con atributos ambientales y de la población, así como una rigurosa planificación técnica y socioeconómica de carácter multidisciplinario.

c) **Fomentar la transición entre un estado de alta dependencia de combustibles fósiles hacia el uso de fuentes renovables de energía**. Para este fin es importante considerar que, según la matriz energética, los combustibles fósiles ocupan el segundo lugar en importancia como fuente de energía y que el principal usuario de ellos es el sector transporte. En este sentido, el fomento efectivo de sistemas de transporte eléctrico, cuando sea pertinente y factible, reduciría significativamente la dependencia de los combustibles fósiles y, al mismo tiempo, disminuiría las emisiones de gases de efecto invernadero.

Para mejorar considerablemente el desempeño ambiental del Sistema Nacional Interconectado (SNI) de generación y transporte de energía eléctrica se recomienda desfasar en forma gradual el uso de combustibles fósiles. Es estratégico incrementar la generación de electricidad mediante fuentes renovables, especialmente energía geotérmica, eólica, solar y biogás. Para esto, resulta fundamental desarrollar un sistema normativo y de incentivos capaz de dinamizar el sector hacia este fin.

Es destacable que una buena parte de cogeneradores que se consideran renovables hacen uso de carbón en ciertos períodos del año para suplir la falta de biomasa. Esto debe ser cuantificado y podría incrementar considerablemente las estimaciones de huella de carbono del suministro de electricidad.

d) **Fomentar la transición de un estado alta importación de hidrocarburos y hacia el aumento de conocimiento y aprovechamiento de fuentes locales de estos combustibles.** Para este fin, es importante considerar que la explotación de petróleo, que en su mayor parte se exporta, ha venido decayendo en los últimos años. De 9 millones de barriles que se extraían en 2003, en la actualidad solo se extraen 3 millones. Se sabe que Guatemala cuenta con reservas importantes de este recurso; sin embargo, se presenta alta incertidumbre respecto los volúmenes y ubicación precisa, por ejemplo, de las reservas de petróleo y gas natural. Se cuenta con estimaciones cuantitativas generales que oscilan entre 430 a 526 millones de barriles de petróleo y 3 millones de m^3 de gas natural.

   En este sentido, para lograr una significativa disminución de la importación de estos combustibles uno de los primeros pasos es llenar los vacíos de información geológica nacional pertinentes. Posteriormente, será necesario desarrollar un marco regulatorio e incentivos para el acceso, así como infraestructura de aprovechamiento de derivados de estos combustibles bajo ciertas consideraciones sociales y ambientales.

e) **Llenar vacíos de información estratégica.** Este es un aspecto transversal en el que la academia, junto con las instituciones rectoras del sector, desempeña un papel protagónico. Como ya se ha evidenciado, es impostergable la generación de conocimiento sistémico y el desarrollo de evaluaciones sistemáticas, especialmente en los siguientes temas, estructurados a partir del sistema socioecológico:

Tema general:

i) Evaluación periódica de la evolución y análisis sistémico del sector energético.

Temas con énfasis en el subsistema ambiental:

ii) Oferta y demanda de leña, incluyendo necesidades y factibilidad de establecimiento de bosques energéticos;
iii) Conocimiento preciso de reservas de petróleo, carbón mineral y gas natural;
iv) Evaluación de impactos ambientales derivados de la generación de energía eléctrica a partir de fuentes hídricas, así como métodos de estimación del caudal ecológico en cuencas priorizadas para tal fin;

v) Análisis del potencial y factibilidad económica del uso de basureros municipales para generación de electricidad.

Temas con énfasis en el subsistema económico:

vi) Actualización sistemática de las cuentas ambientales de energía y emisiones, de acuerdo con métodos estandarizados internacionalmente.

Énfasis en los subsistemas social e institucional:

vii) Documentación y análisis de conflictos sociales, especialmente aquellos vinculados con hidroeléctricas;

viii) Identificación y análisis de población con menores niveles de seguridad energética;

ix) Análisis de vacíos normativos;

x) Análisis de vacíos y necesidades de formación de capacidades para la gestión y control del uso y aprovechamiento de los recursos energéticos renovables de Guatemala, con base en premisas estrictas de sostenibilidad, y en función del bien común.

Finalmente, es preciso impulsar eficazmente una nueva era de investigación, transferencia de tecnología e innovación, especialmente vinculada con el fomento masivo de sistemas autónomos de energías renovables a pequeña escala (hogares o comunidad), uso eficiente de la leña y fuentes alternativas de energía.

incyt
nstituto de investigación y proyección
sobre ciencia y tecnología

VRIP
VICERRECTORIA DE
INVESTIGACIÓN Y PROYECCIÓN

Universidad
Rafael Landívar
Tradición Jesuita en Guatemala