



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES  
CAMPO DE CONOCIMIENTO EN ENERGÍA

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LA CONSTRUCCIÓN DE POZOS  
GEOTÉRMICOS PARA LA PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA EN ENERGÍA  
PRESENTA:  
L.F.M. JOSÉ DARIÓ ROJAS HERNÁNDEZ

Director de tesis:  
Dr. Edgar Rolando Santoyo Gutiérrez  
Instituto de Energías Renovables

Instituto de Energías Renovables. Temixco, Morelos. Diciembre del 2016.



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **JURADO ASIGNADO**

Presidente: Dra. Cecilia Martín Del Campo Márquez

Secretario: Dr. Alfonso Aragón Aguilar

Vocal: Dr. Edgar Rolando Santoyo Gutiérrez

1<sup>er</sup> Vocal: Dra. Claudia Tomasini Montenegro

2<sup>do</sup> Vocal: Dr. Edgar Santoyo Castelazo

Lugar donde se realizó la tesis: Instituto de Energías Renovables, IER- UNAM. Temixco, Morelos.

## **TUTOR DE TESIS**

**DR. EDGAR ROLANDO SANTOYO GUTIÉRREZ**

---

**FIRMA**

# Índice general

<b>Agradecimientos</b>	<b>VIII</b>
<b>Dedicatorias</b>	<b>IX</b>
<b>Abreviaciones</b>	<b>X</b>
<b>Resumen</b>	<b>XIII</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Generalidades de Energía Geotérmica</b>	<b>7</b>
2.1. Fundamentos Generales . . . . .	8
2.2. Campos Geotérmicos de México . . . . .	9
2.2.1. Cerro Prieto, Baja California . . . . .	13
2.2.2. Los Azufres, Michoacán . . . . .	14
2.2.3. Los Humeros, Puebla . . . . .	14
2.2.4. Las Tres Vírgenes, Baja California . . . . .	15
2.2.5. Cerritos Colorados, Jalisco . . . . .	16
2.3. Tecnologías de Construcción de Pozos Geotérmicos . . . . .	16
2.3.1. Perforación de Pozos . . . . .	17
2.3.2. Principales Operaciones de Perforación . . . . .	18
2.3.3. Operaciones de Revestimiento y Cementación . . . . .	22
2.3.4. Técnicas de Perforación en el Estado del Arte . . . . .	24

2.4.	Impactos Ambientales . . . . .	25
2.4.1.	Uso del Suelo . . . . .	28
2.4.2.	Riesgos Geológicos . . . . .	29
2.4.3.	Contaminación Térmica . . . . .	29
2.4.4.	Emisiones de Gases a la Atmósfera . . . . .	30
2.4.5.	Residuos Sólidos: Emisiones al Suelo y Agua . . . . .	31
2.4.6.	Uso y Consumo de Agua . . . . .	32
2.4.7.	Impactos a la Biodiversidad . . . . .	33
2.4.8.	Contaminación Acústica . . . . .	33
2.5.	Legislación dentro del Marco de las Energías Renovables . . . . .	33
<b>3.</b>	<b>Conceptos Básicos de Sustentabilidad Ambiental</b>	<b>36</b>
3.1.	Fundamentos del Análisis de Ciclo de Vida (LCA) . . . . .	37
3.1.1.	Definición de Metas y Alcance . . . . .	40
3.1.2.	Análisis del Inventario . . . . .	41
3.1.3.	Evaluación de los Impactos . . . . .	42
3.1.4.	Interpretación . . . . .	43
3.2.	Métodos de Evaluación y Categorías de Impacto . . . . .	44
3.2.1.	Método Estandarizado CML 2 . . . . .	44
3.2.2.	Método Eco-Indicator 99 . . . . .	49
3.3.	Herramientas Requeridas para los Estudios LCA . . . . .	50
3.3.1.	Descripción General del Software GaBi <sup>®</sup> . . . . .	51
3.3.2.	Descripción General de la Base de Datos EcoInvent <sup>®</sup> . . . . .	52
<b>4.</b>	<b>Antecedentes de Estudios LCA en Sistemas Geotérmicos</b>	<b>53</b>
<b>5.</b>	<b>Sustentabilidad Ambiental de la Construcción de un Pozo Geotérmico</b>	<b>58</b>
5.1.	Meta y Alcance del Estudio . . . . .	59
5.1.1.	Descripción del Sistema, Límites del Sistema y Función del Sistema . . . . .	60
5.1.2.	Consideraciones . . . . .	62

5.1.3. Categorías de Impacto . . . . .	63
5.2. Creación y Análisis del Inventario . . . . .	64
5.3. Evaluación de los Impactos . . . . .	67
5.3.1. Calentamiento Global (GWP) . . . . .	70
5.3.2. Agotamiento de Recursos Abióticos de Elementos y Fósil (ADP) . . . . .	70
5.3.3. Potencial de Ecotoxicidad Acuática Marina (MAETP) . . . . .	73
5.3.4. Potencial de Toxicidad Humana (HTP) . . . . .	76
5.3.5. Potencial de Ecotoxicidad Acuática de Agua Dulce (FAETP)) . . . . .	77
5.3.6. Potencial de Ecotoxicidad Terrestre (TETP) . . . . .	77
5.3.7. Potencial de Acidificación (AP) . . . . .	78
5.3.8. Potencial de Eutrofización (EP) . . . . .	81
5.3.9. Potencial de Agotamiento de la Capa de Ozono (ODP) . . . . .	83
5.3.10. Potencial de Creación de Ozono Fotoquímico (POCP) . . . . .	83
5.4. Análisis de Sensibilidad y Escenarios . . . . .	85
5.4.1. Escenario: Variación del Espesor de la TR . . . . .	86
5.4.2. Escenario: Reemplazo del diésel para el Sistema de Potencia . . . . .	88
5.4.3. Escenario: Variación de la Profundidad de Pozo Construido . . . . .	93
<b>6. Conclusiones y Trabajo a Futuro</b>	<b>97</b>
<b>Bibliografía</b> .....	<b>99</b>

# Índice de figuras

1.1. Producción de energía primaria reportada a nivel mundial y en México en los años 2012 y 2013, respectivamente (Fuente: SENER (2014)). . . . .	2
2.1. (a) Generación geotermoeléctrica mundial producida por tipo de tecnología (Bayer et al., 2013). (b) Generación geotermoeléctrica producida en México por tipo de planta geotérmica (Datos compilados de: L. Gutiérrez-Negrín (2015)). . . . .	8
2.2. Localización de los proyectos de generación geotermoeléctrica de México. La imagen se tomó del Inventario Nacional de Energías Renovables - INERE (SENER y CFE, 2016). . . . .	10
2.3. Características de los principales campos geotérmicos mexicanos. 1-F, Unidad de flasheo simple; 2-F, Unidad de doble flasheo; B, Unidad binaria. Información recopilada de DiPippo (2012a); L. Gutiérrez-Negrín (2015); L. Gutiérrez-Negrín et al. (2015); Jaimes-Maldonado et al. (2012b). . . . .	12
2.4. Esquema representativo del Sistema de Circulación de Fluidos de Perforación. El diagrama no está a escala. . . . .	20
2.5. Descripción esquemática del Sistema de Izaje o de Levantamiento de Carga. El diagrama no está a escala. . . . .	21
3.1. Modelo del Análisis de Ciclo de Vida. . . . .	38
3.2. Metodología de Análisis de Ciclo de Vida de acuerdo a la norma ISO-14044. . . .	39
3.3. Diagrama de flujo representativo del análisis del inventario. . . . .	42

5.1. Diagrama de flujo de las etapas generales que constituyen la construcción de un pozo geotérmico de producción. . . . .	61
5.2. Diagrama de flujos de materia y energía para los procesos de la construcción de un pozo de producción. . . . .	64
5.3. Consumo de recursos y emisiones por proceso. Otros engloba el diésel utilizado en la preparación del sitio (S1); la bentonita para el lodo de perforación y la sosa cáustica (S2); la bentonita de aditivo para el cemento y la harina sílica (S4). . . . .	68
5.4. Impactos ambientales de ciclo de vida de la construcción de un pozo en una planta geotermoeléctrica. . . . .	71
5.5. Potencial de Calentamiento Global (GWP) para cada uno de los procesos en la construcción del pozo geotérmico de producción. . . . .	72
5.6. Potencial de Agotamiento Abiótico de elementos y fósil. . . . .	74
5.7. Contribución de los procesos al Potencial de Ecotoxicidad Acuática Marina. . . . .	75
5.8. Contribución en valores absolutos y porcentuales correspondientes al Potencial de Toxicidad Humana. . . . .	76
5.9. Resultados del análisis de contribución estimados para el Potencial de Ecotoxicidad Acuático de Agua Dulce. . . . .	78
5.10. Potencial de Ecotoxicidad Terrestre de la construcción de un pozo de producción geotérmico para producir electricidad. . . . .	79
5.11. Totales de contribución al Potencial de Acidificación (AP). . . . .	80
5.12. Resultados del análisis de contribución correspondiente al Potencial de Eutrofización. . . . .	82
5.13. Análisis de contribución del Potencial de Agotamiento de la Capa de Ozono. . . . .	83
5.14. Resultados del análisis de contribución estimados para el Potencial de Creación de Ozono Fotoquímico. . . . .	84

# Índice de tablas

5.1. Materia y energía requeridas para la construcción: para un pozo de producción y por UF. . . . .	66
5.2. Resultados totales por categoría de impacto de la perforación de pozos geotérmicos de producción para producir 1 kWh de electricidad. . . . .	69
5.3. Potencial de calentamiento global para un pozo de producción en una planta geotermoeléctrica. . . . .	72
5.4. Contribuciones por proceso al Potencial de Agotamiento Abiotico (ADP) de elementos y fósil. . . . .	73
5.5. Porcentajes y valores absolutos de contribución por proceso al al Potencial de Ecotoxicidad Acuática Marina (MAETP). . . . .	75
5.6. Valores absolutos y porcentajes de contribución al Potencial de Toxicidad Humano (HTP). . . . .	77
5.7. Resultados al FEATP por cada uno de los procesos considerados. . . . .	79
5.8. Valores de contribución al Potencial de Ecotoxicidad Terrestre (TETP) por proceso. . . . .	80
5.9. Resultados del análisis de contribución del Potencial de Acidificación. . . . .	81
5.10. Valores absolutos del Potencial de Eutrofización (EP) para cada uno de los procesos en la construcción de un pozo geotérmico de producción. . . . .	82
5.11. Valores absolutos y porcentuales de contribución al ODP por cada uno de los procesos del sistema. . . . .	84
5.12. Aportación absoluta y porcentual a la categoría de impacto POCP por cada proceso. . . . .	85

5.13. Cantidad de masa de acero promedio, mínima y máxima para la tubería de revestimiento. . . . .	88
5.14. Requerimientos promedio, mínimo y máximos de masa de acero para el revestimiento por UF y para construir un único pozo. . . . .	88
5.15. Variación en las categorías de impacto en función del mínimo y máximo de acero requerido para las TR en relación al caso base. . . . .	89
5.16. Insumos de materia y energía para producir una tonelada de biodiésel con cardo ( <i>Cynara Cardunculus</i> ). . . . .	92
5.17. Inventario de Ciclo de Vida para los tres escenarios de profundidades promedio, mínima y máxima. El caso base se considera a una profundidad de 2200m, el mínimo a 1400 m y el máximo a 2800 m de profundidad. . . . .	95
5.18. Resultados del análisis de sensibilidad correspondiente a la variación en la profundidad del pozo. . . . .	96

# Agradecimientos

Quiero agradecer al posgrado en ingeniería de la UNAM por permitirme el uso de sus instalaciones. En especial a las personas que laboran en el Instituto de Energías Renovables IER, quienes compartieron sus conocimientos y contribuyeron a mi formación profesional. Especialmente agradezco a mi asesor el Dr. Edgar Rolando Santoyo Gutiérrez por su apoyo siempre dispuesto y a la Dra. Claudia Tomasini por su tiempo y dedicación al proyecto con lo que hicieron posible la conclusión de esta tesis. De igual manera agradezco a todo el jurado que gustosamente acepto participar en la revisión de este texto con sus valiosos comentarios y sugerencias.

Agradezco al Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por su apoyo y patrocinio para la realización de este proyecto de tesis a través de la beca proporcionada.

# Dedicatorias

Te dedico la culminación de esta etapa especialmente a ti, Alhelí Agni Rojas Vazquez, que a pesar de que no pudiste terminar conmigo este proyecto, si fuiste quien me impulsó a subirme en este barco y retomar mi vida académica.

A ti, madre que eres un gran ejemplo de superación y siempre me has apoyado en todo.

A mis familiares y amigos que me apoyaron durante mis estudios. Especialmente mis tíos Consuelo, Elva y Edgar.

# Acrónimos, Abreviaciones y Siglas

ACV	Análisis de Ciclo de Vida
ADP	Potencial de Agotamiento de Recursos Abióticos: Abiotic Resource Depletion Potential
AGM	Asociación Geotérmica Mexicana
AP	Potencial de Acidificación: Acidification Potential
API	Instituto Americano del Petróleo: American Petroleum Institute
CeMIE-Geo	Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica
CF	Combustibles Fósiles
CML	Center of Environmental Science of Leiden University
CONACyT	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
CVM	Cinturón Volcánico Mexicano
EG	Energía Geotérmica
EGS	Sistema Geotérmico Mejorado: Enhanced Geothermal System
EP	Potencial de Eutrofización/Eutroficación: Eutrophication Potential
ER	Energías Renovables
ERA	Evaluación de Riesgo Ambiental
ETP	Potencial de Eco Toxicidad: Eco-Toxicity Potential
FAETP	Potencial de Ecotoxicidad Acuática de Agua Dulce: Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential
GaBi	Ciclo de Vida de Ingeniería: del Alemán Ganzheitlichen Bilanzierung
GEI	Gases de Efecto Invernadero

GWP	Potencial de Calentamiento Global: Global Warming Potential
HDR	Sistema de Roca Seca Caliente: Hot Dry Rock
HTP	Potencial de Toxicidad Humana: Human Toxicity Potential
IA	Impactos Ambientales
IGA	Asociación Internacional de Geotermia: International Geothermal Association
ILU	Impactos de Uso de Tierra: Impacts of Land Use
ISO	Organización Internacional para la Estandarización: International Organization for Standardization
LAERFTE	Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética
LCA	Análisis de Ciclo de Vida: Life Cycle Assessment
LCI	Análisis del Inventario de Ciclo de Vida: Life Cycle Inventory Analysis
LCIA	Evaluación de los Impactos del Ciclo de Vida: Life Cycle Impact Assessment
LEG	Ley de Energía Geotérmica
LIE	Ley de la Industria Energética
MAETP	Potencial de Ecotoxicidad Acuática Marina: Marine Aquatic Ecotoxicity Potential
NPK	Relación entre los elementos químicos nitrógeno, fósforo y potasio
ODP	Potencial de Agotamiento de la Capa de Ozono: Stratospheric Ozone Depletion Potential
PEAER	Programa Especial para el Aprovechamiento de las Energías Renovables
PEMEX	Petróleos Mexicanos
POCP	Potencial de Creación de Oxidantes Fotoquímicos: Photochemical Oxidants Creation Potential
RE	Reforma Energética
RLEG	Reglamento de la Ley de Energía Geotérmica
SENER	Secretaría de Energía
SF	Solar Fotovoltaica

TETP	Potencial de Ecotoxicidad Terrestre: Terrestrial Ecotoxicity Potential
TP	Potencial de Toxicidad: Toxicity Potential
TR	Tubería de Revestimiento
UF	Unidad Funcional

# Resumen

El carácter finito de los energéticos fósiles, aunado a las grandes afectaciones ambientales resultantes de su explotación, han creado un cambio de conciencia internacional con una tendencia por aumentar la implementación de las energías renovables. Las fuentes renovables de energía constituyen una alternativa viable para llegar a una independencia energética fósil y una solución a la creciente demanda energética con apego a políticas y estándares ambientales internacionales. En este último contexto, se requieren estudios para evaluar cuantitativa e integralmente los impactos ambientales involucrados con el uso de las energías renovables, entre los cuales destacan los análisis de ciclo de vida de estas tecnologías como las metodologías más adecuadas para alcanzar o demostrar la sustentabilidad de estas fuentes energéticas.

Atendiendo a los compromisos establecido por México para alcanzar en el 2024 una diversificación energética del 35 % basada en energías renovables, se está dando impulso principalmente a las tecnologías solares, eólicas y geotérmicas. En el contexto geoenergético, México cuenta con una capacidad instalada por arriba de los 1,000 MWe para producir electricidad con energía geotérmica, ocupando el cuarto lugar en el mundo y el primero en América Latina. Con los cambios de paradigma y nuevas legislaciones derivadas de la Reforma Energética se espera impulsar el crecimiento e implementación de las energías renovables con proyecciones más alentadoras, en donde se convierta a la industria geotérmica en una de las opciones tecnológicas importantes para apoyar la transición de las energías no-renovables a las fuentes renovables.

Con el objeto de establecer un escenario favorable de sustentabilidad en el aprovechamiento de la energía geotérmica, en el presente trabajo de tesis se propone sentar las bases iniciales para un análisis de sustentabilidad ambiental bajo el enfoque de un Análisis de Ciclo de Vida (“Life Cycle

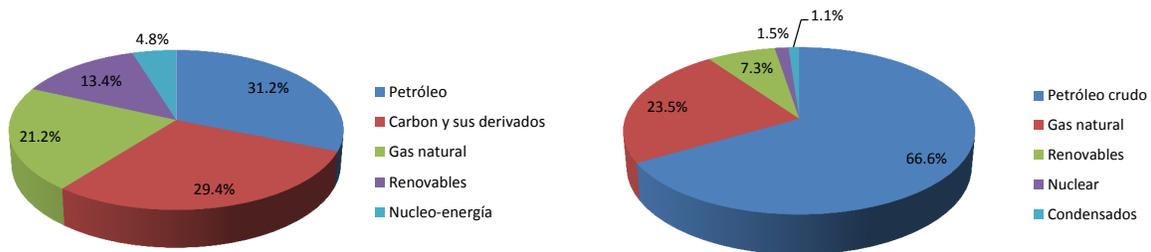
Assessment”, referido simplemente como LCA por su acrónimo) para modelar o evaluar los posible impacto ambiental causados por la construcción de pozos geotérmicos verticales o direccionales.

A partir de la modelación LCA mediante el uso del software especializado GaBi, se obtuvo como primera aproximación, la estimación cuantitativa de los principales impactos ambientales con base en requerimientos de energía y materia, y de las emisiones de salida resultantes de este proceso de construcción usando un sistema base conceptualizado por un pozo geotérmico típico de producción. A partir de este caso de análisis, se identifican las fases de la perforación que producen una mayor afectación ambiental y se analizan diferentes escenarios para mitigar o minimizar estos impactos ambientales. Los resultados que se generan sugieren cambios o mejoras en el proceso de construcción del pozo que podrían tener una disminución significativa de los impactos ambientales, si éstos se implementaran.

# Capítulo 1

## Introducción

El consumo de energía es considerado como uno de los factores fundamentales requeridos para el desarrollo, sustento y preservación de la humanidad. Es de gran interés no solo científico y tecnológico, sino también para las economías, las sociedades y el medio ambiente. Si bien la energía es fuente de desarrollo y ayuda a satisfacer las necesidades básicas de la humanidad, su producción continua representa una fuente de estrés ambiental. Actualmente en el mundo se tiene una gran dependencia en los combustibles fósiles (CF) para la producción de energía, ver Fig. 1.1. Por ejemplo, de acuerdo con las estadísticas reportadas por la Secretaría de Energía (SENER, 2014), la producción mundial de energía primaria en el 2012, el 81.8 % de esta generación fue obtenida del consumo de combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural), mientras que el 13.4 % fue producida de energías renovables (ER) y el restante 4.8 % de energía nuclear. De esta producción, el 18.1 % del consumo mundial de energía fue usada para la generación de electricidad. En México, aproximadamente el 90.5 % de la producción total de energía primaria fue con CF y sólo el 7 % de ER; de los cuales el 4.2 % fue a partir de biomasa, el 1.1 % hidroenergía y el 1.7 % restante geoenergía, solar y eólica (SENER, 2014). Es importante notar que la producción de energía eléctrica requirió del 17.1 % del consumo total energético del país para satisfacer su demanda, siendo el sector industrial el principal consumidor de energía eléctrica al ser el causante por sí sólo del 10.85 % del gasto total energético para producirla, seguido del sector residencial, comercial y público con un consumo del 5.44 %, el sector agropecuario tuvo apenas un consumo del 0.7 % y finalmente el



(a) Producción mundial de energía primaria.

(b) Producción primaria de energía en México.

Fig. 1.1: Producción de energía primaria reportada a nivel mundial y en México en los años 2012 y 2013, respectivamente (Fuente: SENER (2014)).

sector de transporte que contribuyo con el 0.01 % del consumo total de energía para producir electricidad. La energía eléctrica necesaria para mantener las necesidades del sector industrial equivale a la tercera parte (32.9 %) del consumo energético total de ese sector. El escenario para el sector residencial, comercial y público es similar, la energía eléctrica representa el 30.2 % de su consumo energético total. El 23.5 % del total del gasto energético del sector agropecuario fue en electricidad. Y finalmente, el gasto de energía eléctrica dentro del sector de transporte es apenas el 0.2 % del consumo total energético del sector. En general, la electricidad como producto energético representa un porcentaje significativo para mantener en funcionamiento a la mayoría de los diferentes sectores (residencial, comercial, publico, industrial y agropecuario), estando en segundo lugar de importancia con un intervalo del 23.5 % hasta un 32.9 %, únicamente por abajo de hidrocarburos como el diésel, el gas licuado o el gas seco.

El sector del transporte es el único donde la electricidad no contribuye de manera significativa, estando éste dominado en primer lugar por la gasolina seguido por el diésel. De la capacidad eléctrica instalada en México para servicios públicos, el 68.3 % se produce con plantas a partir de CF (hidrocarburos y carbón), el 24 % con plantas hidroeléctricas, el 1.5 % con geotermia, el 1.1 % con eólica y solar fotovoltaica (SF); el restante 2.6 % se produce con plantas nucleares (L. Gutiérrez-Negrín et al., 2015). Por otro lado, es abismal el aumento de precios a los productos refinados. En el reporte mensual de Petróleos Mexicanos (PEMEX, 2015) se puede ver a detalle el aumento en los precios al público de sus productos petrolíferos del 2010 a la fecha. Aunado a esto,

en 2013 el índice de independencia energética en México alcanzó un valor de 1, lo que significó, que la producción de energía fuera igual al consumo nacional. Esto se debió a una disminución en la producción desde 2005 y a un crecimiento en el consumo durante el mismo periodo (SENER, 2014).

Esta ha sido la tendencia observada a nivel mundial, el consumo energético de las naciones va en aumento al mismo tiempo que se están agotando los CF, ocasionando a su vez mayores emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) con las subsecuentes implicaciones al calentamiento global y al cambio climático. Para satisfacer la creciente demanda energética, al mismo tiempo que se intenta inhibir la dependencia energética fósil, se han desarrollado tecnologías y estrategias para la implementación de las ER, además de legislaciones que pretenden impulsar su uso alrededor del mundo como una respuesta o solución a la disminución de los recursos energéticos fósiles, al incremento de precio en la producción de energía (electricidad y combustibles refinados), al cumplimiento de las políticas ambientales enfocadas al manejo del calentamiento global y al cambio de conciencia social en relación a los problemas ambientales (Martín-Gamboa et al., 2015). No obstante estas soluciones tecnológicas, se reconoce que la investigación en relación a la estimación cuantitativa de los IA provenientes del uso de dichas tecnologías ha sido escasa o simplemente despreciada.

La información disponible a este respecto se enfoca principalmente en los impactos derivados del proceso de aprovechamiento de las energías renovables, enmascarando la contribución de otras etapas involucradas en el respectivo ciclo de vida. De ahí la necesidad de considerar el ciclo de vida durante la evaluación ambiental de los procesos involucrados en la explotación de las ER, de modo que se evalúen los IA derivados de su uso en todas sus etapas: adquisición de la materia prima para su desarrollo, producción e instalación; la operación del sistema; y al término de su periodo útil de vida las actividades de recolección, manejo de desechos y/o reutilización (Rebitzer et al., 2004).

Entre la gama de fuentes de ER posibles, la Energía Geotérmica (EG) se considera una de las más fiables producto de la madurez alcanzada en las tecnologías utilizadas para su explotación, los altos factores de planta y su independencia a las fluctuaciones climáticas. La capacidad mundial total instalada en plantas geotérmicas es aproximadamente de 13 GWe y se prevé llegar a los 21 GWe para el año 2020 de acuerdo a los datos reportados de la literatura por Tomasini-Montenegro

et al. (2016). En México, como resultado de la reforma energética, de la Nueva Ley de Energía Geotérmica (LEG) y de una mejor articulación entre la academia y la industria a través de la creación del Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CEMIE-Geo), se espera un mayor crecimiento en la industria geotérmica (Cámara de Diputados México, 2014a). Como parte de este fuerte impulso se hace imperativo y urgente realizar estudios de sustentabilidad ambiental para evaluar los IA (positivos y negativos) que se generan sobre su uso con la finalidad de establecer un mejor progreso energético y una ruta ambientalmente sustentable. No obstante este promisorio crecimiento y de la urgente necesidad de este tipo de estudios, se tiene que reconocer que la adopción de metodologías para la evaluación más realista de IA de la EG y demás tecnologías basadas en ER han estado ausentes tanto en México como en muchos otros países en vías de desarrollo. En este contexto, avances sustantivos e integrales se están logrando sólo en países desarrollados, tales como Estados Unidos de Norte América, algunos países europeos (Italia, Reino Unido, Alemania, España, Francia, entre otros), Islandia y Japón, en dónde se vienen evaluando dichas tecnologías mediante los estudios de LCA.

En un contexto muy particular, los análisis de LCA como una de las metodologías más adecuadas para evaluar la sustentabilidad ambiental de las tecnologías geotérmicas son urgentemente requeridas. Dentro de este escenario, la evaluación de la sustentabilidad ambiental de las tecnologías geotérmicas es actualmente concebida como una tarea compleja debido a que los inventarios de ciclo de vida son limitados o rara vez disponibles, ya que la mayoría de estas bases de datos se mantienen en forma muy confidencial o simplemente no existen. Además, los impactos ambientales inferidos a la fecha se consideran muy específicos de las plantas evaluadas en cada sitio y generalmente se obtienen bajo ciertas suposiciones, de tal forma que no es válido extenderlos o generalizarlos a todas las plantas geotérmicas reportadas en la literatura y usadas a nivel comercial. Estos IA difícilmente se pueden extrapolar a otros sitios ya que las condiciones geológicas de los tipos de reservorios geotérmicos y los geofluidos producidos en éstos son únicos. Asimismo, existen otras razones de carácter más técnico que hacen difícil llevar a cabo una evaluación de sustentabilidad a las tecnologías geotérmicas, tales como, la caracterización química y cuantificación del vapor y gases emitidos antes (en su fase natural) y después de la explotación (como producto de la emisión de las plantas), incluyendo los efectos de las plantas eléctricas sobre los acuíferos, el

uso de nuevas tecnologías con mejores procesos de conversión de energía además de los factores económicos y sociales (Tomasini-Montenegro et al., 2016). No obstante hay que reconocer que la fase vapor del fluido geotérmico esta principalmente compuesta por agua y por una fracción de gases (entre un 2 % y 10 %), de los cuales el CO<sub>2</sub> constituye el principal gas con una contribución entre el 80 % y el 90 % en peso, y la fracción restante por otros gases, tales como el H<sub>2</sub>S, NH<sub>2</sub>, He, etc, (Santoyo et al., 1991).

Como antecedentes primarios de los estudios LCA realizados escasamente a la generación geotermoléctrica, destacan los trabajos reportados por: Martín-Gamboa et al. (2015), Sullivan et al. (2010), etc., en los cuales se reporta generalmente que la fase de construcción de un pozo constituye una de las etapas con mayores contribuciones a los impactos ambientales, de ahí que el presente trabajo se haya enfocado en analizar con mayor detalle los posibles IA que se generan por la construcción de un pozo geotérmico de producción.

Por otro lado, las plantas geotérmicas con tecnología de flasheo simple son las que producen la mayor cantidad de electricidad tanto en México como a nivel internacional. Estas son las premisas consideradas para evaluar el rendimiento ambiental de la construcción de un pozo de producción mexicano para una planta de flasheo simple.

En los siguientes capítulos se presenta en forma resumida el estado o escenario actual de la geotermia en México, la capacidad instalada y las condiciones de sus principales campos geotérmicos, haciendo énfasis a sus capacidades de producción, a las características de sus pozos y a las características de los fluidos producidos en éstos. Asimismo, se expone su marco ambiental actual y se propone algunas tareas para mitigar completamente los problemas ambientales adversos causados por la construcción de los pozos con un enfoque del análisis de ciclo de vida de las plantas geotermoeléctricas.

Se describe el caso de un proceso típico de perforación similar al practicado en campos geotérmicos de México. En este trabajo de investigación se introduce la herramienta y la metodología LCA usada para evaluar la sustentabilidad ambiental de la construcción de un pozo geotérmico de producción con el doble propósito de dar a conocer la terminología y así presentar los trabajos realizados en el mundo que bajo un ACV analizan diferentes sistemas geotérmicos. La metodología LCA aplica las cuatro etapas establecidas en las normas ISO-14040 e ISO-14044 para evaluar los

posibles IA que se pueden causar de la construcción de un pozo geotérmico. Asimismo, se definen la meta y alcance del estudio, se hace el análisis del inventario de ciclo de vida para el sistema estudiado, se evalúan los impactos y finalmente se hace la interpretación de resultados. En función de los resultados obtenidos se evalúa el sistema para proponer diferentes escenarios y se analizan los cambios propuestos para mitigar o reducir los posibles IA causados durante la construcción.

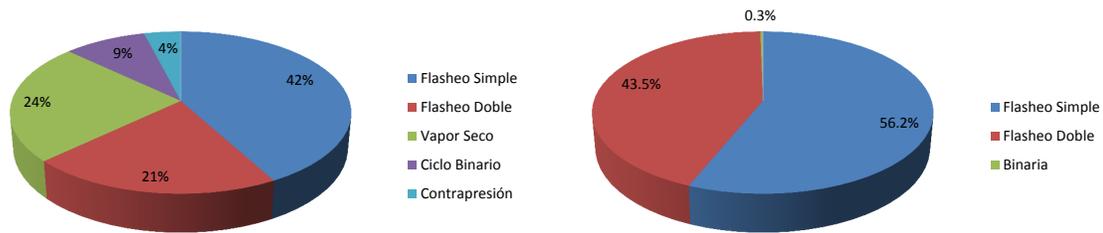
Con este trabajo se pretende ayudar a los tomadores de decisiones y principales actores de la generación geotermoeléctrica a impulsar proyectos de generación en un marco de sustentabilidad ambiental. México cuenta con un gran potencial geotérmico para generar electricidad, no obstante el gran avance mostrado por los proyectos comerciales establecidos por la CFE, se requiere realizar los proyectos en un contexto de sustentabilidad, sin embargo no se tiene suficiente información acerca de los impactos de ciclo de vida. Se espera que el análisis y los resultados aquí presentados sirvan de guía a los tomadores de decisiones para que la industria geotérmica sea una mejor opción sustentable en beneficio de la equidad y la independencia energética sin dejar de ser un recurso amigable al ambiente.

## Capítulo 2

# Generalidades de Energía Geotérmica

Una de las opciones tecnológicas disponibles para la transición de las energías fósiles a las renovables es, sin duda alguna, la energía geotérmica o geotermia (EG). No depende del sol lo que le da la ventaja de ser no intermitente; tiene la capacidad de proveer una carga base a la red eléctrica, generalmente con un factor de planta por arriba del 90 %; las emisiones promedio de GEI en las instalaciones geotermoeléctricas varían entre los 40.0-60.0 g CO<sub>2</sub> eq/kWh<sub>e</sub> con valores mínimos alrededor de 11.0 g CO<sub>2</sub> eq/kWh<sub>e</sub> y máximos de 78.0 g CO<sub>2</sub> eq/kWh<sub>e</sub>.

A pesar de que los sistemas hidrotermales “convectivos” han sido los sistemas comercialmente explotados en todo el mundo y que éstos requieren de un gradiente geotérmico por arriba del normal de la tierra ( $> 33.3^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ), en los últimos años se está abriendo la posibilidad de explotar los sistemas de roca seca caliente (HDR, por su definición en inglés “Hot Dry Rock”), los cuales por sus requerimientos de ingeniería avanzada dan paso a los sistemas geotérmicos mejorados (EGS, por su definición en inglés “Enhanced Geothermal Systems”). Con la disponibilidad de ambos sistemas, se puede incrementar la explotación de los recursos geotérmicos en el mundo elevando para elevar y maximizar el potencial geoenergético disponible en la Tierra. Estas cualidades no sólo hacen a las tecnologías geotérmicas una solución clave para mitigar los problemas energéticos y ambientales asociados con un sistema basado en la energía fósil, sino que también las hacen una opción económica para producir electricidad con costos competitivos que varían entre 0.04 y 0.07 USD/kWh<sub>e</sub> (Amponsah et al., 2014).



(a) Generación mundial de geoelectricidad.

(b) Generación nacional de geoelectricidad.

Fig. 2.1: (a) Generación geotermoeléctrica mundial producida por tipo de tecnología (Bayer et al., 2013). (b) Generación geotermoeléctrica producida en México por tipo de planta geotérmica (Datos compilados de: L. Gutiérrez-Negrín (2015)).

## 2.1. Fundamentos Generales

Hay varios tipos de recursos geotérmicos y por ende diferentes tecnologías usadas para su explotación. Los usados típicamente en la producción de electricidad son los recursos que proceden de sistemas hidrotermales aunque actualmente ya existen plantas pilotos EGS, como el proyecto de Soultz-sous-Forêts en Francia con una capacidad instalada de 1.5 MWe. A nivel mundial, el 42 % de la electricidad generada con recursos geotérmicos se obtiene de tecnologías de flasheo simple, el 24 % por plantas de vapor seco, el 21 % por plantas de doble flasheo, el 9 % con plantas de ciclo binario, y sólo el 4 % con plantas a contrapresión con descarga atmosférica (Bayer et al., 2013). En México, se tiene un escenario similar (ver Fig. 2.1), del total de la capacidad instalada (1,055 MWe), el 56.2 % de la electricidad es producida por plantas de flasheo simple, el 43.5 % con tecnología de doble flasheo, y las 2 únicas plantas existentes de ciclo binario en el campo geotermico de Los Azufres producen el 0.3 %. El principio de explotación del recurso geotérmico es simple. Se perforan uno o más pozos dentro de un yacimiento o reservorio, por donde el fluido caliente es extraído hacia la superficie para usarse turbinas de vapor para transformar la energía térmica en mecánica y eléctrica. La capacidad geotermoeléctrica mundial total instalada es de alrededor de 13 GW (Bertani, 2016). Sin embargo, solo 24 países explotan actualmente el recurso geotérmico para producir electricidad (Bayer et al., 2013); siendo Estados Unidos el líder en este renglón productivo con 3,525 MWe, seguido por Filipinas con 1,870 MWe e Indonesia con 1,341 MWe. México ocupa

el cuarto lugar con una capacidad instalada de 1,055 MWe y una capacidad efectiva de 890 MWe. Entre los países ya mencionados, sumándole Italia, Islandia, Nueva Zelanda y Japón, se produce más del 90 % de la capacidad instalada a nivel mundial.

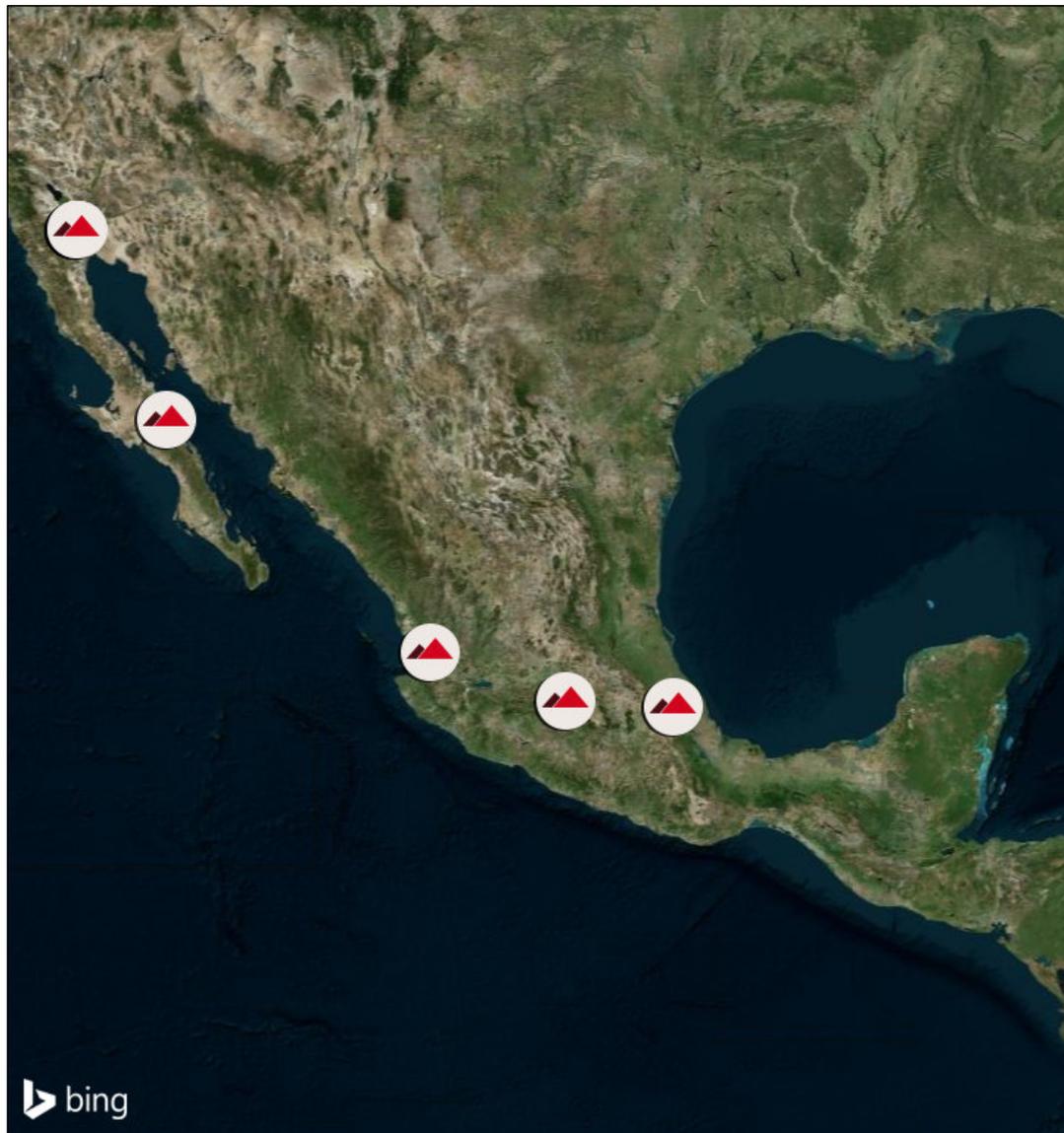
En el contexto nacional, México tiene 4 campos geotérmicos actualmente explotados con estos fines de generación, a saber, Cerro Prieto, B. C.; Los Azufres, Michoacán; Los Humero, Puebla; Las Tres Vírgenes, B. C. S.): ver Fig. 2.2, todos operados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y uno más localizado en el Domo San Pedro en Nayarit, el cual con la apertura de la Reforma Energética (Cámara de Diputados México, 2013) está siendo explotado por la compañía privada Grupo Dragón, S.A. de C.V desde el 2015.

Por otro lado, la energía geotérmica tiene otros usos directos que repercuten en programas de ahorro y uso eficiente de muchos países. Lund y Boyd (2015) reportan que actualmente más de 80 países emplean la geotermia de manera directa en aplicaciones tales como: calefacción, balnearios, deshidratación de vegetales, invernaderos, secado de madera, bombas de calor, entre otras. Los países con mayor capacidad instalada en estas aplicaciones son China (17,879 MWt), Estados Unidos de Norteamérica (17, 416 MWt) y Suecia (5,600 MWt).

## **2.2. Campos Geotérmicos de México**

La capacidad eléctrica instalada en México no ha cambiado mucho en los últimos cinco años en 2012 era de 958 MWe con una capacidad de operación de 883 MWe (L. Gutiérrez-Negrín, 2012). En diciembre del 2013, la capacidad instalada subió a 1,017 MWe aunque la capacidad efectiva de operación fue menor, 839 MWe, esto debido a que cuatro de las unidades más antiguas del campo geotérmico Cerro Prieto estuvieron fuera de operación por cuestiones de mantenimiento, así como las 2 únicas unidades plantas de ciclo binario instaladas en Los Azufres, Mich. (L. Gutiérrez-Negrín et al., 2015). La AGM (2016) reporta que a finales del 2014 la capacidad instalada estaba en 1,081 MWe con una capacidad efectiva de operación de 883 MWe. Se espera que para el 2020 la capacidad de operación sea de 1,395 MWe, a través de los proyectos de generación de 715 MWe de Cerro Prieto, 306 MWe de Los Azufres, 107.4 de Los Humeros, 12 MWe de Las Tres Vírgenes, 50 MWe y 100 MWe de los campos geotérmicos de Domo San Pedro y El Ceboruco respectivamente,

## INVENTARIO NACIONAL DE ENERGÍAS RENOVABLES



August 11, 2016



1:18,489,298

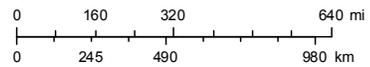


Image courtesy of NASA Earthstar Geographics SIO © 2016 Microsoft Corporation

CFE - SENER  
Copyright: © ArcGIS for Server and CFE

Fig. 2.2: Localización de los proyectos de generación geotermoelectrica de México. La imagen se tomó del Inventario Nacional de Energías Renovables - INERE (SENER y CFE, 2016).

ambos en Nayarit, y 30 MWe en otras zonas (L. Gutiérrez-Negrín et al., 2015).

Los recursos geotérmicos explotados actualmente en México para la producción de electricidad son de tipo hidrotermal. En 2011, Jaimes-Maldonado et al. (2012a) reportan que 283 pozos de producción y 26 pozos de inyección, estuvieron en operación en México con una producción de vapor promedio de 28.9 t/h. Durante 2013, estuvieron operando en promedio 223 pozos de producción y 26 pozos de inyección acoplados a 28 plantas geotermoeléctricas, lo que contribuye con el 1.5 % de la capacidad instalada eléctrica en México, pero desde el punto de vista de generación con una contribución mayor del 2.4 % del total de electricidad producida para servicios públicos en el país (L. Gutiérrez-Negrín et al., 2015). México cuenta con cuatro campos geotérmicos principales, todos manejados por la CFE, estos son: Cerro Prieto, B. C.; Los Azufres, Michoacán; Los Humero, Puebla; y Las Tres Vírgenes, B. C. S. En la tabla 2.3 se resumen las características de estos cuatro campos geotérmicos. Entre ellas la capacidad instalada y de operación (efectiva), el factor de capacidad, cantidad y tipo de plantas, cantidad de pozos de producción e inyección, temperaturas del fluido, flujos promedio en boca de pozo entre otras.

Fig. 2.3: Características de los principales campos geotérmicos mexicanos. 1-F, Unidad de flasheo simple; 2-F, Unidad de doble flasheo; B, Unidad binaria. Información recopilada de DiPippo (2012a); L. Gutiérrez-Negrín (2015); L. Gutiérrez-Negrín et al. (2015); Jaimes-Maldonado et al. (2012b).

Localización de la Planta	Cerro Prieto		Los Azufres		Los Humeros	Tres Vírgenes	Cerritos Colorados (La Primavera)
	1-F	2-F	B	1-F			
Tipo de planta	9	4	2	12	10	1-F	
Unidades por tipo						2	
Capacidad por unidad (MWxUnidades)	37.5x4 - 30x1 - 25x4	110x4	1.5x2	50x1 - 25x4 - 5x7	5x8 - 26.7x2	5x2	
Total de unidades instaladas	13			14	10	2	
Capacidad Total Instalada (MW)	720			194	93.4	10	Se estiman 75
Capacidad de operación/efectiva (MW)	570			193	68.4	10	0
Factor de Capacidad anual % (capacidad instalada)	72.10%			95.70%	101.3%	62.3%	
Factor de Capacidad anual % (capacidad efectiva)	80.50%			92.20%	94.7%	62.3%	
Producción anual (GWh/a)	3943.26			1565.68	462.1	50.02	
Tiempo promedio de vida de los pozos (años)	13			42	57	12	
Temperaturas Reservorio (°C)	250-310			240-320	210-340	250-275	280-356
Pozos productores en operación	158			37	23	4	13
Pozos inyectores en operación	17			6	2	1	
Profundidad máxima (km)	4.4						2.78
Profundidad promedio de pozo (km)	2.437			2.0	2.2	2.05	1.8
Total de pozos perforados en el campo geotermico	429			94	47	11	13
Producción promedio anual (t/h)	Vapor	3948		1688	581	71	
	Salmuera	7325		568	65	230	
Producción promedio anual por pozo (t/h)	Vapor	25		43.8	25.3	24	
	Salmuera	42.6		14.6	2.8	69	
Consumo promedio anual de vapor por unidad (tons/MWh)	8.47			9.72	15.8	14.4	

### **2.2.1. Cerro Prieto, Baja California**

El campo geotérmico de Cerro Prieto está ubicado al noroeste del estado de Baja California, aproximadamente 32 km al sur de la frontera con E. U., cuyo yacimiento de líquido líquido dominante es considerado como el más grande del mundo. La producción de electricidad en este campo se inició en mayo de 1973 con la instalación de 2 unidades de flasheo simple con capacidad de 37.5 MW cada una (DiPippo, 2012b; SEMARNAT y CFE, 2007). En los pozos se produce una mezcla de fluido con una composición promedio de 60 % de agua y 40 % de vapor en la superficie. En los últimos años su capacidad instalada no ha cambiado (720 MW), consta de 13 unidades en total de las cuales 9 son de tipo flasheo simple (4 de 37.5 MW, una de 30 MW y 4 de 25 MW) y 4 de flasheo doble con capacidad de 110 MW cada una (DiPippo, 2012a). Lo que ha cambiado es la capacidad efectiva del campo, en 2011 era de 645 MW, esto debido a que 2 de las 4 unidades de 37.5 MW no operaron continuamente salvo cuando alguna otra unidad estaba bajo mantenimiento, dando un factor de capacidad anual del 72.1 % sobre la capacidad instalada o del 80.5 % sobre la capacidad efectiva (Jaimes-Maldonado et al., 2012a). En 2015 tuvo una capacidad de operación de 570 MW ya que las 4 unidades más antiguas de 37.5 MW estuvieron fuera de operación por sus altos consumos de vapor (L. Gutiérrez-Negrín, 2015).

Desde 1973 que empezó a operar este campo geotérmico, se han perforado 429 pozos con una profundidad promedio de 2.43 km y una máxima de 4.4 km. En 2013 estuvieron operando en promedio 158 pozos de producción con una producción de vapor promedio anual por pozo de 25 t/h. Existen 17 pozos de reinyección aunque la mayoría de la salmuera se envía hacia una laguna de evaporación solar. La temperatura del fluido en el reservorio está entre los 250 y 310°C. El consumo de vapor por MWh producido fue de 8.47 tons (L. Gutiérrez-Negrín et al., 2015). Jaimes-Maldonado et al. (2012b) calcularon 13 años como el tiempo promedio de vida de los pozos de producción en este campo. DiPippo (2012b) proporciona una descripción detallada de las características técnicas de las unidades instaladas en Cerro Prieto.

### **2.2.2. Los Azufres, Michoacán**

El campo geotérmico de Los Azufres está localizado sobre el Cinturón Volcánico Mexicano (CVM) en la parte central de México, específicamente en el estado de Michoacán, a 250 km de la ciudad de México. Es un campo vapor dominante con una mezcla promedio de 75 % vapor y 25 % líquido. Jaimes-Maldonado et al. (2012b) reportan una capacidad instalada de 194.5 MW dada por 14 unidades; las únicas 2 de ciclo binario en el país de 1.5 MW cada una y 12 de flasheo simple (una de 50 MW, 4 de 25 MW y 7 de 5 MW). La capacidad de operación se incremento de 188 MW en 2011 a 191 MW en 2013, aún cuando las 2 plantas de ciclo binario estuvieron fuera de operación. Los Azufres tiene un factor de capacidad anual del 95.7 % sobre la capacidad instalada y del 92.5 % sobre la capacidad efectiva (Jaimes-Maldonado et al., 2012a).

Actualmente se encuentran en operación 37 pozos de producción y 6 de inyección. Las mediciones de temperatura del fluido van normalmente de los 240 a los 280°C alcanzando temperaturas de hasta 320°C (L. Gutiérrez-Negrín, 2015). La producción de vapor promedio por pozo es de 43.8 t/h y el consumo promedio anual de vapor por unidad es de 9.72 tons por MWh (L. Gutiérrez-Negrín et al., 2015). Jaimes-Maldonado et al. (2012b) estiman la profundidad promedio de los pozos perforados en este campo en 1.583 km y reportan para éste campo geotérmico el segundo ciclos de vida más largos de los pozos de producción mexicanos, 42 años.

### **2.2.3. Los Humeros, Puebla**

El campo geotérmico Los Humeros, ubicado dentro de la localidad del mismo nombre, se encuentra sobre el CVM al oeste del estado de Puebla. A finales de la década de los 60's, la CFE inicia los estudios geológicos para evaluar el potencial existente en el subsuelo de esta región. En los años 70's se comienzan los estudios geofísicos, geológicos y geoquímicos con la finalidad de identificar los sitios con posibilidades de aprovechamiento geotérmico. La zona comprende una superficie aproximada de 4,534 ha, sin embargo, en 1981 se limitó al 1 % (45 ha) el área de exploración. Los primeros 5 pozos exploratorios se perforaron entre 1981 y 1983 (SEMARNAT y CFE, 2014). El fluido presente es principalmente de tipo vapor dominante, el porcentaje de vapor bajó del 90 % en 2011 (Jaimes-Maldonado et al., 2012a) al 84.8 % en la actualidad (L. Gutiérrez-Negrín, 2015). La

capacidad instalada presente en Los Humeros se incremento en los últimos años, en 2011 eran 40 MW proporcionados por 8 unidades de flasheo simple de 5 MW cada una (DiPippo, 2012a). En 2012 se instalaron 2 unidades de flasheo simple adicionando 25 MW cada una quedando una capacidad instalada de 90 MW, aunque tres de las unidades de 5 MW quedaron fuera de operación como reserva en periodos de mantenimiento de las otras unidades, resultando en una capacidad efectiva de 75 MW; actualmente la capacidad instalada es de 93.4 MW y su capacidad de operación esta en 68.4 MW con un factor de capacidad anual del 94.7 % (L. Gutiérrez-Negrín, 2015).

Este campo cuenta con 22 pozos de producción con una producción promedio de 27.4 t/h de vapor. La salmuera es reinyectada en su totalidad al reservorio mediante 3 pozos de inyección. La temperatura del reservorio está entre 210-340°C. El consumo anual es de 15.8 toneladas por MWh (L. Gutiérrez-Negrín et al., 2015). La profundidad promedio de los pozos perforados en este campo es de 2.179 km, y estos pozos cuentan con un ciclo promedio de vida más largo de todos los campos geotérmicos de México, 57 años (Jaimes-Maldonado et al., 2012b).

#### **2.2.4. Las Tres Vírgenes, Baja California**

Este campo geotérmico está localizado en la parte central de la península de Baja California. Es el reservorio líquido dominante con mayor cantidad de agua, 24 % vapor y 76 % líquido (Jaimes-Maldonado et al., 2012b). Su capacidad instalada es de 10 MW, logrados a través de la operación de 2 plantas de flasheo simple de 5 MW (DiPippo, 2012a). Su factor de capacidad promedio anual es el más bajo de los campos geotérmicos mexicanos pero ha mejorado del 53 % en 2011 (Jaimes-Maldonado et al., 2012a) a 62.3 % en 2015 con un consumo de vapor de 14.4 tons por MWh (L. Gutiérrez-Negrín et al., 2015). Cuenta con 3 pozos de producción y 2 de reinyección, la temperatura en reservorio va de los 250-275°C (L. Gutiérrez-Negrín, 2015). La profundidad promedio estimada por pozo es de 2.037 km con un tiempo de vida promedio para los pozos de producción de 12 años (Jaimes-Maldonado et al., 2012a).

### **2.2.5. Cerritos Colorados, Jalisco**

El campo geotérmico Cerritos Colorados está localizado en el CVM, en la parte Oeste de Jalisco, a las orillas de la ciudad de Guadalajara. Con el objetivo de obtener una evaluación preliminar del potencial geotérmico, la CFE inició a mediados de la década de los 70's una serie de estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos. La construcción de este campo geotérmico estaba preparada en la década de los 80, en enero de 1980 se iniciaron las primeras obras civiles en el bosque, iniciando la perforación del primer pozo exploratorio el 7 abril de 1980 hasta los 1226 m de profundidad, ampliándolo más tarde a 1822 m (SEMARNAT y CFE, 2008).

Para 1988 se habían perforado 13 pozos, pero al presentar algunas afectaciones ambientales en la zona circunvecina fue suspendido el proyecto por el gobierno local. El pozo más profundo cuenta con una longitud de 2.780 km. El fluido examinado presentó una mezcla de dos tercios de líquido y un tercio de vapor con una temperatura promedio de 305°C y una máxima de 356°C. No se han instalado plantas en este campo pero con el vapor producido por seis de los 13 pozos es suficiente para instalar 25 MW; la CFE estima un potencial mínimo de 75 MW en el campo (L. Gutiérrez-Negrín, 2015).

## **2.3. Tecnologías de Construcción de Pozos Geotérmicos**

De acuerdo a Sullivan y Wang (2013a) se puede conceptualizar la planeación de un proyecto geotermoeléctrico comercial de manera general en 4 etapas principales:

1. Exploración del campo geotérmico (confirmación del recurso)
2. Desarrollo (construcción de pozos, cuando la exploración tiene éxito e indica la presencia de un recurso técnico y económicamente factible de explotar).
3. Construcción de la planta geotérmica.
4. Operación de la planta para generar electricidad.

Ya que el recurso geotérmico se encuentra bajo tierra, es necesario realizar una fase de exploración en la que se llevan a cabo estudios geocientíficos de geología, geofísica y geoquímica. Si los

resultados de la exploración determinan que el área evaluada es una zona factible, la fase siguiente es perforar varios pozos de exploración tipo gradiente, DiPippo (2012a) reporta que son típicamente tres, en la LEG (Cámara de Diputados México, 2014c) se sugieren de 1 a 5 dependiendo de la extensión de la superficie en consideración. Durante la perforación del pozo de exploración se colecta tanta información como sea posible: muestras de núcleos para conocer con mayor precisión la columna litológica del sitio, la porosidad y permeabilidad, así como la determinación o medición de parámetros termodinámicos del fluido como temperatura, presión y composición química, entre otros.

Las tareas a realizar en la construcción de un pozo geotérmico son de suma importancia. Desde el punto de vista de la sustentabilidad ambiental, estudios previos indican que la construcción de los pozos (producción e inyección) presentan una alta contribución a los IA, principalmente debido a las operaciones de perforación por la inyección del lodo de perforación para extracción de recortes y lubricación de la barrena, así como debido a las operaciones de revestimiento y cementación (Martín-Gamboa et al., 2015; Sullivan y Wang, 2013a).

Por otra parte, la factibilidad económica de un proyecto geotérmico depende fuertemente de los gastos de perforación. Los costos de terminación de un pozo contribuyen entre un 30-60 % del capital de la inversión total en las plantas geotermoeléctricas de tipo de recurso hidrotermales pudiendo exceder el 75 % en los sistemas EGS (Lukawski et al., 2014). La perforación no sólo determina el costo sino también el riesgo asociado con los proyectos geotérmicos (Lukawski et al., 2014). En este capítulo se hará énfasis a la etapa de Desarrollo de un proyecto geotermoeléctrico, principalmente se describirán las actividades que se llevan a cabo durante la construcción de un pozo geotérmico para la producción.

### **2.3.1. Perforación de Pozos**

Una vez que se tiene certeza que una zona geotérmica es promisoría, se prepara el sitio para realizar las tareas de construcción de un pozo (esto es, de perforación, cementación y terminación). Generalmente los campos geotérmicos están en lugares remotos y de difícil acceso, de tal forma que durante la etapa de exploración este acceso puede ser vía caminata o en vehículos para tránsito

difícil. Sin embargo para la fase de perforación generalmente ya se requiere de la construcción de caminos para transportar el equipo y materiales necesarios para instalar la plataforma de perforación y llevar a cabo la misma. Una plataforma de perforación típica requiere de, al menos, un área de  $90 \times 45 \text{ m}^2$  (DiPippo, 2012d), aunque en México las dimensiones de las plataformas han sido usualmente de  $40 \times 80 \text{ m}^2$  (Ramírez-Montes et al., 2014).

Antes de instalar el equipo de perforación, se realizan pruebas hidrostáticas para determinar si la zona en dónde se instalará la plataforma de perforación es impermeable para evitar filtraciones por derrames de combustibles, lubricantes fluidos de perforación o materiales cementantes. Adicionalmente, se debe construir una presa para colocar y almacenar los desechos de los recortes de perforación que serán más tarde tratados. Finalmente, se termina con el ensamble e instalación del equipo de perforación en la plataforma.

### **2.3.2. Principales Operaciones de Perforación**

Una vez que el sitio es preparado, se perfora el pozo con máquinas rotatorias. La perforación consiste en hacer un pozo, dentro de la tierra, ya sea vertical o direccional para llegar al recurso almacenado en el reservorio (agua, vapor y/o calor). Según Miyora et al. (2015), el proceso de perforación utiliza generalmente 5 sistemas que se describen a continuación:

1. Sistema rotatorio.
2. Sistema de circulación del fluido de perforación.
3. Sistema de izaje o de levantamiento.
4. Sistema de potencia.
5. Sistema de control superficial o de prevención.

Adicionalmente a estos 5 sistemas del equipo de perforación, se requieren subestructuras de soporte, casetas de mandos, casetas de refacciones, de reparaciones eléctricas y mecánica, tanques de almacenamiento de agua y remolques-habitación con letrinas (SEMARNAT y CFE, 2014)

### 2.3.2.1. Sistema Rotatorio

El **sistema rotatorio** está conformado por 3 elementos: la mesa rotatoria, la flecha y la sarta de perforación. La sarta de perforación se compone a su vez de la tubería de perforación, la tubería de perforación pesada, la barrena, los collares de barrena, las trabarrenas y los estabilizadores (SEMARNAT y CFE, 2008). La tubería de perforación se cuelga de una grúa y se gira la barrena a través de la mesa rotatoria por medio de maquinaria que generalmente opera con diésel; la barrena fragmenta, pulveriza y penetra la formación-roca. Estos fragmentos de roca se deben remover para poder continuar el proceso de perforación, de esta tarea, entre otras, se encarga el sistema de circulación (DiPippo, 2012d).

### 2.3.2.2. Sistema de Circulación de Fluidos de Perforación

El fluido de perforación, también técnicamente conocido como lodo de perforación, es un elemento crítico usado en la perforación principalmente para:

- (a) La remoción y recuperación de fragmentos de rocas o recortes de los estratos de la formación penetrada.
- (b) El enfriamiento o lubricación de la barrena y la sarta de perforación para minimizar su desgaste y evitar que el costo global de la perforación se incremente, y.
- (c) El mantenimiento de la presión subsuperficial en el pozo.

La función del **sistema de circulación** es bombear el lodo de perforación desde los tanques de almacenamiento localizados en la superficie hasta el interior y fondo del pozo. El lodo se bombea a presión a través de las toberas de la barrena para regresar a la superficie por el espacio anular entre la sarta y el agujero, o en su caso por la tubería de revestimiento (TR) ya cementada: ver Fig. 2.4 (SEMARNAT y CFE, 2014). Los residuos (recortes de roca y lodo) de la perforación que se generan son bombeados y almacenados en fosas, en donde se someten a un proceso de separación para reutilizar el lodo de perforación y recuperar los fragmentos de la roca penetrada (Ghazi et al., 2011). Como parte de los desechos de perforación hay principalmente fluidos residuales (mezcla de bentonita con agua de muy baja viscosidad) que pueden alcanzar cientos de metros cúbicos

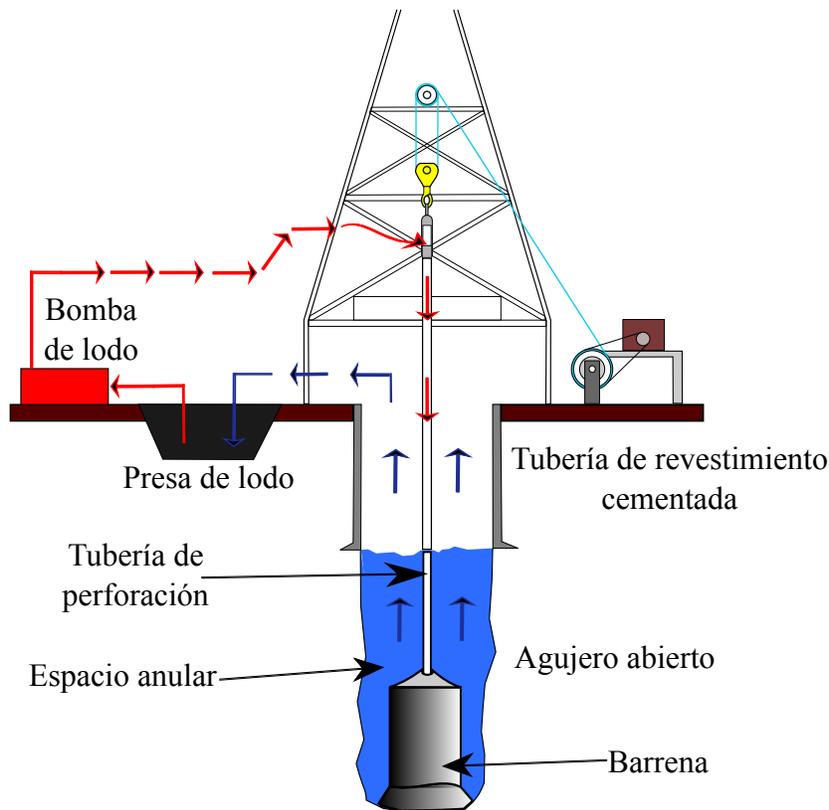


Fig. 2.4: Esquema representativo del Sistema de Circulación de Fluidos de Perforación. El diagrama no está a escala.

por pozo. Entre los posibles IA que pueden ocurrir durante las etapas de perforación, se tienen las pérdidas e infiltraciones de lodo de perforación en aguas subterráneas y en la superficie durante su almacenamiento y los procesos de tratamiento (Ghazi et al., 2011).

Las pérdidas de circulación de fluido de perforación es uno de los problemas técnicos más fuertes que se presentan durante la perforación de los pozos geotérmicos y petroleros, sobretodo cuando se penetran formaciones de tipo permeable, cavernoso o medios altamente fracturados. Se dice que hay una pérdida de circulación, si el lodo de perforación que es bombeado hacia dentro del pozo no retorna a la superficie en una fracción o en su totalidad. Esto se debe a que la barrena de perforación encuentra fisuras, fracturas o cavernas naturales y el lodo de perforación fluye dentro del espacio disponible en estas zonas. Este fenómeno es deseable cuando se ha llegado a la zona de producción ya que es señal de una excelente permeabilidad. Sin embargo, si este problema ocurre en las zonas someras de baja temperatura es un verdadero problema ya que impide continuar con

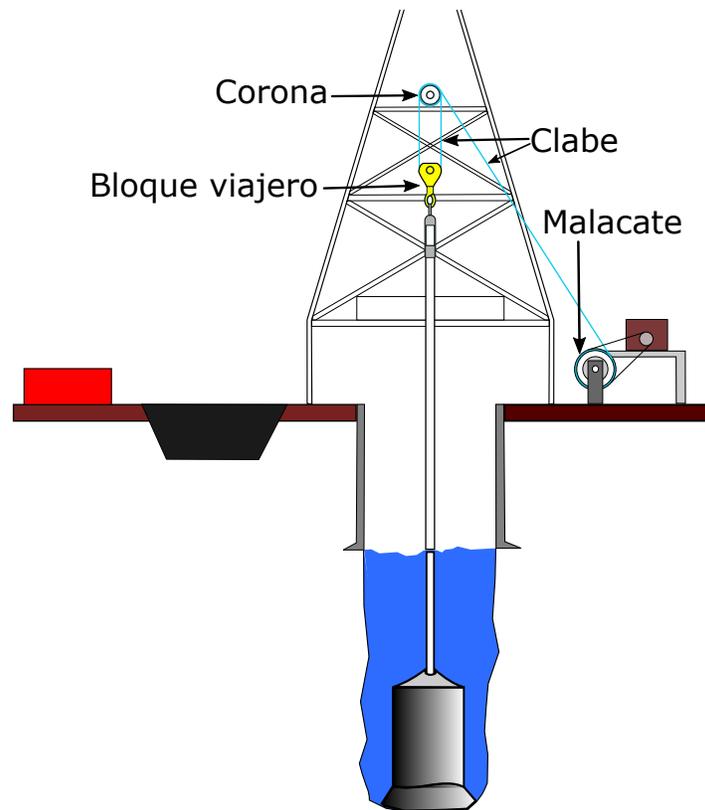


Fig. 2.5: Descripción esquemática del Sistema de Izaje o de Levantamiento de Carga. El diagrama no está a escala.

la perforación debido a su alto costo al tratar de taponear estas zonas con ayuda de materiales obturantes mezclados con el fluido de perforación (Finger y Blankenship, 2010).

### 2.3.2.3. Sistema de Izaje o de Levantamiento de Carga

La función que cubre el **sistema de izaje** es bajar y subir equipo dentro y fuera del pozo; es técnicamente una potente grúa. Los elementos que constituyen este sistema son el mástil, la torre de perforación, el malacate donde se enrolla y desenrolla el cable de perforación y mediante el que se sostiene a la sarta, la corona, la polea viajera y el cable de perforación: ver detalle en la Fig. 2.5, (Miyora, 2014).

#### **2.3.2.4. Sistema de Potencia**

El malacate, el sistema rotatorio, las bombas de circulación y la casa de máquinas requieren de energía para poder operar eficientemente. Generalmente, las operaciones de perforación se realizan en zonas donde no hay acceso a la red eléctrica por lo que la energía necesaria para hacer funcionar los sistemas ya mencionados se produce con máquinas de combustión interna que utilizan diésel o gas como fluido de trabajo (Miyora, 2014).

#### **2.3.2.5. Sistema de Control o de Prevención**

El objetivo del **sistema de control o de prevención** es prevenir flujos espontáneos del fluido geotérmico durante la perforación que pueden causar daños a los recursos naturales, posibles accidentes de trabajo al personal de campo y daños al equipo.

### **2.3.3. Operaciones de Revestimiento y Cementación**

Una vez que se obtiene la profundidad deseada para cada diámetro de pozo perforado, tiene lugar la instalación de una pesada tubería de acero conocida como tubería de revestimiento (TR) y su respectiva cementación con la finalidad de dar estabilidad a la estructura perforada. Las operaciones exitosas de revestimiento y cementación permiten que la perforación del pozo continúe con la siguiente sección de diámetro menor hasta alcanzar la profundidad máxima deseada o posible cuando se localizan las zonas permeables productoras de fluido geotérmico (Ghazi et al., 2011; Hole, 2008).

La selección de la profundidad de la TR, sus especificaciones en peso y conexiones es vital para que la perforación del pozo sea segura y exitosa. Según (Hole, 2008) la tubería de revestimiento tiene varios propósitos, entre los cuales destacan:

- La prevención de la obstrucción del pozo y la formación por la caída de materiales residuales.
- La provisión de un soporte adecuado para la perforación y el cabezal del pozo cuando concluya la construcción.

- La prevención de entradas o pérdidas de fluido hacia/desde el pozo o la formación, y la “comunicación” o fuga de estos fluidos hacia los acuíferos locales o circunvecinos.
- La prevención o mitigación del problema de pérdidas de circulación de fluido de perforación durante la perforación, y
- La prevención de problemas de erosión, corrosión o fracturamiento en el pozo o la formación circundante.

Debido a que las TR son manufacturadas con diferentes espesores y materiales, se identifican y estandarizan por el diámetro exterior de acuerdo a las especificaciones del Instituto Americano del Petróleo (API, por su nombre en inglés “American Petroleum Institute”). El diámetro de la TR se selecciona generalmente considerando las siguientes características de diseño (Hole, 2008):

- Que presenten un área de sección transversal suficiente para mantener el flujo deseado o esperado de fluido geotérmico.
- Que dispongan de un espacio libre suficiente para llevar a cabo la instalación concéntrica de las demás TR, incluyendo la cementación subsecuente.
- Que sean producidas de manera estandarizada para hacerlas accesibles y que además se ajusten a las dimensiones de las herramientas y maquinarias utilizadas por los contratistas o la industria de la construcción de pozos.

Generalmente, las TR’s de menor longitud o profundidad y de mayor diámetro son usadas para las operaciones de perforación, mientras que TR’s más profunda y de menor diámetro son requeridas para la terminación del pozo en las zonas de producción. Aunque usualmente son más, desde un punto de vista técnico y legal, se requieren un mínimo de 2 TR’s de acero completamente cementadas y posicionadas concéntricamente (Hole, 2008).

Como se ha explicado, cuando un agujero ha sido perforado a la profundidad deseada, se baja dentro de éste la TR para posteriormente llevar a cabo la tarea de cementación. DiPippo (2012d) describe el proceso, en dónde una lechada de cemento un poco mayor al volumen generado entre la pared del pozo y la cara externa de la TR es bombeada dentro de la TR con un tapón usando el lodo

de perforación para empujarla. Conforme el tapón va alcanzando la parte baja de la TR, la lechada de cemento va llenando el espacio anular entre la pared del pozo y la TR. Si un exceso de lechada de cemento llega a la superficie, es generalmente una buena señal de un trabajo de cementación exitoso en el pozo.

El objetivo de cementar las TR, aparte de anclarla, es proveer de un completo llenado de cemento (*lechada*) la sección anular para que resista las condiciones naturales del ambiente, protegiendo el revestimiento de posible corrosión debido a las salmueras además de prevenir flujos incontrolados de agua y vapor fuera de la sarta. La cementación es uno de los factores más importantes para tener un ciclo de vida largo en los pozos geotérmicos, sin embargo, un fenómeno frecuente es la dificultad por lograr el retorno de la lechada a la superficie en zonas con problemas de circulación.

#### **2.3.4. Técnicas de Perforación en el Estado del Arte**

En forma general, se puede decir que la tecnología del proceso de perforación ha madurado y ha sido completamente asimilada por la industria geotérmica. Sin embargo, los nuevos retos técnicos y la necesidad por reducir costos y tiempos de la perforación de pozos, han dado lugar a que se propongan nuevas tecnologías en el estado del arte. Algunos buscan mejorar los procesos ya fundamentados, como es el caso del proyecto ThermoDrill, en dónde un grupo multidisciplinario conformado por instituciones académicas e industriales de Europa que han unido esfuerzos con la finalidad de innovar el proceso de la perforación de pozos geotérmicos profundos (Teza, 2016). El proyecto consiste en utilizar sistemas de perforación rotatorios convencionales adicionando un fluido a una alta presión el cual permite una perforación más rápida, eficiente y económica, siendo éste nuevo proceso adecuado para perforar rocas de alta dureza y abrasividad, soportando temperaturas y presiones extremas encontradas al perforar zonas profundas de alrededor de los 3 km. Según lo reportado por este grupo, este proceso cumple además con estándares exigentes en salud, seguridad y protección ambiental.

Otros grupos de tecnólogos proponen innovaciones en las técnicas de perforación para pozos geotérmicos profundos, con la intención de reducir costos por kWh, los tiempos no productivos y las planificaciones de riesgos, además de obtener mejoras en la seguridad y en la productividad a

través del tiempo, por ejemplo, la compañía americana Baker Hughes (Oppelt et al., 2016). Esta compañía sugiere realizar la construcción del pozo a través de procesos automatizados que reduzcan los costos en la perforación y los riesgos de operación, y una mejora en los niveles de automatización. En este contexto, los niveles de automatización e interacción hombre-máquina pueden ir desde no recibir asistencia alguna por una computadora siendo las decisiones tomadas en su totalidad por el humano, pasando por 8 niveles de interacción entre computadora y humano dependiendo del grado de soporte necesario para el operador, y en el extremo opuesto que la computadora decida cada acción necesaria durante la perforación ignorando la intervención humana. En estas nuevas tecnologías se proponen también técnicas alternativas de perforación como arreglos avanzados de fondo de pozo; perforación por pulsos eléctricos, entre otros.

Otros nuevos procesos de perforación que se investigan actualmente buscan aprovechar los recursos geotérmicos supercríticos, como en Japón (Naganawa, 2016), en donde estos proyectos piloto se enfrentan a retos tecnológicos aún no resueltos, como es el llevar a cabo operaciones a temperaturas superiores a los 500°C y sus correspondientes altas presiones. Buscando una solución, implementan una perforación por choque (estrés) térmico y láser. En este mismo contexto tecnológico, la búsqueda de nuevos materiales de revestimiento y cementación que soporten condiciones supercríticas y manejen fluidos de composición química más agresiva para enfrentar los problemas de corrosión, erosión e incrustación están siendo también investigados.

## **2.4. Impactos Ambientales**

De acuerdo con los procedimientos establecidos por Fridriksson et al. (2016); IGA y IFC (2014) un proyecto de instalación de una planta geotermoeléctrica inicia con los estudios de exploración (geología, geofísica y geoquímica), seguidos de la preparación del sitio de perforación, la perforación, la producción, las tareas de mantenimiento y al final de su ciclo de vida, el desmantelamiento de la planta.

La planta está generalmente conformada por un conjunto de componentes que dependen principalmente de las características que presente el fluido geotérmico, este factor determina la tecnología que se va a usar para explotar el recurso; los pozos de producción e inyección, tuberías, turbinas,

enfriadores. Los IA generados por cada uno de estos componentes pueden ser temporales o permanentes dependiendo de la fase en que se encuentre el ciclo de vida y de la tecnología que se esté utilizando.

Algunos países han desarrollado leyes que regulan la construcción y operación de las plantas de generación eléctrica con la finalidad de preservar el medio ambiente, salvaguardar la salud de las personas, la flora y fauna de la región. En materia de energía geotérmica, estas regulaciones pretenden asegurar que ninguna planta geotérmica sea una amenaza al medio ambiente. En este contexto es importante indicar que algunos IA adversos asociados con la operación de las plantas geotérmicas que son inevitables, pueden minimizarse. Aunque no existen estándares internacionales uniformes en materia de IA de las plantas geotérmicas, es práctica común en la mayoría de los países buscar que estas plantas cumplan con reglamentaciones ambientales apropiadas para garantizar una sustentabilidad ambiental mínima (DiPippo, 2008).

De hecho, en el Informe Especial del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, 2012), proponen a la energía geotérmica como una de las opciones para reducir las emisiones de GEI debido a las bajas cantidades de CO<sub>2</sub> (<10 % wt) presentes en los fluidos geotérmicos, que en algunos casos, se estarían emitiendo a la atmósfera de manera natural antes de la instalación de una planta de generación, requiriéndose en estos proyectos establecer una línea base de emisión natural para evitar penalizar los proyectos comerciales (Tomasini-Montenegro et al., 2016). Hunt (2001) afirma que el uso de la EG tiene bajos impactos ambientales, especialmente si se compara con las emisiones producidas por el uso de energéticos basados en combustibles fósiles. Según Hunt (2001), la mayoría de los IA están asociados con la explotación de sistemas de altas temperaturas, particularmente con los campos líquido dominantes. Además, afirma también que la explotación de los sistemas de bajas temperaturas rara ocasión presentan afectaciones ambientales significativas debido al uso de tecnologías de muy bajo impacto ambiental y sus usos en cascada.

La geotermia ha estado presente en la humanidad desde tiempos inmemoriales en diferentes culturas y épocas, aprovechando lo mejor de sus virtudes aunque actualmente poco se ha estudiado acerca de los IA que puede presentar a pesar de que si están bien detectadas estas afectaciones de manera cualitativa. Ningún sistema geotérmico es igual a otro, cada uno tiene sus particularidades; la geología y geografía del lugar, el tipo de fluido presente, la tecnología que se use para explotarlo,

la biodiversidad presente, la idiosincrasia de la región (parte social), las legislaciones ambientales vigentes, etc. Son tantas las variables involucradas que para evaluar los impactos ambientales de una planta geotérmica es necesario estudiar cada caso con sus particularidades y no sólo en la etapa de producción, sino durante el ciclo de vida completo (Bayer et al., 2013).

Las plantas geotermoelectricas se integran principalmente con varios componentes o equipos de proceso, entre los cuales destacan pozos de producción e inyección, tuberías de conducción de fluido (salmuera o vapor), silenciadores, separadores centrífugos de vapor-líquido (tipo Webre), turbinas, generadores, torres de enfriamiento, entre otros. Desde el punto de vista del ciclo de vida de los pozos, se involucran diferentes etapas que comprenden a las actividades de explotación, la preparación del sitio de perforación, las operaciones de terminación del pozo (perforación-cementación), las actividades de producción, el mantenimiento o reacondicionamiento del pozo y finalmente la clausura o cierre del pozo. Cada una de estas etapas generan IA durante el ciclo de vida de una planta geotermoeléctrica, algunos de éstos temporales y otros permanentes. Bayer et al. (2013) clasifican los IA generados en la producción de electricidad a partir de recursos geotérmicos principalmente por: uso de suelo, riesgos geológicos, residuos de calor, emisiones a la atmósfera, suelo y agua, consumo de agua, ruido e impactos sociales. Por otra parte, Shortall et al. (2015b) proponen un marco teórico para realizar un análisis de sustentabilidad de la energía geotérmica en sus tres ejes (económico, social y ambiental), en la parte ambiental abarca las mismas consideraciones que hacen Bayer et al. (2013) pero agrupando los impactos asociados a la producción de energía geotérmica en los temas de riesgos naturales (sismicidad inducida, hundimientos, deslaves), ambiente (cambio climático y calidad del aire), suelo (uso de suelo y deforestación), agua potable (calidad, uso del agua y contaminación térmica), biodiversidad (ecosistemas y especies) y contaminación acústica. Por su parte, DiPippo (2008) presenta una lista similar a las dos anteriores reportando los IA asociados a la producción geotermoeléctrica con diversos tipos de plantas incluyendo sus ventajas ambientales. Los principales impactos que reporta DiPippo (2008) se deben a las emisiones de gases a la atmósfera, la contaminación y uso del agua, la descarga de sólidos a la superficie y a la atmósfera, la contaminación de ruido, el uso de superficie, la sismicidad y los deslaves inducidos, las afectaciones a las manifestaciones hidrotermales naturales, a la flora y fauna.

Por otra parte, Hunt (2001) agrupa los posibles IA ocasionados por la energía geotérmica en cuatro grupos, que aplican tanto para sistemas de baja temperatura como de alta temperatura. Estos últimos separados por yacimientos de tipo vapor dominante y líquido dominantes. En el primer grupo de impactos, Hunt (2001) incluye las operaciones de perforación y considera adicionalmente la afectación a bosques y la erosión del entorno geológico, el ruido y la contaminación de aguas subterráneas por fluidos de perforación. El segundo grupo, denominado “retirada de masa” (*mass withdrawal*), se derivan afectaciones como la degradación de las características térmicas de la zona, los problemas de subsidencia o hundimientos del suelo, el agotamiento de los mantos acuíferos y los cambios en la temperatura del subsuelo. El tercer grupo se relaciona con el manejo de desechos líquidos, incluyendo las afectaciones causadas tanto a organismos vivos como al medio ambiente por la reinyección o el manejo de desechos de fluidos en la superficie. Finalmente, el último grupo lo refieren al manejo de descargas de gases a los organismos vivos y a los microclimas, incluyendo las afectaciones al medio ambiente y a eventos como los deslaves y las erupciones hidrotermales.

En conclusión, se puede resumir que los estudios previos reportados en la literatura y anteriormente citados, identifican casi los mismos IA que podrían afectar el aprovechamiento de la EG, sin importar la forma en que se clasifiquen. En la siguiente parte de este capítulo se describirán brevemente cada uno de estos IA.

### **2.4.1. Uso del Suelo**

Al explotar los recursos geotérmicos es necesario hacer uso de la superficie terrestre o simplemente del suelo principalmente por actividades de construcción requeridas en un campo geotérmico, que incluyen las instalaciones de los pozos y las plantas de generación, la construcción de carreteras y caminos de acceso a estos sitios, las tuberías conductoras de fluido geotérmico, etc. Las afectaciones provocadas por la producción geotermoeléctrica inciden principalmente en cambios al entorno o medio ambiente, algunas de éstas de carácter temporal debido a las etapas de exploración, preparación del sitio de construcción del pozo y desmantelamiento, así como otros de carácter permanente debido a la construcción y operación de las plantas de generación. Tester et al. (2006) reportan que las plantas geotermoeléctricas que producen fluidos supersalinos (con

concentraciones del orden de  $Cl \sim 155,000$  ppm) requieren hasta un 75 % más de uso de suelo que las plantas de flasheo simple o binarias debido al uso de contenedores para almacenar o procesar la salmuera de desecho, cuando es descargada en lagunas de evaporación (como en el caso de Cerro Prieto, B.C.), aunque este requerimiento podría eliminarse si se reinyecta el fluido de desecho. Al respecto, se reportan estimaciones sobre el uso de suelo, las cuales dependen del sitio, la tecnología y la capacidad de la planta; con valores en el intervalo de 0.23 a 0.97 ha/MW, siendo el más alto para Cerro Prieto con 3 ha/MW (Bayer et al., 2013).

Bayer et al. (2013) estiman un uso de suelo total para una planta de 30-50 MW entre 21.45-148.52 ha. De los cuales 0.81-2.83 ha son requeridos para la fase de exploración y entre 20.64-141.64 ha para las actividades de perforación, operación y utilización de la planta. Por su parte, DiPippo (2008) reporta una superficie de 500 a 1000 ha para una planta de 20 a 50 MW.

#### **2.4.2. Riesgos Geológicos**

Las actividades propias de la explotación del recurso geotérmico, en sistemas de roca seca caliente o sistemas EGS, conllevan algunas consecuencias como microsismicidad inducida, problemas de subsidencia, deslaves, erupciones hidrotermales y pérdida de vegetación, resultando con afectaciones a las instalaciones de la planta y a las edificaciones circundantes, a la vegetación local y a los sistemas hidrológicos naturales de la zona.

Majer et al. (2012) reporta que la mayoría de los casos de microsismicidad inducida presentan una magnitud con niveles por debajo de los 2.0 en la escala de Richter y para monitoriarlos se requiere de instrumentos capaces de detectar eventos de magnitud entre 0-1.0 en la escala Richter.

#### **2.4.3. Contaminación Térmica**

Los desechos de calor de las plantas geotérmicas al aire y al agua pueden representar un impacto ambiental significativo cuando el sistema energético global es diseñado ineficientemente, lo que suele resolverse con un uso del fluido geoenergético en cascada (Bayer et al., 2013). La contaminación térmica depende de la tecnología de conversión que se use en la planta (DiPippo, 2012c). Algunas plantas geotermoeléctricas liberan cantidades apreciables de desperdicio de calor debido a

la baja eficiencia comparada con otro tipo de plantas (Tester et al., 2006). Este calor es liberado en el sitio de la planta, a la atmósfera, en estanques o cuerpos naturales de agua. Cuando el desperdicio de calor se aprovecha integralmente en usos directos se incrementan los beneficios económicos de la geotermia, además de resultar en un beneficio ambiental directo a los alrededores de la planta.

#### **2.4.4. Emisiones de Gases a la Atmósfera**

Principalmente provenientes del uso de maquinaria asociada al transporte, a la aplicación de diésel durante la construcción de pozos, caminos de acceso y de la planta así como en el desmantelamiento de la misma. Las emisiones de gases se caracterizan principalmente por contener bajas concentraciones de gases (<10 % en peso), dentro de las cuales destacan dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) y amoníaco (NH<sub>3</sub>), los cuales están generalmente presentes en plantas de flasheo y vapor seco. Las emisiones de gases pueden variar de una región a otra e incluso cambiar su patrón geoquímico de distribución dentro de un campo geotérmico y la superficie usada por la misma planta durante su tiempo de vida. Shortall et al. (2015b) reporta que en los E.U.A. las plantas geotérmicas emiten muy bajas emisiones de óxidos nitrosos (NO<sub>x</sub>).

Las emisiones de CO<sub>2</sub> ocurren naturalmente en regiones geotérmicas, se vuelve de interés saber los cambios provocados debido a la explotación de la energía geotérmica. En la literatura se han encontrado algunos estudios en donde se reportan variados rangos de emisión, los cuales van de los 0-1,300 g/kWh (por ejemplo Bayer et al. (2013); DiPippo (2012c); Tester et al. (2006)). Entre estas estimaciones, destaca el valor reportado por la Asociación Internacional de Geotermia (IGA), la cual reporta emisiones en el rango de 4 a 740 g/kWh con un valor promedio de 122 g/kWh. Este valor promedio es inferior a las emisiones de gases producidas por plantas que usan CF (gas natural, carbón y petróleo), las cuales están entre los 450 g/kWh y 1,300 g/kWh (Shortall et al., 2015b).

El CO<sub>2</sub> es el gas no condensable más dominante, alcanzando en promedio hasta el 10 % en peso en la fase de vapor y un 90 % de la fase gaseosa del fluido geotérmico. Por otra parte, el H<sub>2</sub>S es un gas que está presente en concentraciones mucho menores en la fase de vapor. No obstante estas bajas concentraciones, el H<sub>2</sub>S es de preocupación para el ambiente de la localidad debido a su olor

y toxicidad (Bayer et al., 2013). También puede ser responsable de la corrosión de ciertos metales en los equipo electrónico (Shortall et al., 2015b).

En adición a estos 2 componentes gaseosos, existen trazas de amoniaco ( $\text{NH}_3$ ), hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), nitrógeno ( $\text{N}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) y las especies volátiles de boro (B), arsénico (As) y mercurio (Hg), que dependiendo del sitio geológico, podrían estar presentes en las emisiones en concentraciones muy bajas (Shortall et al., 2015b). Las emisiones de  $\text{CH}_4$  ocurren a muy bajas concentraciones en el vapor geotérmico pero es de interés debido a su alto potencial de calentamiento global. Por ejemplo, en el caso de los campos geotérmicos de Nueva Zelanda se reporta un promedio anual de 0.85 g/kW, mientras que para E.U.A. es del orden de los 0.75 g/kW (Bayer et al., 2013).

#### **2.4.5. Residuos Sólidos: Emisiones al Suelo y Agua**

Los fluidos geotérmicos tienen composiciones muy variadas que dependen de las características del sitio geológico en donde se localice el campo geotérmico. La salmuera puede ser muy salina ( $\text{Cl} \sim 155,000$  ppm) o poco salina ( $\text{Cl} \sim 100$  ppm): (Bayer et al., 2013).

Estos fluidos pueden contener composiciones de boro (B) y mercurio (Hg); además de acumulación de metales tales como arsénico (As), plomo (Pb), cadmio (Cd), hierro (Fe), zinc (Zn), antimonio (Sb), litio (Li), bario (Ba) y aluminio (Al). Si no se tiene el control adecuado de los fluidos geotérmicos, estos pueden causar afectaciones ambientales significativas por su naturaleza química compleja. En el pasado, la salmuera se vertía en aguas superficiales lo que provocaba problemas ambientales, tales como contaminación de agua de riego causando un riesgo para la vegetación natural y los plantíos. Hoy en día, ésta práctica está prohibida por las regulaciones ambientales que existen en la mayoría de proyectos comerciales de explotación en el mundo. Los fluidos geotérmicos de desecho o salmueras son generalmente reinyectados al subsuelo en la mayoría de sistemas geotérmicos para evitar daños al medio ambiente. Sin embargo, se requiere un monitoreo continuo del sistema de reinyección para evitar contaminar acuíferos de agua potable someros, por problemas de infiltraciones o si existen fallas en el revestimiento de los pozos.

Los residuos sólidos generalmente se consideran pequeños y de poco interés ambiental. Bayer

et al. (2013) los agrupan en:

- Residuos sólidos de la perforación de pozos: recortes, residuos de cemento, bentonita.
- Problemas de deposición química en las tuberías o contenedores (también citado técnicamente como problemas de incrustaciones).
- Residuos sólidos de sedimentos en las torres de enfriamiento.
- Residuos sólidos asociados con la operación comercial de la planta de generación.

Los fluidos geotérmicos a altas temperaturas contienen minerales disueltos los cuales tienden a incrustarse en las tuberías. La extracción de minerales durante la explotación de la energía geotérmica puede ser una actividad técnicamente factible y económicamente remunerada (Clark et al., 2010). Aunque esto depende mucho de la concentración mineral en los fluidos geotérmicos. Los minerales con mayor potencial económico son el ácido bórico, KCl, la silica, el LiCl y el Zn, entre otros.

#### **2.4.6. Uso y Consumo de Agua**

La instalación y operación de una planta geotérmica puede requerir de grandes cantidades de agua dependiendo del tamaño de la planta (principalmente en sistemas EGS), el tipo de tecnología que se utilice para explotar el recurso geotérmico, las temperaturas a las que se encuentre el fluido geotérmico y los mecanismos de enfriamiento así como de la disponibilidad de otras fuentes que pudieran sustituir el uso de agua dulce, como por ejemplo, agua salada, aguas residuales y agua geotérmica. En algunas raras excepciones es posible utilizar el agua geotérmica o el agua condensada como agua potable o para la agricultura Bayer et al. (2013).

El agua potable es también requerida en la perforación, como componente base del lodo de perforación, el cual se requiere para transportar a la superficie los recortes de la perforación y enfriar y lubricar la barrena para minimizar su desgaste, así como en actividades de control de polvo, preparación de cemento y para el consumo personal de los trabajadores. Bayer et al. (2013) reportan que durante la perforación se puede llegar a utilizar hasta 1,000 m<sup>3</sup>/d, Clark et al. (2010) reportan estimaciones de volumen que van entre los 5 a los 30 m<sup>3</sup> por metro de pozo construido.

### **2.4.7. Impactos a la Biodiversidad**

En el pasado y a nivel mundial, algunas plantas geotérmicas han sido construidas en áreas protegidas bajo esquemas de una seguridad ambiental estricta y de reforestación para evitar un daño a estos hábitats especiales (Shortall et al., 2015b). De hecho, las especies animales y vegetales que viven en estos sistemas geotérmicos naturales son generalmente ecosistemas únicos, frágiles y sensibles que requieren medidas de protección especial, que están siendo ya consideradas en muchos países con recursos geotérmicos (DiPippo, 2012c).

### **2.4.8. Contaminación Acústica**

Durante todo el ciclo de vida de una planta geotérmica pueden existir fuentes de ruido; entre las cuales está la perforación, la operación y el desmantelamiento de la planta. Aunque los ruidos generados durante la operación y el desmantelamiento están dentro de los estándares normales de emisión asociados con la operación de centrales de energía. De hecho, una planta geotérmica podría generar niveles de ruido en el rango de 71-83 dB (Bayer et al., 2013; Shortall et al., 2015b). La exposición por más de ocho horas al día a ruidos por arriba de los 85 dB es potencialmente dañina (Conversación 40 dB, aspiradora 70 dB, tren 80 dB, tráfico 90 dB).

Durante la exploración y perforación, las fuentes de ruido provienen del movimiento de equipo, del tráfico vehicular, de la operación del equipo de perforación. En la fase de operación, el ruido se genera por las turbinas, los transformadores, las torres de enfriamiento, los separadores, etc.

## **2.5. Legislación dentro del Marco de las Energías Renovables**

En el Plan Nacional de Desarrollo del gobierno de la república se crea el Programa Especial para el Aprovechamiento de las Energías Renovables (PEAER) (Cámara de Diputados México, 2014b) con la finalidad de llevar a México hacia el cumplimiento de las metas establecidas en la legislación sobre el aprovechamiento de energías no fósiles y limpias, en particular los mandatos que derivan de la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE) (Cámara de Diputados México, 2013).

Con el fuerte impulso que se les está dando a las energías renovables en México por su enorme potencial, se tienen grandes expectativas sobre el aprovechamiento de los recursos geotérmicos, acciones que están siendo catalizadas por la Reforma Energética (RE) y la creación de los Centros Mexicanos de Innovación en Energías Renovables (Energía Geotérmica: CEMIE-Geo): (L. Gutiérrez-Negrín et al., 2015). De esta RE se derivan, entre otras, 2 leyes referentes al sector eléctrico; la Ley de la Industria Eléctrica (LIE) y la nueva Ley de Energía Geotérmica (Cámara de Diputados México, 2014a), esta última aprobada en agosto del 2014. A finales de octubre del 2014 se presentó en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el Reglamento de la Ley de Energía Geotérmica (RLEG) (Cámara de Diputados México, 2014c) en donde se establecen los requisitos y procedimientos para realizar las actividades de reconocimiento, exploración y explotación previstas en la LEG.

El principal cambio en la LIE es la descentralización de la generación, transmisión, distribución y comercialización de la energía eléctrica por parte de la CFE con la creación de un mercado libre que permite a la inversión privada la construcción y operación de plantas eléctricas sin tener que vender forzosamente la energía a la CFE teniendo ahora la libertad de comercializarla directamente en un mercado público para uso propio, co-generación, como pequeño productor, exportar e importar la electricidad. El exceso de electricidad generada puede ser vendida a la CFE o en caso contrario, cuando sea necesario, comprar energía a la CFE.

La LEG toma a consideración la regulación del reconocimiento, exploración y explotación de los recursos geotérmicos con el fin de generar energía eléctrica con distintos fines. Para poder llevar a cabo el reconocimiento, se debe obtener un *Registro* el cual es proporcionado por la SENER y es válido por ocho meses. Dos meses antes de que termine el periodo de exploración, se entregarán los reportes técnicos y financieros para poder obtener un *Permiso* de exploración para la misma área. Este permiso tiene una validez de tres años con posibilidad de extenderse a tres más. Los pozos de exploración perforados serán de uno a cinco, quedando determinado por la SENER el máximo de pozos. Si los resultados de la exploración son satisfactorios, se puede aplicar a una *Concesión* para explotación que de ser concedida será válida por treinta años con la posibilidad de ser extendida por la SENER. Un punto muy importante es que una vez obtenida la *Concesión* de explotación, se tienen un máximo de tres años para tener todas las autorizaciones correspondientes, entre ellas, la

licencia de medio ambiente para el uso de aguas geotérmicas.

Con el objetivo de promover y acelerar el uso y desarrollo de la EG en México, en febrero del 2014 se funda el CEMIE-Geo como una alianza entre academia e industria con el apoyo de la SENER y el CONACyT. El consorcio está conformado por 12 institutos de investigación y universidades públicas, nueve compañías privadas y la CFE, agrupando en el CeMIE-Geo la mayor parte de experiencia geotérmica del país. La directiva está conformada por seis representantes de la academia, tres del sector privado y uno de la CFE. El CEMIE-Geo no cuenta con oficinas, laboratorios o estructura administrativa, la idea es utilizar la infraestructura física y humana de sus 22 partes conformantes para fortalecer y promover la investigación científica, el desarrollo tecnológico y la innovación en el campo de la EG así como promover la formación de recursos humanos fortaleciendo la industria geotérmica del país (CeMIEGeo, 2016).

# Capítulo 3

## Conceptos Básicos de Sustentabilidad Ambiental

Los sistemas económicos, ambientales y sociales no son independientes, diversas señales de estrés pueden derivarse de ignorar esta importante característica. Por ejemplo, el crecimiento de la población y el modelo económico actual trae consigo un excesivo consumo y aumento de la pobreza ocasionando una enorme presión al medio ambiente. La superficie terrestre ha estado experimentando continuamente una degradación significativa por actividades antropogénicas que han conducido a la extinción de especies, a valores de concentración de gases de efecto invernadero (GEI) nunca antes alcanzadas, a un aumento en la temperatura promedio global de la Tierra, así como a una declinación en las reservas del agua potable disponible para consumo humano.

El desarrollo sustentable busca integrar las actividades económicas con la protección del medio ambiente y el entorno social. Para ello es necesario encontrar formas de satisfacer nuestras necesidades reduciendo los consumos de materia y minimizando daños al medio ambiente, sin afectar la calidad de vida. Para ello, se requiere de acciones bien planeadas para mitigar la pobreza y lograr una mejor y mayor equidad de oportunidades en y a través de los países del mundo. Esto evidentemente plantea retos a la ciencia e ingeniería, que una vez alcanzados contribuirán a obtener una mejor calidad de vida para la gente de hoy y las generaciones futuras (Azapagic y Perdan, 2011).

Para saber que tan cerca o lejos se ha llevado un progreso en un marco de desarrollo sustentable

se hace uso de *indicadores*, los cuales sirven para medir su avance y como guía para la toma de decisiones. Estos indicadores han sido ampliamente usados para evaluar el progreso en diferentes sectores como la economía, los ecosistemas, los recursos naturales, la calidad de vida y la salud, en los cuales se ha demostrado como una herramienta útil para condensar y analizar grandes cantidades de información. La manera de hacerlo es definiendo objetivos de interés; por ejemplo, pobreza, educación, salud, gobierno, atmósfera, desastres naturales, etc; y después evaluar su progreso a través de un análisis para saber si se alcanzaron las metas propuestas en esos tópicos.

Para evaluar las interacciones entre las actividades del ser humano y el medio ambiente se han hecho esfuerzos por desarrollar e implementar metodologías que ayuden a tener productos, tecnologías y actividades humanas más sustentables; el *Análisis de Ciclo de Vida* que se deriva del concepto de *pensamiento de ciclo de vida* es un ejemplo de dichas herramientas. Sin embargo, aun cuando estas herramientas proveen información útil, se debe tener en cuenta que únicamente consideran uno de los ejes de la sustentabilidad, el ambiental, y que criterios económicos y sociales se deberían de considerar en paralelo.

### **3.1. Fundamentos del Análisis de Ciclo de Vida (LCA)**

Las actividades cotidianas del ser humano provocan escasez de recursos naturales, contaminación al agua, suelo y aire generando problemas ambientales. Para cuantificar las afectaciones ambientales causadas por una actividad, proceso o servicio es necesario aplicar un enfoque global en lugar de uno local, ya que este último impide analizar efectos acumulativos en todo el ciclo de vida, mientras que los primeros si permiten un análisis temporal y espacial. Con un enfoque local se pueden encontrar soluciones a corto plazo pero se transfieren las cargas a otro ambiente o parte del ciclo de vida; para evitar esto, surge el concepto del pensamiento ciclo de vida. Este enfoque considera un producto a lo largo de todo su ciclo de vida integrando el proceso/producto para el análisis. De esta forma de pensamiento nace la herramienta del Análisis de Ciclo de Vida (conocido ampliamente por el acrónimo LCA por su definición en inglés “Life Cycle Assessment”).

El propósito de esta sección es introducir los principios básicos de la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (LCA). Esta metodología es una herramienta que sirve para evaluar las cargas am-

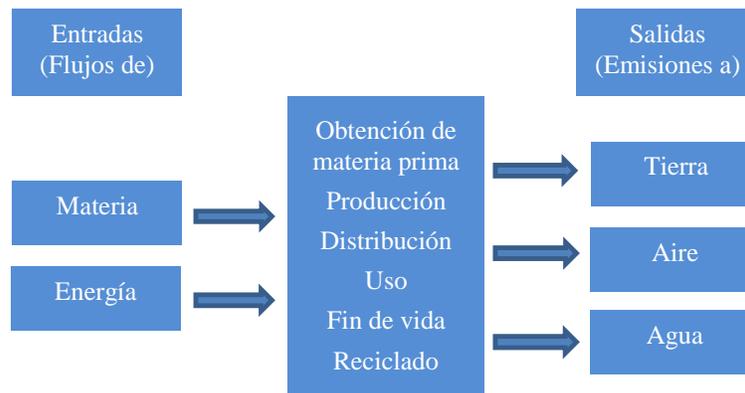


Fig. 3.1: Modelo del Análisis de Ciclo de Vida.

bientales asociadas a un producto, proceso o actividad; identificando y cuantificando los balances de energía y materia usados (flujos de entrada), así como los desechos liberados al entorno (flujos de salida) durante cada una de las etapas que componen su ciclo de vida (Fig. 3.1).

Las herramientas LCA se usan específicamente con la finalidad de evaluar el impacto del uso de la energía y materia para mejorar su rendimiento ambiental. Las herramientas LCA tienen variadas aplicaciones, entre las cuales destacan la planeación de estrategias ambientales, el desarrollo de productos, el “marketing”, la comparación entre diferentes productos o procesos, el análisis de procesos, la selección de materiales, entre otras. La Organización Internacional para la Estandarización (ISO, por su definición en inglés “International Organization for Standardization”) propuso los protocolos ISO 14040:2006 (2006) e ISO 14044:2006 (2006) como directrices clave para realizar estudios LCA. En las normas ISO-14040 e ISO-14044, las herramientas LCA contemplan la compilación y evaluación de las entradas y salidas principales de una tecnología, sistema o producto durante su ciclo de vida para evaluar los posibles impactos ambientales que puede ocasionar. Las entradas se entienden como aquellos recursos necesarios, mientras que las salidas son definidas como las emisiones al aire, agua o suelo. De acuerdo a la norma ISO-14040, existen cuatro fases principales asociadas en un estudio típico de LCA (ver Fig. 3.2), a saber:

- i) Definición de metas y alcance del estudio.
- ii) Análisis del inventario de ciclo de vida.

iii) Evaluación de los impactos.

iv) Interpretación de los resultados.

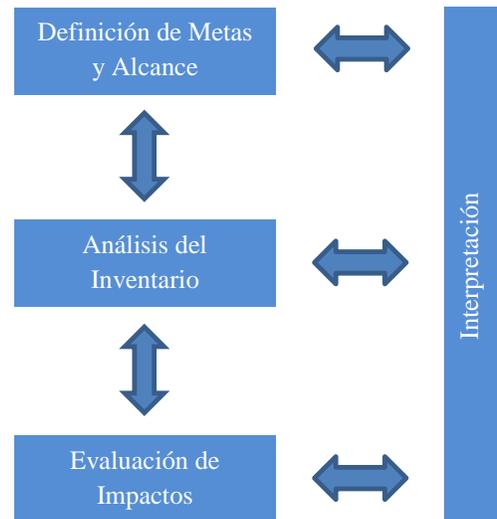


Fig. 3.2: Metodología de Análisis de Ciclo de Vida de acuerdo a la norma ISO-14044.

Finnveden et al. (2009) hacen notar que en un estudio LCA no se tiene conocimiento acerca de las emisiones simultáneas de otros procesos externos del sistema que comparten el mismo ecosistema, ni de los antecedentes en las concentraciones de otras sustancias. Por lo tanto, los estudios LCA no reemplazan una Evaluación de Riesgo Ambiental (ERA).

Una metodología apropiada de LCA se define con base en el objetivo del estudio (Finnveden et al., 2009). Un LCA de tipo atribucional se concentra en la descripción de los flujos relevantes hacia y desde el ciclo de vida; mientras que un LCA de tipo consecuencial describirá como cambian los flujos en respuesta a posibles decisiones. Un enfoque atribucional usa datos promedio, es decir, aquellos que representan la carga promedio para producir una unidad del bien o servicio en el sistema. Por otro lado, una aproximación marginal representa los efectos de pequeños cambios en las salidas de los bienes y/o servicios desde un sistema al ambiente por lo que se usan para evaluar las consecuencias (Pennington et al., 2004).

### 3.1.1. Definición de Metas y Alcance

En esta primer etapa de los estudios LCA, llamada *Definición de Metas y Alcance*, todas las decisiones generales son definidas. El estudio LCA es un proceso iterativo que permite redefinir las metas y alcances en el transcurso del mismo con base en la interpretación de resultados. Durante la definición de las metas se llevan a cabo generalmente las siguientes acciones: (i) Se exponen las razones para llevar a cabo el estudio; estas pueden ser de tipo mercadotécnicas, de desarrollo o mejora de productos, de planeación, etc.; (ii) Se determina el tipo de audiencia o usuario a los cuales se dirigirá el estudio; ya sean tomadores de decisiones, ejecutivos, ingenieros, consumidores, etc.; Y (iii) se determina también si el estudio será para llevar a cabo la comparación de diferentes sistemas.

Asimismo, durante la definición del alcance se caracteriza al sistema/proceso bajo estudio describiendo y especificando los siguientes lineamientos:

1. Descripción del tipo de producto.
  - a) Función del Sistema.
  - b) Unidad Funcional.
  - c) Flujo de Referencia.
2. Descripción de consideraciones que se tomaron en cuenta a lo largo del estudio.
3. Especificación de las fronteras del sistema.
4. Especificación de la calidad de la información considerada.
5. Especificación de la metodología de evaluación de impacto ambiental y las categorías de impacto a ser usadas, ver sección 3.2.

En la descripción del producto (1), se debe definir primeramente la *función del sistema*, así como las demandas que el producto debe cumplir, para lo cual se hace necesario definir la *Unidad Funcional* (UF) del sistema. La UF es una medida cuantitativa de los bienes o servicios que provee el sistema y que permite que diferentes productos sean comparados y analizados, generalmente se refiere

a una unidad pequeña aunque su magnitud no importa ya que el sistema de estudio se modela linealmente con la UF (Rebitzer et al., 2004). Parte de definir la UF se requiere la definición de un *flujo de referencia*, la cual se considera como una medida de la cantidad de unidades y materia que son necesarias para cumplir con la función establecida por la UF.

En relación a las fronteras del sistema con el medio ambiente (3), cierto número de aspectos deben considerarse, es necesario asegurarse de que los procesos relevantes para el proceso/producto sean considerados, el LCA debería cubrir el ciclo entero de vida. Las entradas (recursos) idealmente deberían ser rastreadas considerando su forma original de materia prima, como se les encuentra en la naturaleza (Finnveden et al., 2009). Las salidas deberían de ser idealmente emisiones al medio ambiente que no sufren de transformaciones subsecuentes por efecto de la mano del hombre. A las entradas y salidas bajo estas definiciones son llamadas flujos elementales en las normas ISO-14040 e ISO-14044. Los estudios de LCA están frecuentemente restringidos a un producto que es usado o derivado en un área geográfica específica durante cierto periodo de tiempo y bajo determinada tecnología. Estas fronteras se deben también definir.

Documentar la calidad de la información adquirida (4) es importante porque tiene una influencia significativa en los resultados del estudio LCA. Se deben considerar si los datos fueron medidos, calculados o estimados, si es información primaria o compilada de la literatura; el tiempo en que se obtuvieron; en que país o región es relevante; si hay falta de información y como se están cubriendo estos datos faltantes, si se asumen o simplemente se desprecian.

### **3.1.2. Análisis del Inventario**

Después de que las metas y alcance del proyecto han sido determinadas, la fase siguiente del estudio LCA involucra la modelación de los procesos relevantes al sistema para determinar el inventario del ciclo de vida (LCI, por su acrónimo en inglés y su definición “Life Cycle Inventory”). En esta etapa se llevan a cabo típicamente las actividades de recolección de datos (cualitativos y cuantitativos) de cada proceso en el sistema; lo cual se logra mediante la recopilación de información primaria en bases de datos públicas, comerciales o de información secundaria reportada en la literatura especializada.

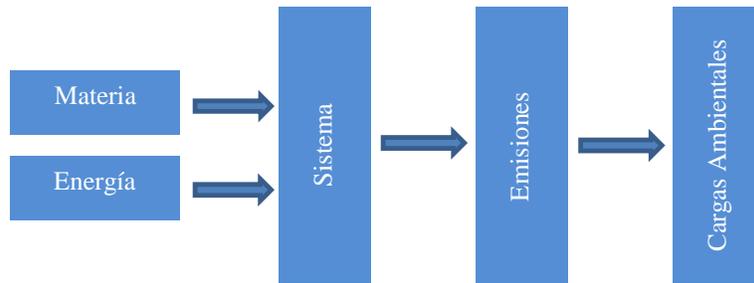


Fig. 3.3: Diagrama de flujo representativo del análisis del inventario.

La creación de un LCI es un proceso iterativo, en el cual a medida que los datos son recolectados se conoce más del sistema. Los requerimientos de información o limitaciones se pueden redefinir o cambiar para alcanzar la meta del estudio.

El consumo de recursos del sistema debe estar en relación a la UF. Después de que todos los datos son recolectados, el resultado del LCI se resume en una tabla en donde se enlistan un conjunto de flujos (entradas/recursos y salidas/emisiones) que representan a las entradas de materia y energía y las salidas del sistema, las cuales son posteriormente relacionadas con las cargas ambientales (Fig. 3.3). Estas cargas ambientales son traducidas en diferentes impactos ambientales, lo cual se hace en la tercer etapa, *Evaluación de Impactos*. Un LCI puede relacionarse a un gran número de sitios, lugares y periodos de tiempo. Estos atributos son frecuentemente escasos o desconocidos (Pennington et al., 2004).

### 3.1.3. Evaluación de los Impactos

Una vez que se ha hecho el Análisis del Inventario quedan identificadas las cantidades de materia y energía necesarias para llevar a cabo la función del sistema, lo que permite dar lugar a la siguiente etapa del LCA, la *Evaluación de los Impactos* (LCIA, definido por su acrónimo en inglés “Life Cycle Impact Assessment”). En general, LCIA se restringe al impacto ambiental y no señala las otras dos dimensiones de sustentabilidad; los impactos sociales y económicos (Finnveden et al., 2009). En la fase de LCIA se identifican y evalúan las cantidades e importancia de los posibles impactos ambientales del producto/proceso/sistema. Esta etapa consta de 5 tareas principales, de los cuales los 3 primeros de ellos son obligatorios: (i) Definición de las Categorías de Impacto; (ii)

Clasificación; (iii) Caracterización; y 2 tareas opcionales: (iv) Normalización; y (v) Ponderación.

En LCIA se involucra la detección, clasificación y selección de las categorías de impacto relevantes para el estudio. Las categorías necesariamente deben estar relacionadas con las emisiones. Las categorías de impacto incluyen todos los problemas ambientales considerados como importantes para el estudio o en su defecto aquellas que son consideradas como problemas ambientales de importancia. Los métodos de caracterización deben estar basados en modelos científicos. Las categorías de impacto se definen en base a dos enfoques: de medio punto o enfoque orientado al problema que tiene una base científica, y por tanto, son más objetivos; y los enfoques de punto final o enfoque orientado al daño que designa pesos de manera subjetiva, por lo que son menos utilizados, ver sección 3.2.

La clasificación es un proceso donde cada una de las cargas ambientales se asigna a una o más categorías de impacto. El paso siguiente es la caracterización de los resultados, esta etapa consiste en convertir las cargas que contribuyen a una misma categoría a unidades comunes, esto se realiza multiplicando cada cantidad por un factor de caracterización o de equivalencia. Los factores de equivalencia dependen de la metodología seleccionada para la evaluación de los impactos. Dos de las categorías de impacto más utilizadas en el mundo son TRACY en E.U. y CML en Europa. Algunas otras son Ecoindicador99 y ReCiPe.

Durante la normalización, los valores previamente caracterizados en las diferentes categorías de impacto son agrupados en relación a un valor de referencia propio de cada metodología de evaluación de impacto.

En la última etapa optativa, se asignan diferentes valores de ponderación a cada categoría de impacto con la finalidad de comparar los resultados del estudio. Estas asignaciones se basan en diferentes juicios de valor como lo son: expertos, niveles de contaminación permitidos o aproximaciones del consumo de energía en el proceso.

### **3.1.4. Interpretación**

Finalmente, los resultados de las fases previas se evalúan en relación a las metas y alcances para finalmente inferir conclusiones y recomendaciones. Es de importancia interpretar la información, se

analizan los resultados para determinar cuales son los puntos claves en relación al medio ambiente y al ciclo de vida del sistema bajo estudio. Las incertidumbres no son frecuentemente consideradas en los estudios de LCA aún cuando pudieran ser grandes. Un análisis en las incertidumbres puede proveer mejores interpretaciones de los resultados. Las incertidumbres se pueden deber a razones científicas, sociales y estadísticas. En la etapa de interpretación, los resultados se compilan en un reporte de acuerdo a las normatividades del ISO. Este reporte debe describir las metas y alcances del estudio, el análisis del inventario y la evaluación de los impactos de manera que sea fácil de leer y entender.

## **3.2. Métodos de Evaluación y Categorías de Impacto**

En general, los métodos de LCIA se dividen en dos grupos:

1. Enfoque orientado al problema y
2. Enfoque orientado al daño.

En los métodos orientados al problema, las cargas ambientales son agregadas de acuerdo a su relativa contribución a los IA que podrían causar. Son frecuentemente referidos como enfoques de *medio punto*, esto debido a que se asocia la carga ambiental en algún momento entre el punto de su ocurrencia y el último daño causado por esa intervención. Por otro lado, los enfoques orientados al daño son referidos también como de *punto final* ya que modelan el daño causado por las cargas ambientales en áreas de protección. Azapagic y Perdan (2011) proponen a CML 2 como el método de enfoque orientado al problema más usado, mientras que Eco-indicator 99 es recomendado como el método con enfoque orientado al daño más usado. En las siguientes secciones se presenta una breve descripción de cada uno de estos métodos.

### **3.2.1. Método Estandarizado CML 2**

En este enfoque, las cargas ambientales son agregadas de acuerdo a su relativa contribución al impacto ambiental que potencialmente puede causar (Azapagic y Perdan, 2011). Tradicionalmente,

se entiende un método de LCIA como un conjunto de categorías de impacto (Acero et al., 2015), las categorías de impacto del *Center of Environmental Science of Leiden University* (CML), en su línea base, definidos como categorías de medio punto, son:

- Acidificación.
- Cambio Climático.
- Consumo de Recursos Abióticos.
- Ecotoxicidad.
- Eurotroficación/Eutrofización.
- Toxicidad.
- Disminución de la Capa de Ozono.
- Oxidación Fotoquímica.

En los siguientes párrafos se incluye una breve descripción de cada una de las categorías de impacto de la CML en su línea base.

### 3.2.1.1. Acidificación (AP)

*El potencial de acidificación* (AP: Acidification Potential) se basa en la contribución del dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), óxidos nitrosos (NO<sub>x</sub>) y amoníaco (NH<sub>3</sub>) al potencial de deposición ácida. El AP se calcula de acuerdo a la ecuación:

$$AP = \sum_{j=1}^J AP_j B_j \quad (\text{kg SO}_2 \text{ eq.}) \quad (3.1)$$

con  $AP_j$  denotando el potencial de acidificación del gas  $j$  y  $B_j$  es su emisión en kilogramos. El AP se expresa usando la unidad referencia kilogramos de dióxido de azufre equivalentes (kg SO<sub>2</sub> eq.).

### 3.2.1.2. Cambio climático (GWP)

*El cambio climático* representa el potencial de calentamiento global (GWP: Global Warming Potential) total de diferentes GEI, tales como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), etc. GWP se calcula como la suma de las emisiones de los GEI multiplicados por su respectivo factor de potencial de calentamiento global  $GWP_j$ :

$$GWP = \sum_{j=1}^J GWP_j B_j \quad (\text{kg CO}_2 \text{ eq.}) \quad (3.2)$$

donde  $B_j$  representa la emisión de GEI  $j$ . Para cada GEI se expresan diferentes factores relativos al GWP del CO<sub>2</sub>, el cual se define como la unidad. Los valores del GWP dependen del periodo de tiempo en el que los efectos del calentamiento global son evaluados. Los factores de GWP para tiempos cortos (20 y 50 años) proveen un indicador de los efectos a corto plazo que ocasionan los GEI en el clima, mientras que los factores de GWP para periodos largos (100 y 500 años) son usados para predecir los efectos acumulativos de esos gases en el clima global.

### 3.2.1.3. Consumo de Recursos Abióticos (ADP)

Se consideran recursos abióticos aquellos recursos sin vida que son parte de la naturaleza y que pueden ser explotados por el ser humano, incluidos los recursos energéticos. Por lo tanto, *El potencial de agotamiento de recursos abióticos* (referido comúnmente con el acrónimo ADP por su definición en inglés “Abiotic Resource Depletion Potential”) representa el agotamiento de metales, minerales y combustibles fósiles. El impacto total de este indicador es calculado mediante la siguiente ecuación:

$$ADP = \sum_{j=1}^J ADP_j B_j \quad (\text{kg Sb eq.}) \quad (3.3)$$

donde  $B_j$  es la cantidad de recurso abiótico  $j$  utilizado y  $ADP_j$  representa el potencial de agotamiento abiótico de ese recurso. La sustancia referencia para esta categoría de impacto es el antimonio (Sb), por lo que se expresa en kilogramos de antimonio usados. Una alternativa para expresar este indicador está dada también por los kilogramos de petróleo equivalentes.

#### 3.2.1.4. Eutrofización (EP)

El potencial de eutrofización (EP: Eutrophication Potential) se define como el potencial de los nutrientes que para causar una sobrefertilización del agua y suelo, lo que puede resultar en un incremento del crecimiento de biomasa (algas). Los sedimentos provenientes de aguas residuales domésticas e industriales favorecen la eutrofización. Se calcula como:

$$AP = \sum_{j=1}^J EP_j B_j \quad (\text{kg PO}_4^{3-} \text{ eq.}) \quad (3.4)$$

con  $B_j$  las emisiones de especies tales como N,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_4^{3+}$ , P y demanda química de oxígeno. El término  $EP_j$  representa su respectivo potencial de eutrofización. Los efectos del EP se expresa en relación a los fosfatos de manera que el efecto total sobre la eutrofización se determinan en kilogramos equivalentes de  $\text{PO}_4^{3+}$ .

#### 3.2.1.5. Toxicidad y Ecotoxicidad (HTP, FAETP, MAETP, TETP)

Los procesos industriales pueden emplean sustancias tóxicas para los ecosistemas y personas. La toxicidad depende de varios factores como lo son la sustancia en si misma, de la forma de exposición, la cantidad, el tiempo de administración, etc. Al ser complicado agrupar todos los efectos tóxicos en un sólo impacto, se distinguen cuatro indicadores: toxicidad para las personas (HTP), toxicidad para los sistemas acuáticos (MAETP y FAETP) y terrestres (TETP).

**El Potencial de Toxicidad Humana** (HTP: Human Toxicity Formation Potential) se calcula tomando en cuenta las emisiones tóxicas con base a 3 diferentes medios, estos son: aire, agua y suelo; y se calcula de la siguiente manera

$$HTP = \sum_{j=1}^J HTP_{jA} B_{jA} + \sum_{j=1}^J HTP_{jW} B_{jW} + \sum_{j=1}^J HTP_{jS} B_{jS} \quad (\text{kg 1,4-DCB eq.}) \quad (3.5)$$

donde  $HTP_{jA}$ ,  $HTP_{jW}$  y  $HTP_{jS}$  son los factores de clasificación toxicológicos para sustancias emitidas al aire, agua y suelo respectivamente.  $B_{jA}$ ,  $B_{jW}$  y  $B_{jS}$  representan las respectivas emisio-

nes de diferentes sustancias tóxicas al aire, agua y suelo. La sustancia referencia en esta categoría de impacto es 1,4-diclorobenceno.

**El Potencial de Ecotoxicidad** Por otro lado, *el Potencial de Ecotoxicidad* (ETP: Eco-Toxicity Potential) se calcula para los tres medios ambientales (aire, agua y suelo) y está comprendido por 5 indicadores ( $ETP_n$ ):

$$ETP_n = \sum_j^J \sum_{i=1}^I ETP_{i,j} B_{i,j} \quad (\text{kg 1,4-DB eq.}) \quad (3.6)$$

donde  $n \in \{1, 5\}$  representa la toxicidad acuática en agua dulce, toxicidad acuática en agua marina, toxicidad en sedimentos de agua dulce, toxicidad en sedimentos de agua marina y ecotoxicidad terrestre respectivamente.  $ETP_{i,j}$  representa el factor de clasificación de ecotoxicidad para la sustancia tóxica  $j$  en el ambiente  $i$  (aire, agua y suelo) y  $B_{i,j}$  es la emisión de la sustancia  $j$  al ambiente  $i$ . El ETP se basa en la concentración máxima tolerable de diferentes sustancias tóxicas en el ambiente. Al igual que para el HTP, la sustancia referencia para esta categoría de impacto es 1,4-diclorobenceno.

### 3.2.1.6. Disminución de la Capa de Ozono (ODP)

*El potencial de destrucción de la capa de ozono* (ODP: Ozone Depletion Potential) se refiere a la reducción del espesor de la capa de ozono estratosférico a causa de las emisiones de sustancias químicas que atacan y descomponen las moléculas de ozono, como los clorofluorocarbonos (CFC) y otros hidrocarburos halógenados.<sup>1</sup> El principal daño que se causa en los seres humanos es el incremento a la exposición de los rayos UV. El ODP expresa como:

$$ODP = \sum_{j=1}^J ODP_j B_j \quad (\text{kg CFC-11 eq.}) \quad (3.7)$$

<sup>1</sup>Hidrocarburos que contienen algún hidrógeno de la molécula sustituido por algún átomo del grupo de los halógenos ([https://es.wikipedia.org/wiki/Hidrocarburo\\_halogenado](https://es.wikipedia.org/wiki/Hidrocarburo_halogenado)).

Los halógenos (del griego, formador de sales) son los elementos químicos que forman el grupo 17 (XVII A, utilizado anteriormente) o grupo VII A de la tabla periódica: flúor(F), cloro(Cl), bromo(Br), yodo(I), astato(At) y ununseptio(Uus). Este último también está en los metales del bloque f (<https://es.wikipedia.org/wiki/Halógeno>).

La unidad de referencia que define éste indicador son los kg de CFC-11 eq.

### 3.2.1.7. Oxidación Fotoquímica (POCP)

El potencial de creación de oxidantes fotoquímicos (POCP: Photochemical Oxidant Formation Potential) está relacionado con el potencial de compuestos orgánicos volátiles (COV o VOCs por su significado en inglés “Volatile organic compounds”) y óxidos nitrosos ( $\text{NO}_x$ ) para generar smog de verano o fotoquímico. Usualmente se expresa en términos de kg de etileno equivalentes y se calcula como:

$$POCP = \sum_{j=1}^J POCP_j B_j \quad (\text{kg de etileno eq.}) \quad (3.8)$$

donde  $B_j$  es la emisión de la especie  $j$  participando en la formación de smog de verano y  $POCP_j$  es su factor de clasificación para la formación de oxidante fotoquímico.

### 3.2.1.8. Uso del Suelo (ILU)

El uso del suelo tiene impacto en la biodiversidad, la diversidad de especies depende del tipo de uso del terreno y de las dimensiones del área. *Los impactos por uso de suelo* (ILU: Impacts of Land Use) se expresa en  $\text{m}^2$  de terreno cultivable por año y se calculan multiplicando la superficie de suelo usado ( $A$ ) por unidad de tiempo de ocupación ( $t$ ):

$$ILU = A \times t \quad (\text{m}^2 \cdot \text{año}) \quad (3.9)$$

## 3.2.2. Método Eco-Indicator 99

Este método, con un enfoque de punto final, se basa en las condiciones ambientales Europeas y considera 3 áreas de protección o tipos de daños:

1. Daño a la salud humana, considerando los siguientes indicadores:

- Carcinogénesis.
- Efectos respiratorios.

- Radiación ionizante.
  - Agotamiento de la capa de ozono, y
  - cambio climático.
2. Porcentaje de daño a la calidad del ecosistema, considerando los siguientes indicadores:
- Ecotoxicidad.
  - Uso y transformación de tierra.
  - Acidificación y eutrofización.
3. Daño a los recursos fósiles y minerales, considerando los 2 indicadores siguientes:
- Agotamiento de minerales, y
  - Agotamiento de combustibles fósiles.

### **3.3. Herramientas Requeridas para los Estudios LCA**

Uno de los factores más importantes en el LCA es la disponibilidad de las bases de datos adecuadas y completas para el proceso o tecnología que se requiere evaluar. Se distinguen dos tipos generales de datos:

1. Información primaria, básicamente relacionada con los procesos específicos y las partes o componentes del sistema de interés para el estudio.
2. Información secundaria, relacionada con las partes del sistema que proveen la materia y energía para el sistema principal.

Aunque siempre se prefiere la información primaria, no siempre está disponible o accesible por lo que frecuentemente se hace uso de la información secundaria.

Para poder realizar un análisis de ciclo de vida de un bien o servicio, es necesario tener información de los inventarios para la cadena de procesos involucrados. Existen una variedad de bases de datos que se proveen con herramientas informáticas que facilitan la evaluación y el análisis de

los impactos; algunos son de uso libre como CCaLC y Gemis, y otros comerciales como GaBi y SimaPro (Acero et al., 2015; Azapagic y Perdan, 2011).

La mayoría de las bases de datos contienen información para Europa y América del Norte; la información para los países en desarrollo es aún escasa lo que puede llevar a problemas o limitaciones en los estudios de LCA (Azapagic y Perdan, 2011).

En el presente trabajo de tesis, para hacer el modelado del sistema planteado (construcción de un pozo geotérmico), el análisis del inventario y la evaluación de los impactos, se utilizó el software GaBi v6, referido como una de las mejores herramientas disponibles a nivel comercial (Baitz et al., 2014) y su base de datos ecoinvent 3 (Wernet et al., 2016). En la siguiente sección se presenta una descripción breve sobre las capacidades del software GaBi.

### **3.3.1. Descripción General del Software GaBi®**

GaBi es una herramienta de computo desarrollada para realizar estudios de Análisis de Ciclo de Vida (LCA): (GaBi et al., 2016a). Soporta cada una de las etapas del LCA, desde la recolección y organización de información, hasta la evaluación y presentación de resultados. Este software tiene una estructura modular y parametrizable que permite modelar de manera rápida procesos complejos y diferentes opciones de producción (GaBi et al., 2016b). La arquitectura de GaBi permite integrar también información como costos económicos o de impacto social haciéndola una herramienta de LCA integral (GaBi et al., 2016a).

Dentro de las capacidades técnicas que ofrece el software GaBi se tiene que éste se apega a las recomendaciones del ISO-14040 e ISO-14044, también incorpora las metodologías de evaluación de impacto más utilizadas como ILCD, CML, ReCiPe, IPCC y Traci; además permite calcular la Huellas de Carbono, Hídrica, de Agua y Ambiental (Baitz et al., 2014).

El software GaBi cuenta con el más completo y actualizado inventario de ciclo de vida disponible en el mercado. Su base de datos, creada por Thinkstep, contiene alrededor de 300 años-persona de colección y análisis de datos, además de 1,000 años-persona de experiencia en el manejo y desarrollo de las bases de datos de GaBi; lo que le permite servir a los propósitos de diferentes grupos como lo son la academia y la educación, la política y la regulación, la investigación y el desarrollo,

así como a la consultoría e industria (Baitz et al., 2014).

### **3.3.2. Descripción General de la Base de Datos EcoInvent<sup>®</sup>**

Thinkstep ha integrado la base de datos Ecoinvent a las bases de datos de GaBi. Ecoinvent contiene inventarios de ciclo de vida internacionales en una gran variedad de procesos: suministro de energía, extracción de recursos, suministros de materia, químicos, metales, agricultura, manejo de desechos, servicios de transporte, entre otros. Ecoinvent 3 presenta una base de datos global que soporta LCIA regionalizados incrementando la relevancia de la base de datos para evaluaciones fuera de Europa, adecuando los impactos a las condiciones locales, representando las actividades de producción a regiones específicas y evitando un cálculo de los impactos en regiones inapropiadas. La base de datos global aproxima las actividades en regiones que no cuentan con información local considerando los consumos en la red energética para una región o producto, tomando en cuenta el transporte del bien desde el productor hasta el consumidor así como las emisiones durante su transporte (Wernet et al., 2016).

## Capítulo 4

# Antecedentes de Estudios LCA en Sistemas Geotérmicos

A pesar de que la metodología de ACV se encuentra bien fundamentada y se utiliza ampliamente para evaluar la sustentabilidad ambiental de procesos y productos, aún no se adopta como una herramienta para estimar la sustentabilidad ambiental de las tecnologías geotérmicas, como es el caso de otras industrias, por lo que los estudios de LCA aplicados a la generación de geoelectricidad son escasos.

En este tenor, la primer reseña publicada que analiza los efectos ambientales provocados durante el ciclo de vida de la generación de electricidad por geotermia es presentada por Bayer et al. (2013). La reseña más actual de LCA para la generación de electricidad con geotermia es llevada a cabo por Tomasini-Montenegro et al. (2016). Bayer et al. (2013) por su parte estudian dos casos orientados a las plantas hidrotermales, una planta binaria de 10 MW y una de flasheo de 50 MW, ambos casos referentes a las condiciones del suroeste de EU, y con ello crean un tercer caso con la finalidad de representar un sistema universal al cual evaluar y tener una visión general de los impactos ambientales; no tomaron en cuenta las tecnologías EGS o híbridas por no considerarlas representativas de las tecnologías estándares de ese momento. Los efectos que evaluaron fueron uso de recursos, agua y energía, las implicaciones del uso de suelo, emisiones al agua y aire, además de las consecuencias sociales durante todo el ciclo de vida. La información colectada la

tomaron de expertos de la industria y de los laboratorios nacionales de EU, así como de otros estudios para determinar un promedio estimado de las emisiones y uso de recursos. Todo en función de la unidad funcional (1 kWh). Las fronteras del sistema incluyen la exploración, perforación, instalación del pozo, construcción de la planta con todos sus edificios, operación por treinta años y desmantelamiento y reciclaje de la planta. No consideran las tuberías que conectan la planta con los consumidores, tampoco la demanda de energía para la construcción de la planta en el sitio ni el transporte de materiales. Si incluyen las instalaciones para enfriamiento pero no la cogeneración de calor que en algunos lugares juega un papel importante. En contraste, Tomasini-Montenegro et al. (2016), basados en los resultados reportados en la literatura, proveen un análisis cualitativo de los impactos ambientales de ciclo de vida de la industria geotérmica, así como de los focos de mayor importancia y de la falta de información para realizar algunas evaluaciones; identificaron 18 categorías de impacto, la mayoría de los estudios resaltan el calentamiento global como uno de los impactos principales de la generación comercial de electricidad por geotermia, y presentan los resultados de LCA previos por tipo de tecnología de explotación (vapor seco, flasheo simple, flasheo doble, ciclo binario y EGS).

Algunos de los trabajos, aparte de evaluar la sustentabilidad ambiental de las tecnologías geotérmicas, realizan estudios para comparar diferentes tecnologías, tanto renovables como tradicionales. Sullivan et al. (2010), del Laboratorio Nacional Argonne, evaluaron las emisiones de GEI durante el ciclo de vida de diferentes tipos de plantas geotérmicas y las compararon con otros tipos de tecnologías para producir electricidad (carbón, gas natural, nuclear, hidroeléctrico, eólico, fotovoltaica y biomasa); Amponsah et al. (2014) realizaron una recopilación de diferentes autores de las emisiones de GEI producidas de la generación de electricidad y calor durante el ciclo de vida de diferentes tecnologías de ER y las compara entre ellas así como con las emisiones de las tecnologías tradicionales; y Hondo (2005) presenta un análisis de las emisiones de GEI de diferentes sistemas de producción de electricidad. Las plantas evaluadas por Sullivan et al. (2010) fueron cuatro; dos de tipo EGS, una hidrotermal de flasheo y una hidrotermal binaria. Para la fase de construcción, encontraron que por kWh dado a la red de transmisión, las plantas convencionales (carboeléctricas, ciclo combinado de gas natural e hidroeléctrica) en general requieren de menos uso de acero y concreto que los sistemas de ER, sin embargo, los requerimientos de masa de concreto por kWh para las

presas de las hidroeléctricas es bastante alto. El acero y concreto necesario para las turbinas eólicas son de dos a cinco veces mayor a los sistemas convencionales. Los sistemas EGS y binarios usan más concreto por MW que otros sistemas de ER, esto debido principalmente al material adicional requerido durante la perforación y construcción de los pozos. La cantidad de aluminio utilizado en los sistemas de ER es más alto que en los sistemas convencionales a causa de elementos como los marcos de aluminio para los módulos fotovoltaicos o las aletas de los intercambiadores de calor utilizados en los enfriadores de aire en los sistemas geotérmicos binarios. Su modelo demuestra también que las termoeléctricas convencionales, además de consumir RF, emiten más GEI que las ER por kWh de electricidad. Las emisiones de GEI en los sistemas renovables son generadas principalmente en la fase de construcción, aunque en las plantas de flasheo ocurren durante la operación de la planta y para las plantas de biomasa la producción del combustible es la fase que predomina en las emisiones de GEI. A pesar de las grandes cantidades de acero y concreto requeridas por kWh en las plantas EGS, estos sistemas son uno de los menores emisores de GEI dentro de los sistemas de ER presentados en este estudio. Por su parte, Amponsah et al. (2014) encuentran que para las instalaciones geotérmicas las emisiones de GEI están estimadas entre los rangos de 40.0-60 g CO<sub>2</sub> eq kWh<sub>e</sub><sup>-1</sup>, con valores mínimos alrededor de los 11.0 g CO<sub>2</sub> eq kWh<sub>e</sub><sup>-1</sup> y estimaciones máximas alrededor de 78.0 g CO<sub>2</sub> eq kWh<sub>e</sub><sup>-1</sup>. Concordando estos valores en el mismo orden de magnitud que los reportados para otras tecnologías renovables. Se detectó al diésel como la principal fuente de emisiones de GEI en las instalaciones geotérmicas, seguido de las barras de hierro usadas en la construcción de la planta. Finalmente, algunas fuentes menores dadas por quema de combustible en hornos de fundición. De forma similar, Hondo (2005) examinó nueve tipos diferentes de tecnologías para generar electricidad, entre ellos la geotérmica, donde encontró un total de 15 g CO<sub>2</sub> eq por kWh de electricidad generada, de los cuales el 35.3 % son emitido durante la construcción y el restante 64.7 % en la operación (perforación de pozos adicionales, mantenimientos generales y cambios de equipo); el estudio lo hizo para una planta de flasheo doble de 55 MW, con un factor de capacidad del 60 % operando durante un periodo de 30 años. Las emisiones de los sistemas renovables fueron de los 11.0-53.0 g CO<sub>2</sub> eq/kWh, siendo el más bajo para las hidroeléctricas y el más alto para los sistemas fotovoltaicos; en este rango, el sistema geotérmico se posiciona en segundo lugar. Para el caso de las energías convencionales, encontró valores entre los rangos de 518.0-975

g CO<sub>2</sub> eq/kWh.

Algunos estudios llevan su análisis más allá del cálculo de las emisiones de GEI. Frick et al. (2010) adicionan el consumo de recursos energéticos finitos y los efectos de acidificación y eutrofización causados por la producción de electricidad con recursos geotérmicos de baja temperatura (planta geotérmica de ciclo binario). Martín-Gamboa et al. (2015) evaluaron el desempeño ambiental y energético de la generación eléctrica en una planta geotérmica de ciclo binario usando recursos de alta entalpia y de la generación de calor en un sistema cerrado de una bomba de calor usando recursos de baja entalpia calculando, además de las categorías considerados por Frick et al. (2010), los potenciales de consumo de recursos abióticos, disminución de la capa de ozono y oxidación fotoquímica. De su análisis, Martín-Gamboa et al. (2015) concluyen que, para la generación de energía con una planta geotérmica de ciclo binario usando recursos geotérmicos de alta entalpia, la operación de los pozos de inyección y producción muestran una alta contribución a los IA, principalmente debido a las actividades de perforación y revestimiento. La operación de la planta se identifica como una fuente de impacto debido a la pérdida de fluidos de trabajo. Aun así, cuando se compara éste sistema con la generación de electricidad por medios fósiles, la electricidad geotérmica resulta ser una alternativa prometedora. En cuanto a la generación de calor geotérmico, comparada con los medios convencionales que funcionan a base de combustóleo y gas natural, tiene un gran impacto ambiental principalmente debido a la producción de refrigerante y al uso de la energía eléctrica de la red, lo que mejoraría al tener disponibilidad de una red eléctrica amigable al ambiente.

Hay estudios que consideran los tres ejes de la sustentabilidad y no solo las afectaciones ambientales. Shortall et al. (2015b) presentan una reseña de las áreas de protección que deberían de ser de interés en aras de tener proyectos geotérmicos apegados a una sustentabilidad económica, ambiental y social; destacando las fortalezas y debilidades del aprovechamiento de la energía geotérmica en cada uno de esos tópicos. Algunos de los estudios enfocaron sus esfuerzos en desarrollar marcos teóricos con indicadores ambientales, económicos y sociales apropiados con la finalidad de obtener proyectos geotérmicos sustentables y presentan un caso de estudio para Islandia, Nueva Zelanda y Kenia, para los que encuentran los indicadores adecuados a las condiciones específicas de cada uno de esos países (Shortall et al., 2015a,c).

En la literatura están bien identificadas, de manera cualitativa, las afectaciones ambientales causadas por la explotación de la EG. Sin embargo, la gran diversidad y particularidades de cada campo geotérmico hace difícil, sino es que imposible, generar un único modelo que evalúe a todos y cada uno de los sistemas. En éste capítulo se expusieron algunas de las publicaciones hechas a nivel internacional para evaluar la sustentabilidad ambiental de proyectos geotérmicos. En el caso particular de México los trabajos realizados en ACV están condensados en la reseña de Güereca et al. (2015), mostrando los avances en este ámbito durante los últimos 16 años. Inicialmente, en 1999, se enfocó la aplicación de ACV a temas en manejo de desechos y a partir del 2010 hubo un interés por estudiar sistemas energéticos, la huella de carbón, la huella hídrica y el sector de la construcción. En relación a los sistemas energéticos, Santoyo-Castelazo et al. (2011) presentan el primer estudio de ACV a la generación de electricidad en México; mientras que algunos otros evalúan diferentes opciones de ER como producción de etanol con caña de azúcar, almacenamiento de hidrógeno, almacenamiento de energía hídrica, y turbinas eólicas (Güereca et al., 2015). Sin embargo, no hay trabajos en relación a los sistemas geotérmicos. Es clara la necesidad de estudiar estos sistemas, entenderlos desde un punto de vista sustentable, identificar las etapas que afectan significativamente al medio ambiente y conocer cuantitativamente las posibles afectaciones ambientales que se generan del uso de la energía geotérmica. Todo esto en conjunto creara un panorama que permita buscar mejoras y/o cambios en los procesos de generación de geoelectricidad, además de fomentar una cultura por la creación de bases de datos que permitirán realizar inventarios y análisis de sustentabilidad ambiental más completos y representativos de las interacciones de las tecnologías geotérmicas con el ambiente.

## **Capítulo 5**

# **Sustentabilidad Ambiental de la Construcción de un Pozo Geotérmico**

A través de los capítulos previos se ha expuesto el importante papel que juega la producción energética para el sustento de la humanidad. Por otra parte, es evidente que existe una gran dependencia energética de los CF, los cuales destacan por su carácter no renovable, sus altos costos y las fuertes consecuencias ambientales derivadas de su explotación. Casi la quinta parte de la energía que se consume en el mundo es para producir electricidad y su demanda va en aumento, lo que ha llevado a una tendencia en las últimas décadas por implementar las ER para satisfacer esa creciente demanda energética eléctrica de una manera ambientalmente sustentable; sin embargo, hacer uso de ER no garantiza que se seguirá una cadena de procesos amigables al ambiente. México es potencia en generación de geoelectricidad y cuenta con un amplia experiencia en el área (ver Cap. 2). Además, con las nuevas legislaciones en materia energética (ver Sec. 2.5) se espera un crecimiento de la industria geotérmica mexicana. Bajo éste contexto es importante determinar el rendimiento ambiental durante el ciclo de vida de la generación geotermoeléctrica, identificando los procesos que potencialmente se puedan mejorar para disminuir su impacto ambiental. Por otra parte, la generación de energía eléctrica mediante el aprovechamiento de la EG consta de diversas etapas, ver Sec. 2.3. De acuerdo a los trabajos previos en la literatura, la perforación del pozo es un etapa detectada como clave en cuanto a los probables impactos ambientales generados, sobre

todo en las emisiones de GEI (Martín-Gamboa et al., 2015; Sullivan et al., 2010). Durante la perforación pueden haber IA por emisiones, uso de energía y recursos; estos impactos se reflejan en daños potenciales geológicos, contaminación auditiva, emisiones a la atmósfera, suelo y agua, y en el uso de agua, tierra y energía. Además, como se ha visto en la Sec. 2.1, en México y en el mundo en general, la mayor parte de electricidad producida por geotermia es con plantas de tipo flasheo simple, ver fig. 2.1. En resumen, estas son las consideraciones tomadas para evaluar el rendimiento ambiental de la perforación de un pozo geotérmicos de producción para generar electricidad desde un perspectiva de ciclo de vida.

La selección de un enfoque de ciclo de vida y LCA como herramienta de evaluación ambiental es necesaria para evitar un análisis puntual que traslade los IA a otro ambiente o parte del ciclo de vida (ver Sec. 3.1).

## **5.1. Meta y Alcance del Estudio**

En el presente estudio se siguen los lineamientos establecidas en las normas ISO 14040:2006 (2006) e ISO 14044:2006 (2006) para llevar a cabo un LCA de la construcción de pozos geotérmicos de producción utilizados para generar electricidad con unidades de flasheo simple ubicadas en el campo geotérmico Los Humeros, Puebla. Con los resultados obtenidos se presenta información ambiental del potencial de los impactos ambientales, representativa en lo posible de las interrelaciones entre los procesos y actividades de la construcción del pozo con el medio ambiente. Además, se identifican los procesos y actividades a los que hay que realizar un mayor enfoque debido a la significativa carga ambiental detectada para las categorías de impacto consideradas. Se espera que el análisis y los resultados aquí encontrados, además de ser un estudio académico de referencia, sirvan de guía a los tomadores de decisiones dentro de la industria geotérmica para que ésta sea aprovechada en bien de la humanidad sin dejar de lado el aspecto ambiental que a todos nos concierne; logrando un aprovechamiento de la geoeléctricidad que se apege al cuidado del medio ambiente cumpliendo con los compromisos del país en materia ambiental y cambio climático (SENER, 2012).

Los datos utilizados para construir el inventario de éste LCA fueron tomados de literatura es-

pecializada como lo son:

- Reportes públicos de la SEMARNAT y CFE.
- Del Inventario Nacional de Energías Renovables (INERE) de la SENER.
- De catálogos para accesorios de construcción de la industria geotérmica.
- Y de memorias de congresos nacionales e internacionales.

### **5.1.1. Descripción del Sistema, Límites del Sistema y Función del Sistema**

Consideremos el sistema de estudio como la construcción de los pozos de producción necesarios para alimentar y poner en operación las unidades de tipo flasheo simple instaladas en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla, por un periodo de 30 años, ya que la infraestructura de las plantas geotérmicas se construye y diseña típicamente para ese periodo de vida útil (IGA y IFC, 2014). De acuerdo a L. Gutiérrez-Negrín et al. (2015), hay 23 pozos de producción en operación en Los Humeros, los cuales alimentan 9 unidades de flasheo simple dando una capacidad instalada de 93.4 MW (L. Gutiérrez-Negrín, 2015; L. Gutiérrez-Negrín et al., 2015) de los cuales la SENER y CFE (2016) reporta que para junio del 2015 había una capacidad de operación de 51.8 MW con los cuales se producían 462.1 GWh al año. Los impactos ambientales serán calculados por kWh producido durante el ciclo de vida de la planta (30 años), en este tiempo no se requerirá de perforar pozos de reposición para compensar la declinación en la producción de los pozos o la reposición de aquellos que van terminando su vida útil, ya que el promedio de vida para los pozos productores en Los Humeros es de 57 años (Jaimes-Maldonado et al., 2012b).

Sea el sistema “construcción de pozos geotérmicos de producción direccionales para generar electricidad” conformado por las siguientes etapas, ver fig. 5.1, en los cuales :

- Preparación del sitio (S1).
- Perforación del pozo (S2).
- Revestimiento (S3).

- Cementación (S4).



Fig. 5.1: Diagrama de flujo de las etapas generales que constituyen la construcción de un pozo geotérmico de producción.

En cada uno de esas cuatro etapas se realizan las operaciones descritas en el cap. 2.3 para construir un pozo con la siguiente geometría (SEMARNAT y CFE, 2014):

- Se inicia con un agujero de un metro de diámetro (40 plg) y cinco de profundidad, se instala el tubo conductor con un diámetro interior de 762 mm (30 plg), el espacio anular entre el tubo y el pozo se llena por gravedad con cemento normal.
- En la segunda fase se perforan hasta los 30 m de profundidad un diámetro de 660 mm (26 plg) y se instala una TR de 508 mm (20 plg) de diámetro llamada tubería superficial. Para ello se perfora primero con una barrena de 311 mm (12 1/4 plg) diámetro ampliando después con la barrena de 508 mm y finalmente con la de 660 mm de diámetro. El espacio vacío entre la TR y el pozo se llena con cemento modificado utilizando una unidad cementadora de alta presión que hace fluir el cemento hasta la parte inferior del tubo y de ahí asciende por el exterior de la TR y la pared natural del pozo hasta llegar a la superficie.
- La tercera fase de perforación es hasta los 430 m de profundidad con un diámetro de 444 mm (17 1/2 plg) para instalar lo que se conoce como tubería de anclaje con un diámetro interno de 340 mm (13 3/8 plg). Se utiliza primero una barrena de 311 mm (12 1/4 plg) de diámetro y después se hace la ampliación a los 444 mm. La cementación se realiza con la unidad de alta presión quedando la tubería de anclaje cementada los primeros 30 m con la TR de 508 mm y los restantes 400 m con la pared del pozo.
- La etapa siguiente es perforar hasta los 1430 m de profundidad con la barrena de 311 mm de diámetro para instalar la tubería de producción de 244 mm (9 5/8 plg) de diámetro, quedando

cementada los primeros 430 m con la tubería de anclaje y los siguientes 1000 m con la pared natural del pozo.

- En la última etapa se perfora con una barrena de 216 mm (8 1/2 plg) de diámetro hasta encontrar la zona productora o condiciones atractivas de presión y temperatura. Aquí se instala tubería (liner) de 178 mm (7 plg) de diámetro caracterizada por tener ranuras verticales en toda su longitud para permitir el acceso del fluido geotérmico. Cada tubo tiene en sus extremos roscas que permiten ensamblar tubo por tubo conforme se está instalando en el agujero, dicho roscado soporta más de 900 m de tubería.

Para la perforación de cada uno de los 23 pozos son necesarias sus respectivas plataformas y presas de lodo. El área necesaria para esta parte del proyecto es 80 m × 40 m para la plataforma y 10 m × 30 m para la presa de lodo, la cual tiene una profundidad de 2 m; los proyectos geotérmicos se desarrollan en zonas específicas que presenten características geológicas únicas para contener recursos geotérmicos factibles de ser explotados comercialmente, esto hace que no sea posible proponer sitios alternativos, pero si se pueden definir ubicaciones más adecuadas dentro de la zona de aprovechamiento para la ubicación de las plataformas (SEMARNAT y CFE, 2007); la ubicación de las plataformas será en zonas de baja pendiente y libre de vegetación arbórea y arbustiva, así como lo más cercanas a caminos de accesos principales ya construidos.

### **5.1.2. Consideraciones**

También supondremos que la producción de electricidad no varía durante los 30 años de operación de la planta y se mantiene constante cada año.

La profundidad promedio de los pozos perforados en Los Humeros es de 2.2 km (L. Gutiérrez-Negrín, 2015), supongase entonces que después de la última etapa de perforación, se instalan 800 m de liner de 7 plg, llegando a una profundidad de 2.2 km de profundidad y sin sobrepasar los 900 metros que soporta el roscado de la tubería.

En el sistema de estudio descrito no se incluyen las actividades de pre-perforación, entendiendo estas como aquellas tareas empleadas para identificar zonas promisorias y evaluar si su potencial es comercialmente viable. De acuerdo al estudio presentado por Sullivan y Wang (2013b), a pesar

de los costos y significantes recursos en esta etapa, los métodos exploratorios previos a las tareas de perforación son en su mayoría de naturaleza analítica y sus impactos son despreciables en comparación al ciclo de vida completo de la generación de electricidad geotérmica; mientras que la perforación y sus actividades asociadas (revestimiento, cementación, consumo de agua y diésel) contribuyen significativamente a los posibles impactos ambientales.

Bayer et al. (2013) afirma que las cantidades de desperdicios de perforación tales como recortes, residuos de cemento y lodos de perforación (bentonita) son consideradas pequeñas y no son de interés ambiental. Por tal razón, no se considera su tratamiento dentro del sistema.

Para la terminación del pozo es necesario el árbol de válvulas, el cual está constituido por una cruz bridada de 25.4 cm  $\phi$  S-900, una válvula lateral y superior de 25.4 cm  $\phi$  S-900 y una brida ciega de 25.4 cm  $\phi$  S-900 (SEMARNAT y CFE, 2014). Al no contar con la información necesaria respecto a la cantidad de materia necesaria en la construcción de estos elementos, se desprecian considerando que tienen una contribución no significativa en comparación a la cantidad de acero necesario para el revestimiento del pozo.

No se está considerando la maquinaria pesada necesaria para la preparación del sitio de perforación ni la instalada en la plataforma de perforación, sólo el diésel requerido para su funcionamiento.

### **5.1.3. Categorías de Impacto**

Para el cálculo de las categorías de impacto se hará especial énfasis en el potencial de calentamiento global (GWP) al ser el indicador de importancia al cambio climático. Adicionalmente se evaluarán todas las categorías de impacto del método CML: acidificación (AP), consumo de recursos abióticos (ADP), eutrofización (EP), toxicidad humana (HTP), ecotoxicidad para los sistemas acuáticos (MAETP y FAETP) y terrestres (TETP), disminución de la capa de ozono (ODP) y oxidación fotoquímica (POCP).

## 5.2. Creación y Análisis del Inventario

En esta sección se presenta la información de los flujos de entrada correspondientes al sistema primario, definido en la Fig. 5.2. La información para el sistema secundario que incluye la generación de electricidad se obtuvo de la base de datos Ecoinvent v3.1 (Wernet et al., 2016).

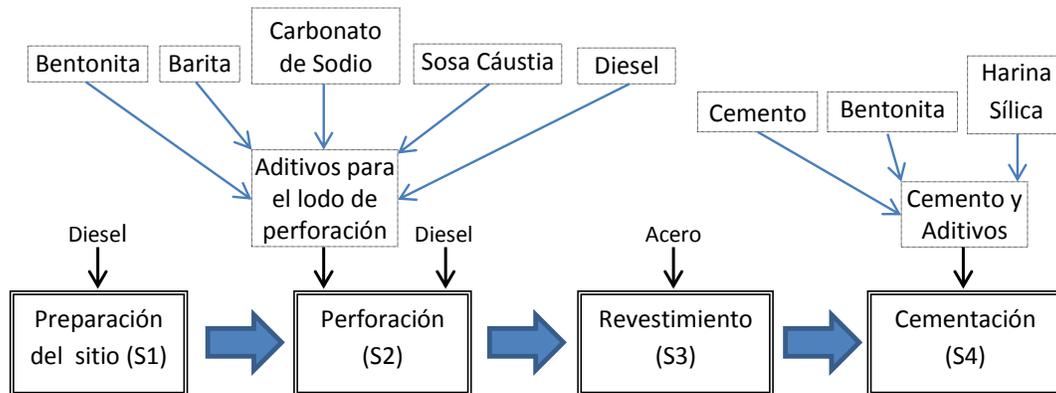


Fig. 5.2: Diagrama de flujos de materia y energía para los procesos de la construcción de un pozo de producción.

S1 Durante la obra civil, SEMARNAT y CFE (2014) estiman un consumo de 5300 litros de diésel para 30 días de trabajo. El total de éste diésel se considerará consumido en maquinaria de construcción para la preparación del sitio de perforación.

S2 Para la etapa de perforación, considerando la potencia total de los motores y turnos continuos, SEMARNAT y CFE (2014) calculan el consumo de diésel en  $6.5 \text{ m}^3$  al día para alimentar el sistema de potencia: dando un consumo de  $585 \text{ m}^3$  para tres meses de perforación en un pozo. Las cantidades de aditivos necesarias para el lodo de perforación se enlistan en la tabla 5.1. Durante la perforación, SEMARNAT y CFE (2014) reporta que son necesarias 10 toneladas de materiales obturantes grueso, medio y fino de cada uno pero no específica cual es su composición; de igual manera, son necesarios 16 toneladas de lignex, sustancia de la que no se tiene una evaluación de impacto en la base de datos de EcoInvent v3.1 (Wernet et al., 2016), con la que se trabajó. El total de 30 toneladas de materiales obturantes, más las 16 toneladas de lignex se están considerando agregándose a la bentonita total.

S3 Para las tuberías de revestimiento, SEMARNAT y CFE (2014) reportan los diámetros y longitudes necesarias pero no el espesor de las tuberías. Se hizo una estimación promedio del espesor máximo y mínimo que se construyen en la industria y se utilizan comúnmente en el sector energético mexicano (TenarisTamsa, 2013), que además siguen las normas API para TR. Las listas con los espesores de las TR reportan un diámetro máximo de 20 plg (Tenaris-Tamsa, 2013; William C. Lyons, Gary J Plisga, 2005), pero en la geometría descrita para la perforación de los pozos de producción en Los Humeros se necesitan tuberías de 30 plg. Para este caso, se promediaron los valores encontrados de 309.7 lb/ft (460.88 kg/m) (Schlumberger, s.f.) y 147.36 kg/m (Ramírez-Montes et al., 2014; Tapia et al., 2013). El primer valor es reportado en un caso de estudio en el Golfo de Suez y el segundo valor se reporta para pozos en los campos geotermicos mexicanos, uno de Las Tres Virgenes, BCS y otr de Los Azufres, Michoacán.

S4 Los materiales, cemento y aditivos para obturaciones, necesarios para la cementación de las tuberías de revestimiento se reportan en la tabla 5.1. El cemento que reporta SEMARNAT y CFE (2014) es tipo G. En la base de datos de EcoInvent que se tuvo acceso no se encontró la evaluación de impacto para este material, por lo que siguiendo las tendencias en la literatura se tomo el proceso de producción para el cemento portland.

Los materiales requeridos para la perforación de un pozo geotérmico con las características descritas se desglosan en la tabla 5.1, y se presentan por UF. En los casos que fue necesario convertir el volumen de diésel a masa o energía, se utilizó la densidad  $\rho_d$  y poder calorífico  $PC_d$  para el diésel mexicano, factores de conversión (5.1) y (5.2), reportado por Castillo-Hernández et al. (2012) a una temperatura de 20°C y 0 % de etanol.

$$\rho_d = 0.8367 \text{ kg/lt} \quad (5.1)$$

$$PC_d = 45 \text{ MJ/kg} \quad (5.2)$$

Bajo todas las consideraciones aquí descritas, se necesita construir 3.63E-06 m de pozo por kWh producido en planta durante los 30 años.

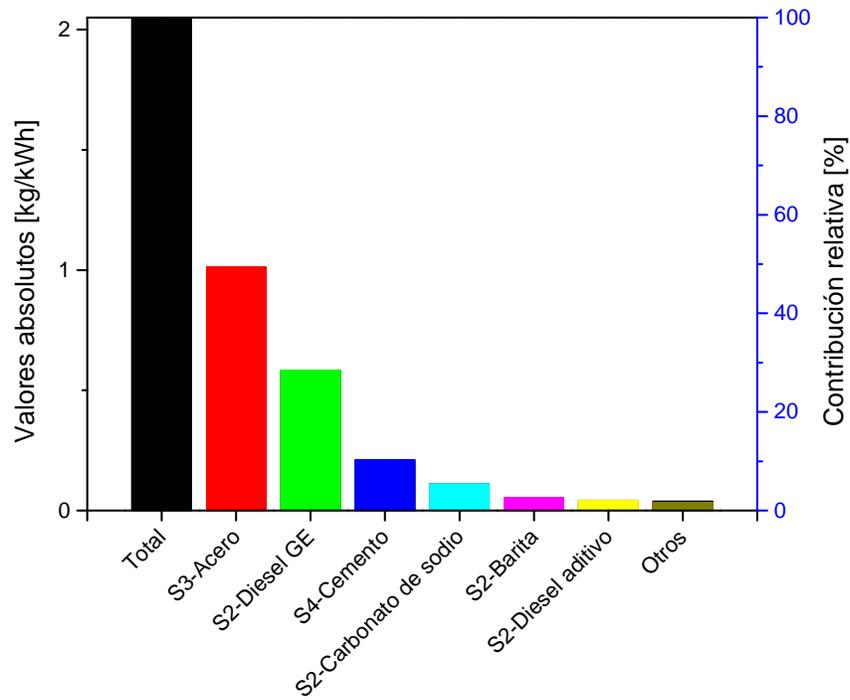
Tabla 5.1: Materia y energía requeridas para la construcción: para un pozo de producción y por UF.

<b>Etapa</b>	<b>Descripción</b>	<b>Flujo</b>	<b>Cantidad por pozo</b>	<b>Por kWh durante los 30 años</b>
S1	Diésel utilizado en maquinaria de construcción para la preparación del sitio.	Diésel	5300 l (199 553 MJ)	3.31E-04 MJ
S2	Diésel quemado en generadores eléctricos para el sistema de potencia.	Diésel	585 m <sup>3</sup> (22 026 128 MJ)	3.65E-02 MJ
	Aditivos para el lodo.	Bentonita	326 t	5.41E-04 kg
		Barita	20 t	3.32E-05 kg
		Carbonato de sodio	25 t	4.15E-05 kg
		Sosa cáustica	0.3 t	4.98E-07 kg
	Diésel	48 m <sup>3</sup> (40 161.60 kg)	6.66E-05 kg	
S3	Tubería de revestimiento	Acero	197 486.4 kg	3.28E-04 kg
S4	Cemento y aditivos para obturaciones y cementación de tuberías.	Cemento G	93 t	1.54E-04 kg
		Bentonita	1.5 t	2.49E-06 kg
		Harina sílica	45 t	7.47E-05 kg

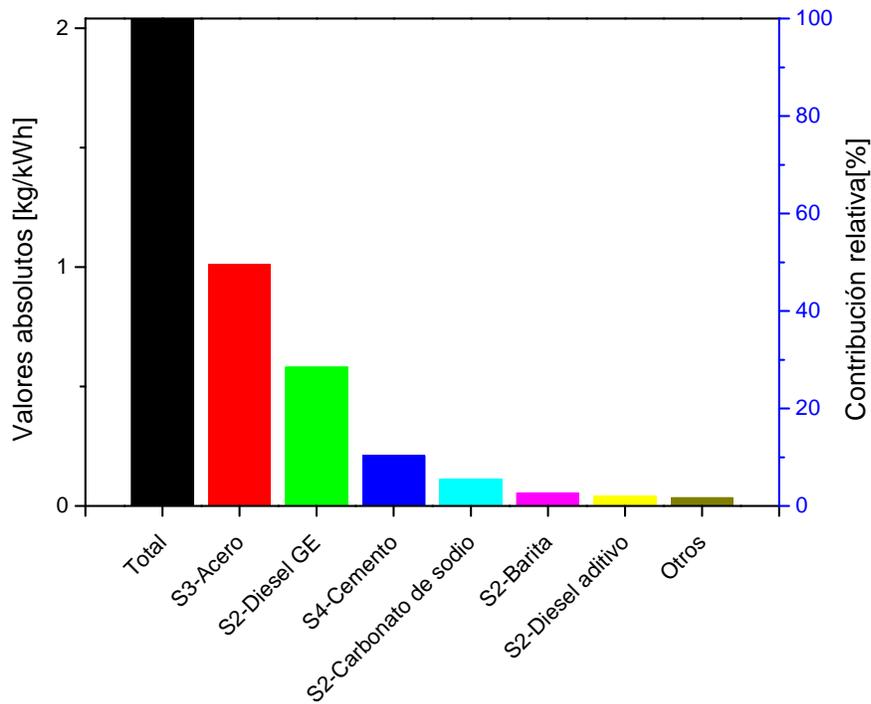
### 5.3. Evaluación de los Impactos

El uso de recursos por UF es de 2.05 kg/kWh, principalmente debido a consumo de agua, lo que representa el 99.8 % del total de los recursos necesarios. Resultando como principal afectación el agua dulce que recibe el 99.2 % (2.03 kg/kWh) de las emisiones totales (2.04 kg/kWh). Estas emisiones se deben principalmente a la producción del acero para el revestimiento que aporta al 49.5 % de las emisiones con 1.01 kg/kWh, seguido por el diésel utilizado para hacer funcionar el sistema de potencia durante la perforación con el 28.4 % (0.581 kg/kWh) y el cemento que aporta al 10.3 % de las emisiones con 0.211 kg/kWh. De manera similar, el uso de recursos viene dado en su mayoría por los mismos tres procesos: la producción del acero para el revestimiento (49.4 %), el diésel necesario para generar electricidad durante la perforación (28.5 %) y el cemento durante la cementación (10.3 %); 1.01, 0.583 y 0.211 kg/kWh respectivamente. Tanto en el uso de recursos como en emisiones, los procesos restantes figuran cada uno con menos del 1 % de flujos; exceptuando el carbonato de sodio (ceniza de soda), la barita y el diésel utilizado como aditivo en el lodo de perforación alcanzando el 5.41 %, 2.62 % y 2.08 % en consumo de recursos respectivamente; el porcentaje de contribución a las emisiones de estos tres procesos son 5.42 %, 2.63 % y 2.07 % respectivamente. Ver fig. 5.3.

El inventario de ciclo de vida (LCI) para la construcción de un pozo geotérmico de producción en Los Humeros se implementó en el software GaBi para obtener la evaluación de los potenciales impactos ambientales (LCIA) que se podrían causar, incluyendo: acidificación (AP), calentamiento global (GWP), consumo de recursos abióticos (ADP), ecotoxicidad (ETP), eutrofización (EP), toxicidad (TP), disminución de la capa de ozono (ODP) y oxidación fotoquímica (POFP). Los potenciales se evaluaron usando la base de datos EcoInvent v3.1. Los resultados totales obtenidos por categoría de impacto para producir 1 kWh a partir de una planta geotérmica con las características ya descritas en el campo geotérmico de Los Humeros se muestran en la tabla 5.2. Con respecto al aporte porcentual al Potencial de Calentamiento Global (GWP), los resultados obtenidos concuerdan con los reportados en la literatura; es decir, los aportes porcentuales de los procesos que tienen mayor impacto en el GWP son casi en su mayoría al diésel quemado en los generadores eléctricos para el funcionamiento del sistema de potencia y en menores proporciones al acero en el revesti-



(a) Uso de recursos.



(b) Emisiones.

Fig. 5.3: Consumo de recursos y emisiones por proceso. Otros engloba el diésel utilizado en la preparación del sitio (S1); la bentonita para el lodo de perforación y la sosa cáustica (S2); la bentonita de aditivo para el cemento y la harina sílica (S4).

Tabla 5.2: Resultados totales por categoría de impacto de la perforación de pozos geotérmicos de producción para producir 1 kWh de electricidad.

Categoría de Impacto	Unidad	Total (por kWh producido)
Potencial de Agotamiento de Recursos Abióticos - elementos (ADP - elementos)	kg Sb eq./kWh	3,85649E-9
Potencial de Agotamiento de Recursos Abióticos - fósil (EDP - fósil)	MJ/kWh	0,05844
Potencial de Acidificación (AP)	kg SO <sub>2</sub> eq./kWh	3,74956E-5
Potencial de Eutrofización (EP)	kg Phosphate eq./kWh	9,62831E-6
Potencial de Ecotoxicidad Acuática de Agua Dulce (FAETP inf.)	kg DCB eq./kWh	2,98026E-4
Potencial de Calentamiento Global (GWP 100 años), excl carbón biogénico	kg CO <sub>2</sub> eq./kWh	0,00421
Potencial de Toxicidad Humana (HTP inf.)	kg DCB eq./kWh	9,01936E-4
Potencial de Ecotoxicidad Acuática Marina (MAETP inf.)	kg DCB eq./kWh	0,90966
Potencial de Agotamiento de la Capa de Ozono (ODP, steady state)	kg R11 eq./kWh	6,94784E-10
Potencial de Creación de Ozono Fotoquímico (POCP)	kg Ethene eq./kWh	5,24591E-6
Potencial de Ecotoxicidad Terrestre (TETP inf.)	kg DCB eq./kWh	7,35824E-6

miento y al cemento para la fijación de las TR. Las categorías GWP, ADP fósil, TETP, AP, EP y POCP están dominadas casi en su totalidad por dos procesos: S2-diésel GE y S3-Acero. Siendo el diésel requerido en el sistema de potencia predominante con un aporte mínimo del 55.58 % hasta un máximo del 88.02 %; el acero para el revestimiento es el segundo proceso con una contribución porcentual importante, aunque mucho menor en comparación al diésel utilizado en el sistema de potencia, con valores que van del 10.79 % hasta 26.58 %. En el caso de ODP hay un comportamiento similar al anterior, aunque aquí el diésel utilizado como aditivo en el lodo se posiciona en segundo lugar desplazando al acero a la tercer posición, a pesar de que sus contribuciones porcentuales al ODP son muy similares: 6.63 % y 5.13 % respectivamente. En el caso de los potenciales de FAETP, HTP y MAETP el orden de contribución se invierte, en primer lugar está el acero con un porcentaje mínimo de 48.94 % hasta un máximo de 66.52 %, y en segundo lugar el diésel requerido para el sistema de potencia con contribuciones que van desde el 22.59 % hasta el 38.85 %. En el

ADP de elementos la mayor contribución está dada por la barita aunque el diésel quemado en los generadores eléctricos y el acero de las TR siguen teniendo aportes significativos. En general, las contribuciones del diésel utilizado en la maquinaria de construcción es mínima en comparación a otros procesos considerados, no alcanza siquiera el 1 % de contribución a las categorías de impacto, a excepción del Potencial de Toxicidad Humana, donde apenas rebasa ese porcentaje. La bentonita, la sosa cáustica y la harina sílica tienen contribuciones por lo general por debajo del 1 %.

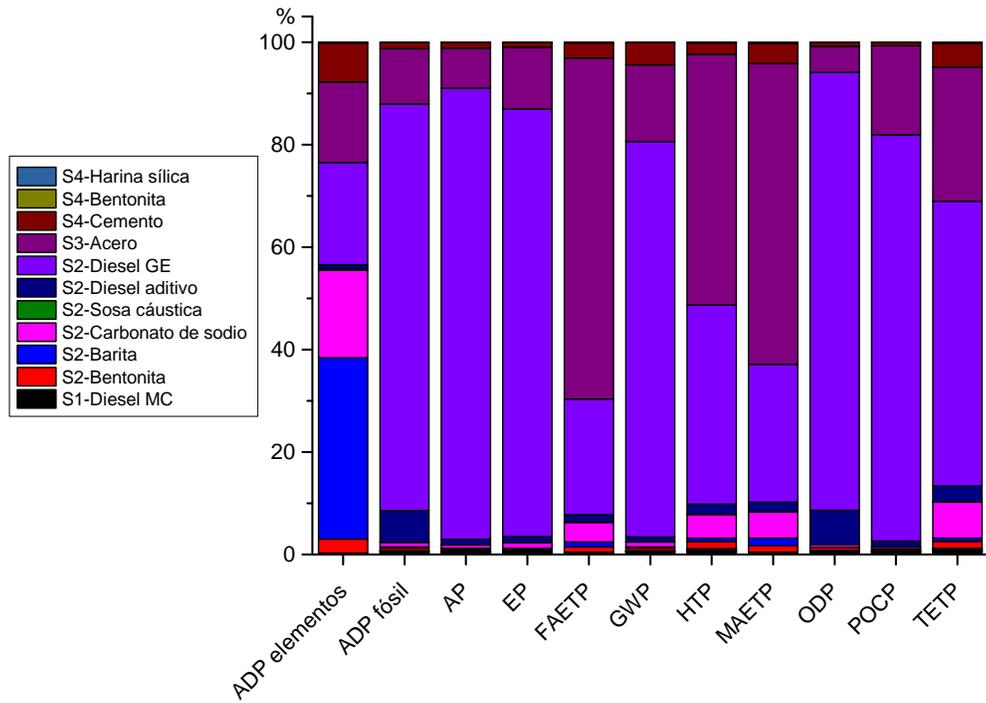
Los trabajos encontrados en la literatura enfocan generalmente sus esfuerzos en analizar el GWP por su importancia directa al cambio climático, pero como se puede ver en la gráfica 5.4, hay dos indicadores que destacan cuantitativamente antes del GWP. Estos son el Potencial de Ecotoxicidad Acuático Marino (MAETP) y el Potencial de Agotamiento de Recursos Abióticos. En los siguientes párrafos se describen a detalle cada uno de los potenciales así como las contribuciones específicas que reciben de cada proceso en la construcción de los pozos.

### **5.3.1. Calentamiento Global (GWP)**

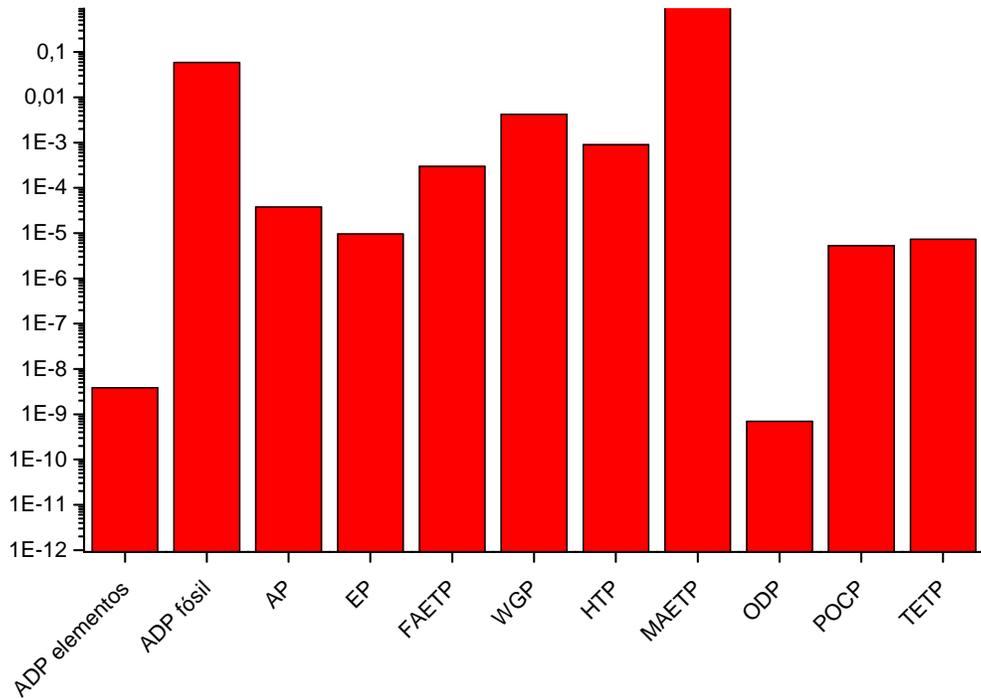
El GWP es uno de los impactos más analizados en los estudios de LCA hechos a las tecnologías geotérmicas. De la construcción del pozo geotérmico de producción resultan, excluyendo el carbón biogénico, 4.210 g de CO<sub>2</sub> eq. por kWh. Los principales contribuyentes son el diésel quemado para generar electricidad durante la perforación, el revestimiento del pozo y la cementación, cada uno de estos procesos contribuye con el 77.21 %, 14.94 % y 4.36 % de las emisiones de CO<sub>2</sub> eq/kWh respectivamente. El resto de los procesos no llegan al 1 % de contribución, ver graf. 5.5. Las emisiones de estos tres procesos son 3.25 g CO<sub>2</sub> eq/kWh por el diésel utilizado en la generación de electricidad con el sistema de potencia, 0.628 g CO<sub>2</sub> eq/kWh debidos al acero necesario en la TR y 0.183 g CO<sub>2</sub> eq/kWh emitidos por la producción del cemento para la cementación de la TR. El resto de emisiones se muestran en la tabla 5.3.

### **5.3.2. Agotamiento de Recursos Abióticos de Elementos y Fósil (ADP)**

Respecto al Potencial de Agotamiento de Recursos Abióticos (ADP), distinguimos entre elementos abióticos y recursos fósiles, El ADP de elementos total es de  $3.856 \times 10^{-6}$  g Sb eq/kWh y



(a) Porcentaje de contribución de cada proceso a las categorías de impacto.



(b) Cuantificación de las categorías de impacto.

Fig. 5.4: Impactos ambientales de ciclo de vida de la construcción de un pozo en una planta geotermoelectrica.

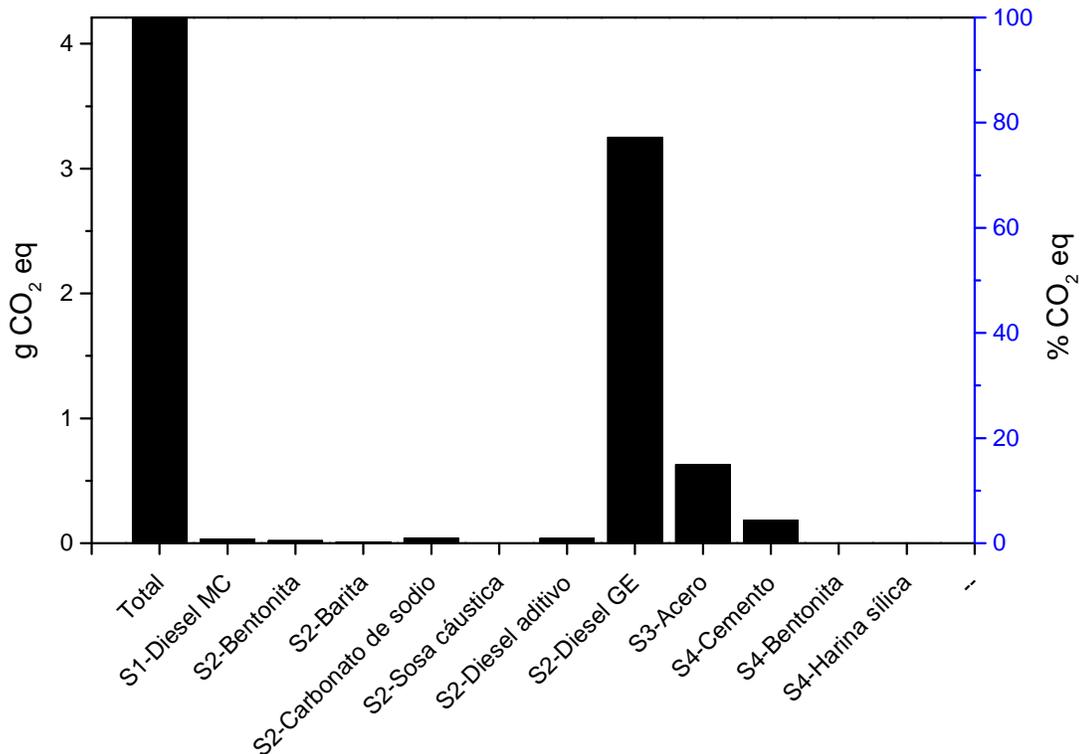


Fig. 5.5: Potencial de Calentamiento Global (GWP) para cada uno de los procesos en la construcción del pozo geotérmico de producción.

Tabla 5.3: Potencial de calentamiento global para un pozo de producción en una planta geotermo-eléctrica.

	kg CO <sub>2</sub> eq.	%
Total	0.00421	100
S1-diésel MC	3.11769E-5	0.74
S2-Bentonita	2.11232E-5	0.50
S2-Barita	1.09122E-5	0.26
S2-Carbonato de sodio	3.98418E-5	0.95
S2-Sosa cáustica	6.67929E-7	0.02
S2-diésel aditivo	3.93976E-5	0.94
S2-diésel GE	0.00325	77.21
S3-Acero	6.28771E-4	14.94
S4-Cemento	1.83692E-4	4.37
S4-Bentonita	9.71928E-8	0.002
S4-Harina sílica	3.27402E-6	0.078

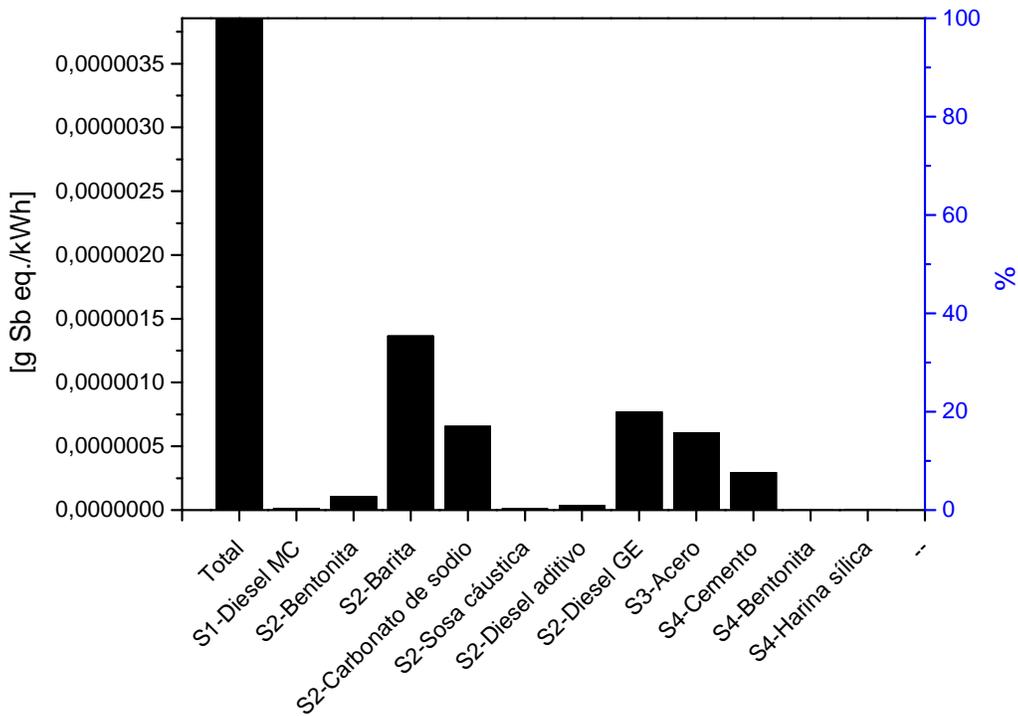
Tabla 5.4: Contribuciones por proceso al Potencial de Agotamiento Abiotico (ADP) de elementos y fósil.

	kg Sb eq.	%	MJ	%
Total	3.85649E-9	100	0.05844	100
S1-diésel MC	1.13929E-11	0.30	4.48098E-4	0.77
S2-Bentonita	1.05272E-10	2.70	2.98E-4	0.51
S2-Barita	1.36449E-9	35.38	1.26403E-4	0.22
S2-Carbonato de sodio	6.57002E-10	17.04	5.216E-4	0.89
S2-Sosa cáustica	9.31033E-12	0.24	7.34807E-6	0.01
S2-diésel aditivo	3.34401E-11	0.87	0.0036	6.16
S2-diésel GE	7.69242E-10	19.95	0.04639	79.38
S3-Acero	6.0619E-10	15.72	0.00631	10.79
S4-Cemento	2.93684E-10	7.62	7.05008E-4	1.21
S4-Bentonita	4.84381E-13	0.01	1.37117E-6	0.002
S4-Harina sílica	5.97697E-12	0.16	3.65826E-5	0.063

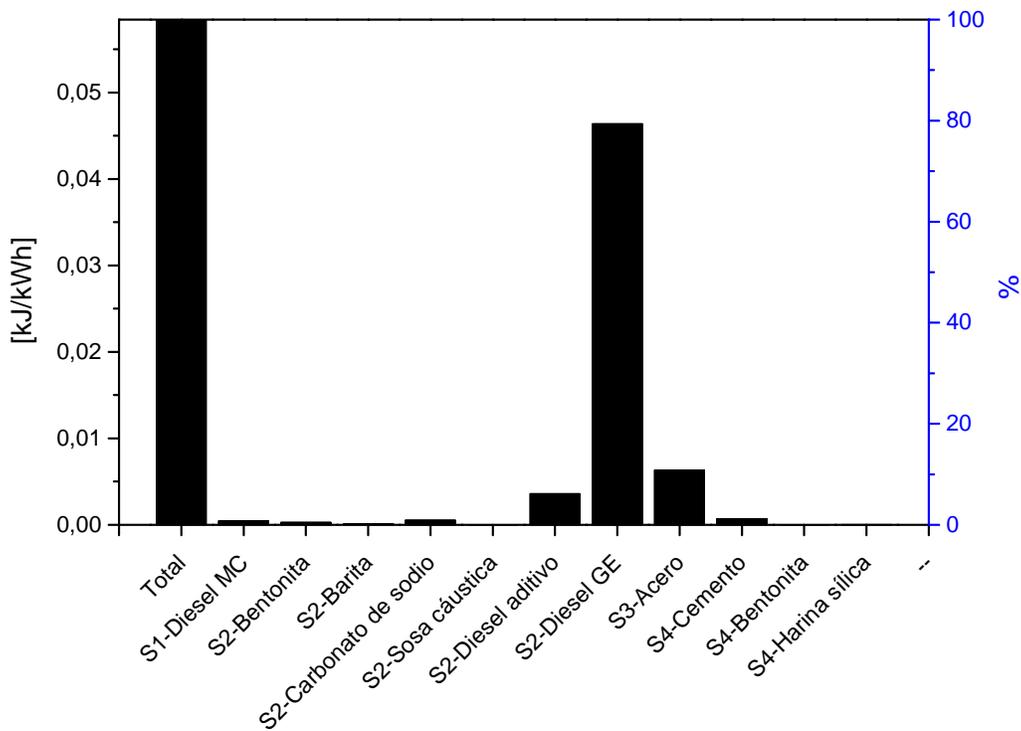
el ADP fósil de 58.44 kJ/kWh. Analizando la graf. 5.6, se observa que el ADP fósil está dominado en su mayoría por el diésel utilizado en el sistema de potencia con un 79.3 %, seguido en menor medida por el acero con el 10.79 %, el diésel utilizado como aditivo en el lodo con 6.159 % y el cemento con 1.2 %. Caso muy diferente para el ADP de elementos, donde la mayor contribución es debida al uso de la barita (35.38 %), el diésel para generar electricidad (19.94 %), el carbonato de sodio (17.03 %), el acero (15.71 %) y en menor medida la bentonita para el lodo de perforación (2.72 %). Éste potencial es el único donde el carbonato de sodio muestra una contribución porcentual tan alta. En la Tabla 5.4 se muestran los valores absolutos de ADP de elementos y fósil para cada uno de los procesos.

### 5.3.3. Potencial de Ecotoxicidad Acuática Marina (MAETP)

En la gráfica 5.7 se visualiza el aporte de cada proceso a ésta categoría de impacto. Casi el total del impacto (94.65 %) se debe a cuatro procesos, aunque es principalmente causado por el acero para el revestimiento y al diésel para generar electricidad durante la perforación y en menor medida al carbonato de sodio y al cemento; 58.64 %, 26.93 %, 5.11 % y 3.94 % respectivamente. La contribución de cada una de las etapas se presenta en la Tabla 5.5.



(a) ADP de elementos.



(b) ADP fósil.

Fig. 5.6: Potencial de Agotamiento Abiótico de elementos y fósil.

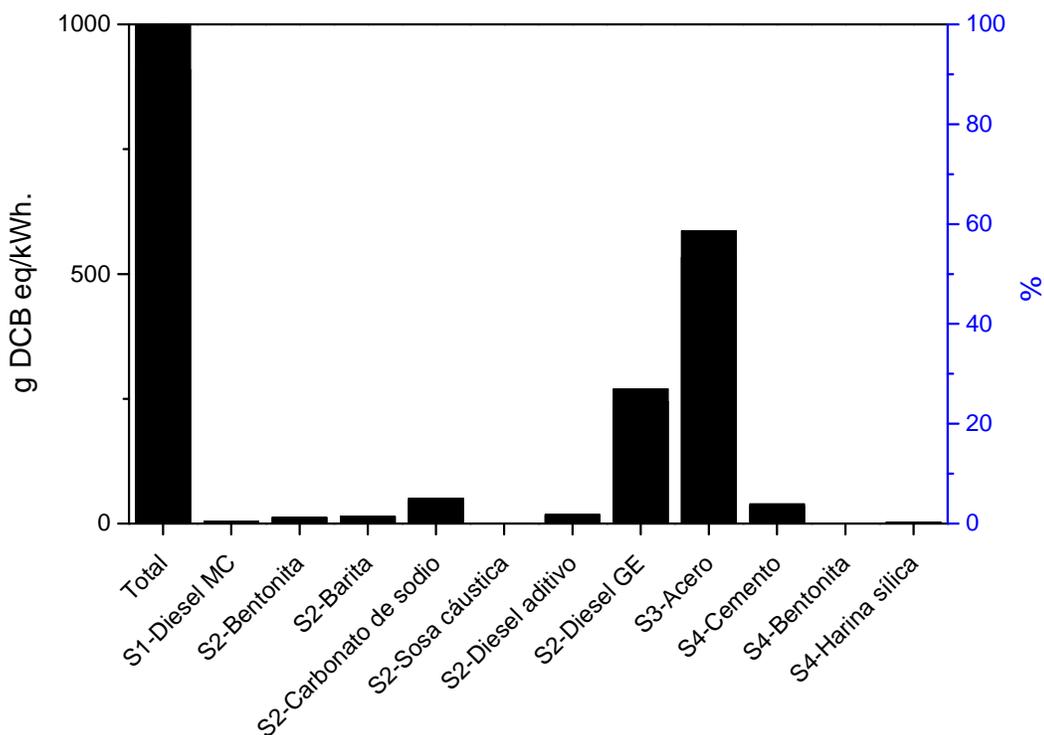


Fig. 5.7: Contribución de los procesos al Potencial de Ecotoxicidad Acuática Marina.

Tabla 5.5: Porcentajes y valores absolutos de contribución por proceso al al Potencial de Ecotoxicidad Acuática Marina (MAETP).

	kg DCB eq.	%
Total	0.90966	100
S1-diésel MC	0.00412	0.45
S2-Bentonita	0.01137	1.25
S2-Barita	0.01344	1.48
S2-Carbonato de sodio	0.04655	5.12
S2-Sosa cáustica	9.54587E-4	0.11
S2-diésel aditivo	0.01657	1.82
S2-diésel GE	0.24501	26.93
S3-Acero	0.53347	58.65
S4-Cemento	0.03592	3.95
S4-Bentonita	5.23013E-5	0.006
S4-Harina sílica	0.00221	0.24

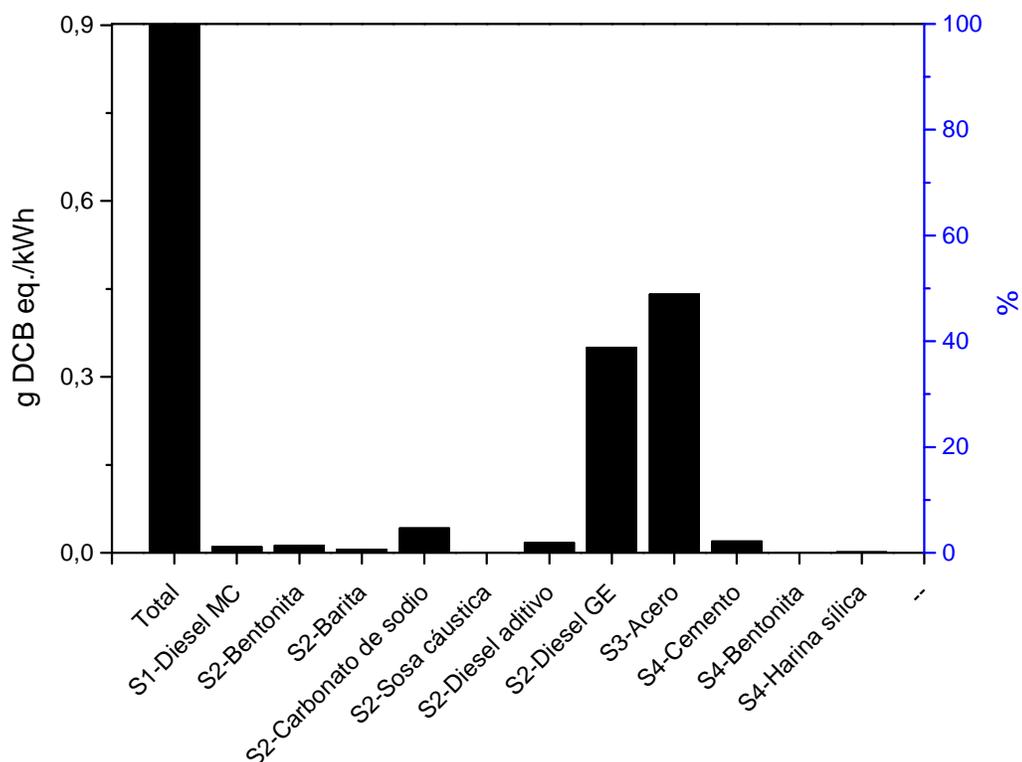


Fig. 5.8: Contribución en valores absolutos y porcentuales correspondientes al Potencial de Toxicidad Humana.

### 5.3.4. Potencial de Toxicidad Humana (HTP)

El siguiente indicador es el potencial de Toxicidad Humana (HTP). Como se puede observar en la Graf. 5.8, del potencial total ( $9.01936 \times 10^{-4}$  kg DCB eq.), el acero para el revestimiento y el diésel para la operación del sistema de potencial conforman poco menos del 90 % de contribución al HTP debidos a sus  $4.41435 \times 10^{-4}$  y  $3.50442 \times 10^{-4}$  kg DCB eq. respectivamente por kWh producido en la planta. En la tabla 5.6 se detallan cada una de las contribuciones al HTP por proceso en el sistema, notando que casi el 10 % restante de emisiones de DCB eq. se deben a tres procesos: el carbonato de sodio que aporta el 4.6 %, el cemento y el diésel aditivo con alrededor del 2 % cada uno.

Tabla 5.6: Valores absolutos y porcentajes de contribución al Potencial de Toxicidad Humano (HTP).

	kg DCB eq.	%
Total	9.01936E-4	100
S1-diésel MC	1.03262E-5	1.15
S2-Bentonita	1.24581E-5	1.38
S2-Barita	5.8233E-6	0.65
S2-Carbonato de sodio	4.21502E-5	4.67
S2-Sosa cáustica	4.46375E-7	0.05
S2-diésel aditivo	1.75399E-5	1.95
S2-diésel GE	3.50442E-4	38.86
S3-Acero	4.41435E-4	48.94
S4-Cemento	1.98192E-5	2.20
S4-Bentonita	5.73226E-8	0.006
S4-Harina sílica	1.43833E-6	0.16

### 5.3.5. Potencial de Ecotoxicidad Acuática de Agua Dulce (FAETP))

El Potencial de Ecotoxicidad Acuática de Agua Dulce (FAETP) generado durante la construcción de los pozos geotérmicos de producción es  $2.98026 \times 10^{-4}$  kg DCB eq./kWh, de los cuales casi el 90 % de ésta categoría de impacto es producido tan sólo por dos procesos, ver graf. 5.9, pero a diferencia de la mayoría de los indicadores, donde el diésel para generar electricidad es el proceso dominante, éste queda en segundo lugar aportando con el 22.58 % al FAETP; siendo el proceso con mayor contribución el acero aportando el 66.52 %. El restante 10 % es causado por el carbonato de sodio con casi el 4 %, el cemento con el 3 %, la bentonita para el lodo y el diésel aditivo con poco mas del 1 % cada uno. El resto de los procesos considerados tienen aportaciones por debajo del 1 % del total del FAETP. Los valores absolutos correspondientes a cada uno de los porcentajes citados se muestran en la tabla 5.7.

### 5.3.6. Potencial de Ecotoxicidad Terrestre (TETP)

El Potencial de Ecotoxicidad Terrestre (TETP) es  $7,35824 \times 10^{-6}$  kg DCB eq./kWh. De la gráfica 5.10 podemos observar que esta categoría está dominado en su mayoría por dos procesos. Más de la mitad (55.58 %) del total de éste impacto es generado por el diésel quemado en los generadores

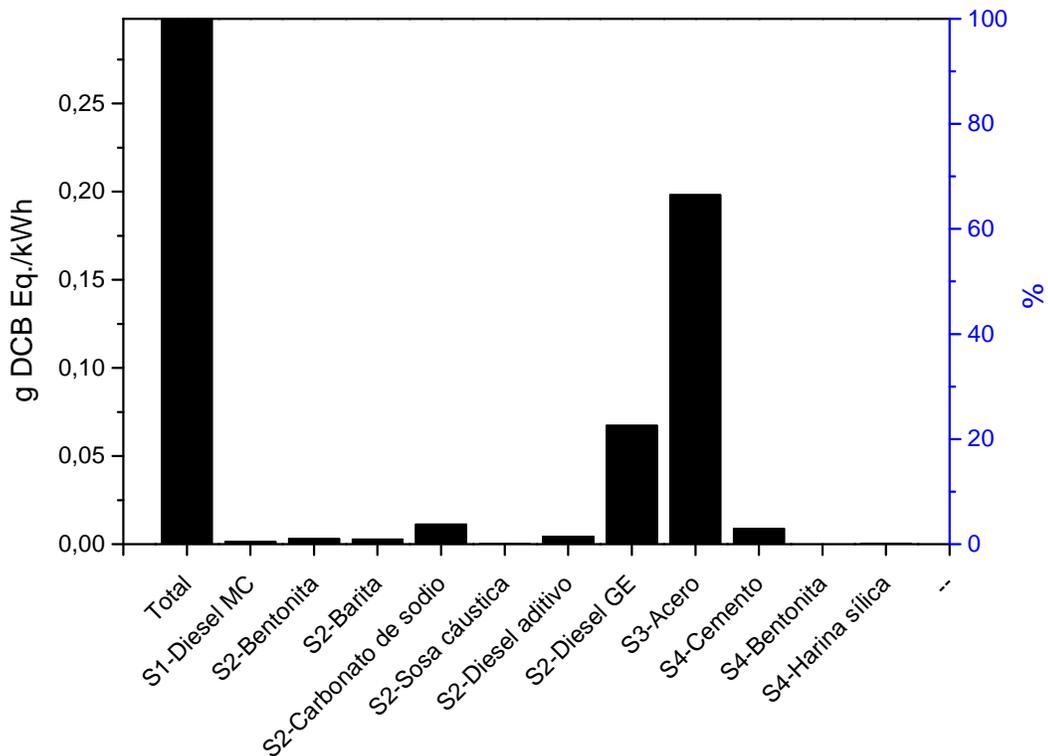


Fig. 5.9: Resultados del análisis de contribución estimados para el Potencial de Ecotoxicidad Acuático de Agua Dulce.

eléctricos para abastecer de potencia a la maquinaria de perforación. Una cuarta parte (26.17 %) se debe al acero de las TR. El carbonato de sodio queda en tercer lugar de aportación aunque en menor medida que los anteriores, alcanzando apenas el 7 % de la contribución al TETP. En la tabla 5.8 se muestran los valores absolutos que corresponden a cada uno de los porcentajes citados, además de los aportes de los procesos restantes.

### 5.3.7. Potencial de Acidificación (AP)

El total de contribución al Potencial de Acidificación estimado es de  $3.74956 \times 10^{-5}$  kg SO<sub>2</sub> eq. por cada kWh<sub>e</sub> producido en la planta. En la graf. 5.11 se observa claramente que el aporte a esta categoría de impacto es completamente dominado por el diésel necesario para poner en marcha el sistema de generación de electricidad contribuyendo al 88 % del total con  $3.3003 \times 10^{-5}$  kg SO<sub>2</sub> eq/kWh. El acero repercute con un poco menos del 8 % ( $2.94485 \times 10^{-6}$  kg SO<sub>2</sub> eq/kWh). El res-

Tabla 5.7: Resultados al FEATP por cada uno de los procesos considerados.

	kg DCB eq	%
Total	2.98026E-4	100
S1-diésel MC	1.43021E-6	0.48
S2-Bentonita	3.02847E-6	1.02
S2-Barita	2.81428E-6	0.94
S2-Carbonato de sodio	1.14001E-5	3.83
S2-Sosa cáustica	2.0499E-7	0.07
S2-diésel aditivo	4.29269E-6	1.44
S2-diésel GE	6.7312E-5	22.59
S3-Acero	1.98252E-4	66.52
S4-Cemento	8.8076E-6	2.96
S4-Bentonita	1.39347E-8	0.005
S4-Harina sílica	4.693E-7	0.16

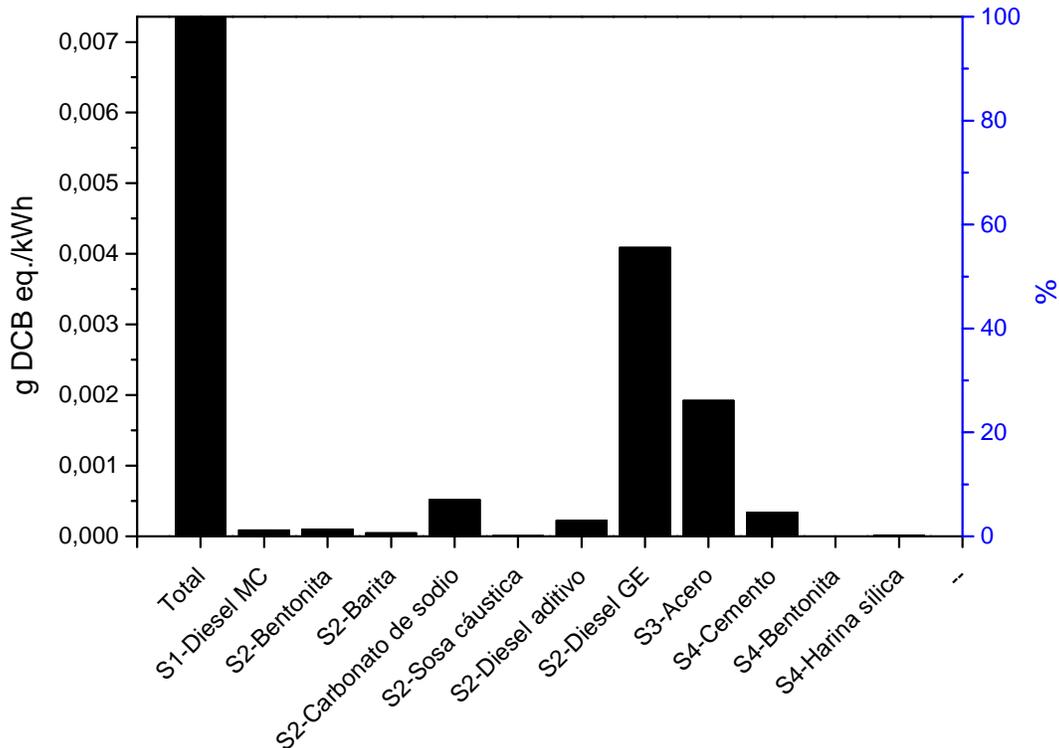


Fig. 5.10: Potencial de Ecotoxicidad Terrestre de la construcción de un pozo de producción geotérmico para producir electricidad.

Tabla 5.8: Valores de contribución al Potencial de Ecotoxicidad Terrestre (TETP) por proceso.

	kg DCB eq.	%
Total	7.35824E-6	100
S1-diésel MC	8.81346E-8	1.12
S2-Bentonita	9.92836E-8	1.35
S2-Barita	4.85459E-8	0.66
S2-Carbonato de sodio	5.17571E-7	7.03
S2-Sosa cáustica	6.98852E-9	0.10
S2-diésel aditivo	2.23769E-7	3.04
S2-diésel GE	4.09002E-6	55.58
S3-Acero	1.92593E-6	26.17
S4-Cemento	3.42095E-7	4.65
S4-Bentonita	4.56826E-10	0.006
S4-Harina sílica	1.54524E-8	0.21

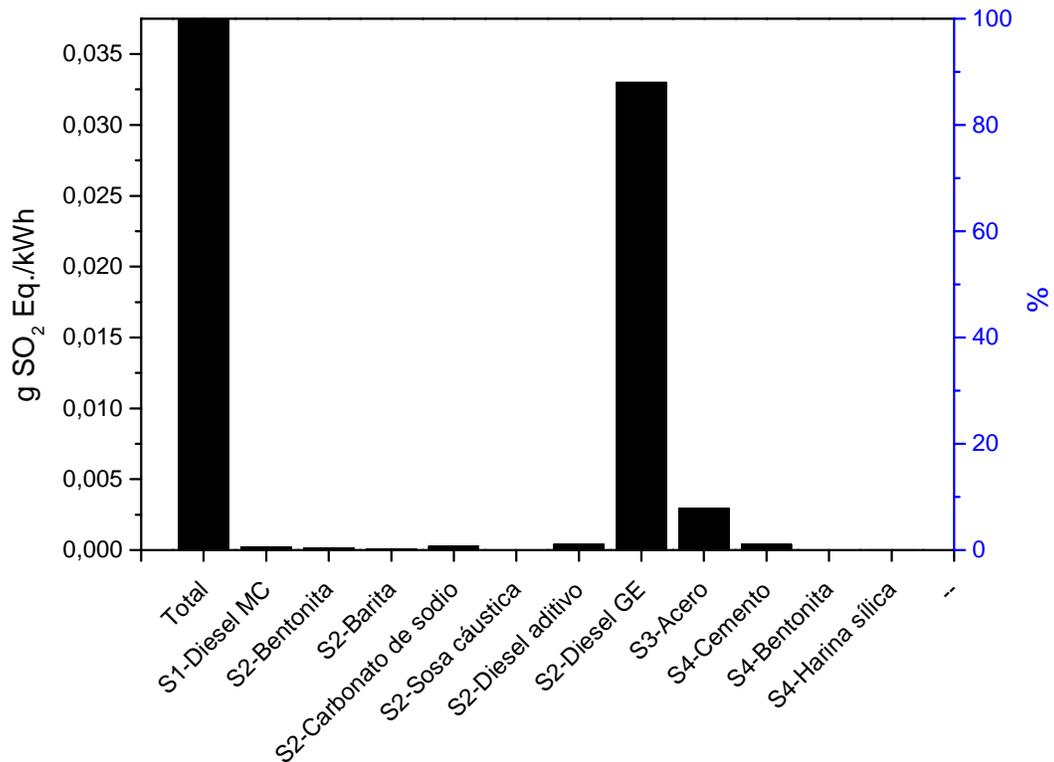


Fig. 5.11: Totales de contribución al Potencial de Acidificación (AP).

Tabla 5.9: Resultados del análisis de contribución del Potencial de Acidificación.

	kg SO <sub>2</sub> eq	%
Total	3.74956E-5	100
S1-diésel MC	2.35506E-7	0.63
S2-Bentonita	1.26974E-7	0.34
S2-Barita	8.28638E-8	0.22
S2-Carbonato de sodio	2.61774E-7	0.70
S2-Sosa cáustica	4.75326E-9	0.01
S2-diésel aditivo	3.97996E-7	1.06
S2-diésel GE	3.3003E-5	88.02
S3-Acero	2.94485E-6	7.85
S4-Cemento	4.13434E-7	1.10
S4-Bentonita	5.84234E-10	0.002
S4-Harina sílica	2.3853E-8	0.064

tante 4 % se deben al diésel utilizado como aditivo en el lodo de perforación, al cemento necesario en la fijación de la TR, los cuales contribuyen apenas con el 1 % al potencial respectivamente y al resto de los seis procesos que no llegan siquiera al 1 % cada uno de ellos. En la tabla 5.9 se enlistan los valores totales correspondientes al potencial de acidificación de cada proceso por kWh de electricidad que se produce así como su contribución relativa al total del AP.

### 5.3.8. Potencial de Eutrofización (EP)

El potencial de eutrofización (EP) estimado en este estudio es de  $9.62831 \times 10^{-6}$  kilogramos de PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> eq/kWh. Como se puede observar en la Graf. 5.12, el mayor aporte es proporcionado por los procesos S2-diésel GE y S3-Acero, conjuntando el 95 % del EP, aunque destaca significativamente la contribución del diésel para la generación de electricidad con el sistema de potencia, de este proceso se emiten  $8.03924 \times 10^{-6}$  kg Fosfato eq./kWh con lo que aporta el 83.5 % del total. El acero por su parte emite el 7.85 % del fosfato equivalente, es decir,  $2.94485 \times 10^{-6}$  kg Fosfato eq./kWh. El resto de los procesos contribuyen individualmente muy por debajo del 1 %, exceptuando el diésel aditivo y el cemento que apenas alcanzan este porcentaje. En la tabla 5.10 se muestran las contribuciones de los valores estimados para el potencial de eutrofización.

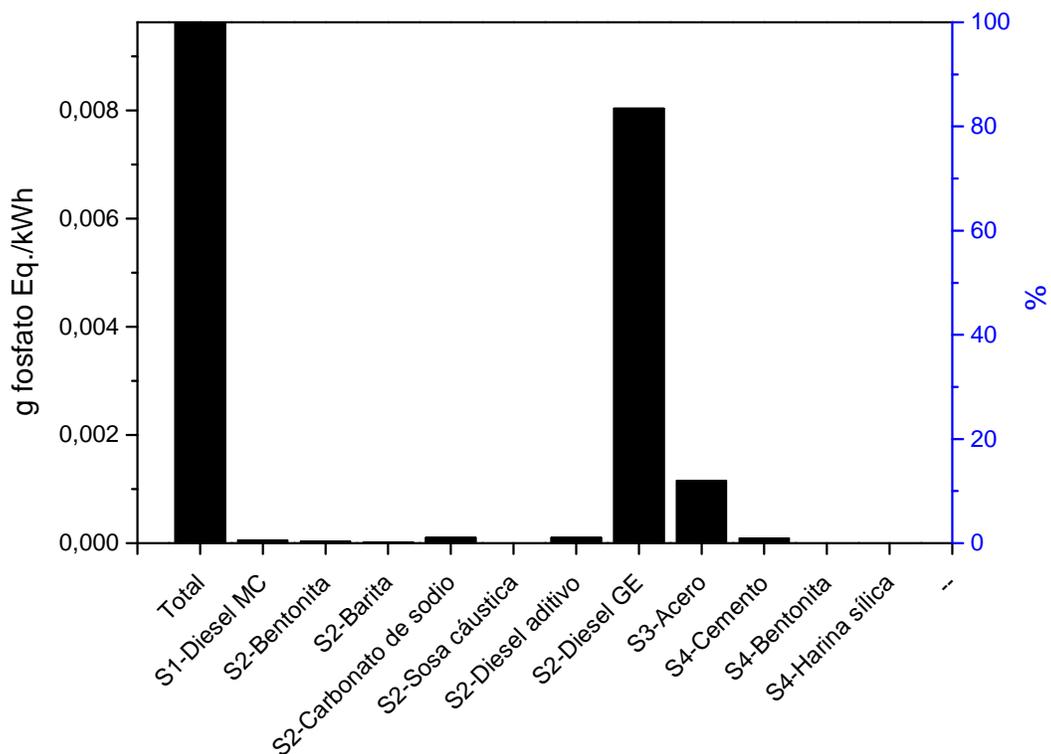


Fig. 5.12: Resultados del análisis de contribución correspondiente al Potencial de Eutrofización.

Tabla 5.10: Valores absolutos del Potencial de Eutrofización (EP) para cada uno de los procesos en la construcción de un pozo geotérmico de producción.

	kg fosfato eq.	%
Total	9.62831E-6	100
S1-diésel MC	6.07264E-8	0.63
S2-Bentonita	3.50185E-8	0.36
S2-Barita	2.11346E-8	0.22
S2-Carbonato de sodio	1.08072E-7	1.12
S2-Sosa cáustica	1.28279E-9	0.01
S2-diésel aditivo	1.0723E-7	1.11
S2-diésel GE	8.03924E-6	83.50
S3-Acero	1.15707E-6	12.02
S4-Cemento	9.38751E-8	0.98
S4-Bentonita	1.61128E-10	0.002
S4-Harina sílica	4.50215E-9	0.05

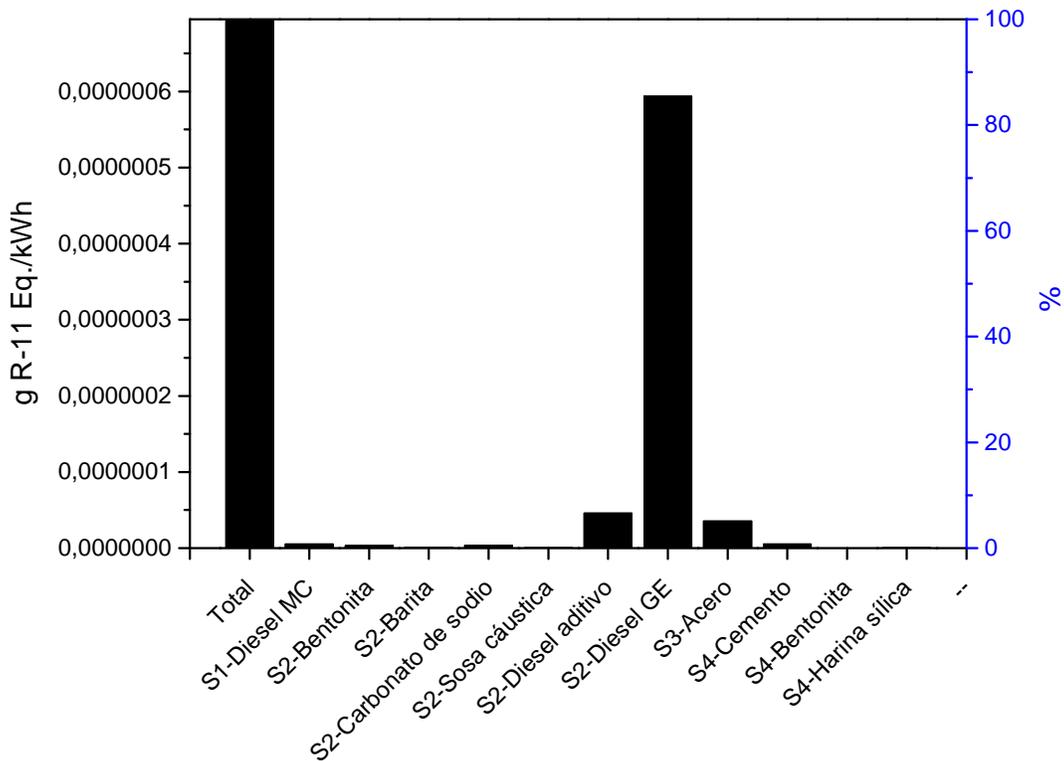


Fig. 5.13: Análisis de contribución del Potencial de Agotamiento de la Capa de Ozono.

### 5.3.9. Potencial de Agotamiento de la Capa de Ozono (ODP)

Durante el ciclo de vida de la construcción de los pozos geotérmicos de producción para generar electricidad se estima un potencial de agotamiento de la capa de ozono de  $6.94784 \times 10^{-10}$  kg R-11 eq./kWh. Analizando la Graf. 5.13 se observa que casi la totalidad del ODP es generado por el diésel para el funcionamiento del sistema de potencia el cual aporta con el 85.41 % del valor estimado para esta categoría de impacto. Después destacan, aunque en menor proporción, el diésel aditivo y el acero para el revestimiento con el 6.62 % y 5.12 % respectivamente. Como se puede ver en la tabla 5.11 el resto de los procesos tienen contribuciones porcentuales no significativas.

### 5.3.10. Potencial de Creación de Ozono Fotoquímico (POCP)

En la Graf. 5.14 se aprecia la contribución de cada uno de los procesos en esta categoría de impacto y en la Tabla 5.12 su contribución a cada fase del ciclo de vida considerada. Analizando

Tabla 5.11: Valores absolutos y porcentuales de contribución al ODP por cada uno de los procesos del sistema.

	kg R-11 eq.	%
Total	6.94784E-10	100
S1-diésel MC	5.61142E-12	0.81
S2-Bentonita	3.49252E-12	0.50
S2-Barita	9.80313E-13	0.14
S2-Carbonato de sodio	3.55609E-12	0.51
S2-Sosa cáustica	3.84343E-13	0.06
S2-diésel aditivo	4.60557E-11	6.63
S2-diésel GE	5.93457E-10	85.42
S3-Acero	3.56082E-11	5.13
S4-Cemento	5.3228E-12	0.77
S4-Bentonita	1.60699E-14	0.002
S4-Harina sílica	3.0005E-13	0.04

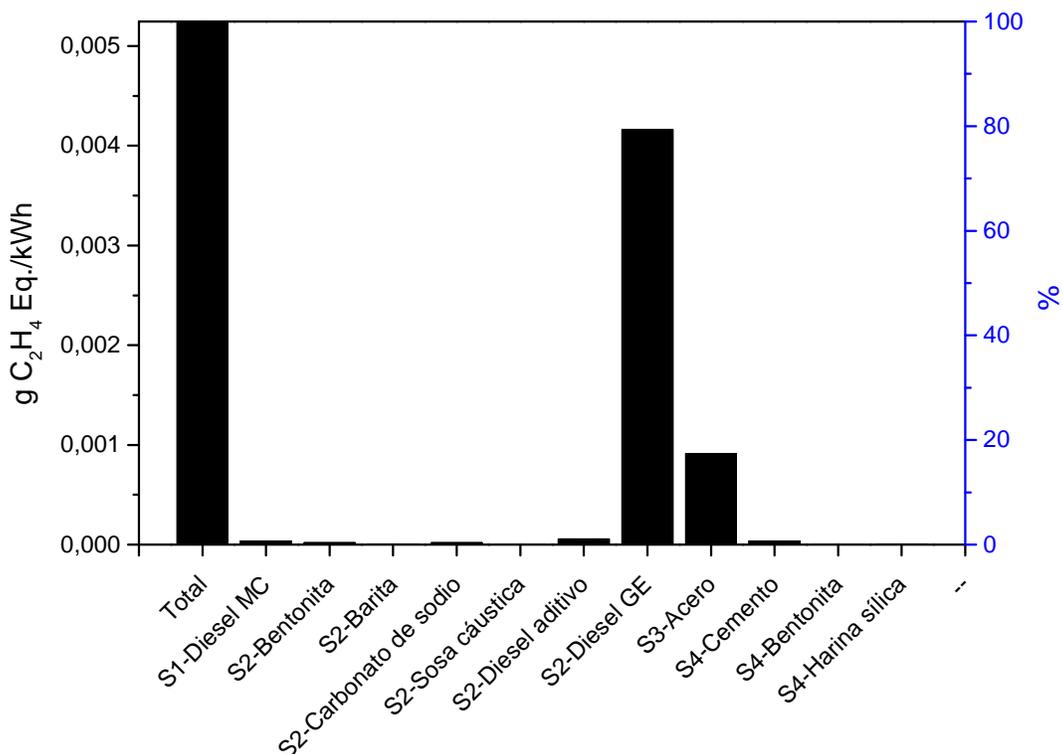


Fig. 5.14: Resultados del análisis de contribución estimados para el Potencial de Creación de Ozono Fotoquímico.

Tabla 5.12: Aportación absoluta y porcentual a la categoría de impacto POCP por cada proceso.

	kg Etileno eq.	%
Total	591E-6	100
S1-diésel MC	3.57047E-8	0.68
S2-Bentonita	1.90406E-8	0.36
S2-Barita	5.92406E-9	0.11
S2-Carbonato de sodio	1.91647E-8	0.37
S2-Sosa cáustica	3.03836E-10	0.006
S2-diésel aditivo	5.67293E-8	1.08
S2-diésel GE	4.16083E-6	79.32
S3-Acero	9.11386E-7	17.37
S4-Cemento	3.4621E-8	0.66
S4-Bentonita	8.76102E-11	0.0017
S4-Harina sílica	2.12428E-9	0.04

la información, se nota claramente que casi la totalidad del impacto generado (96.68 %) se debe a dos procesos, dominado principalmente por el diésel utilizado en el sistema de potencia con una contribución del 79.31 % sobre el total del valor estimado para esta categoría de impacto, seguido por el acero para la TR con una aportación del 17.37 % al total del valor estimado para esta categoría de impacto. El faltante 3.32 % del potencial es generado entre los nueve procesos restantes, dejando en claro que tienen una contribución porcentual despreciable, llegando el diésel aditivo apenas al 1 %.

## 5.4. Análisis de Sensibilidad y Escenarios

Hasta este momento se ha estudiado en detalle cada categoría de impacto para un modelo de ciclo de vida representativo de la construcción de pozos geotérmicos de producción utilizados para la generación de electricidad, dicho modelo se generó en base a una geometría típica del campo geotérmico Los Humeros, Puebla. Analizando las contribuciones de cada proceso se han detectado cuales de ellos tienen una aportación significativa a cada categoría de impacto, lo que permite darse a la tarea de definir 3 escenarios.

Del análisis presentado en la evaluación de impacto, se observa como la mayoría de la contribución a las categorías de impacto se debe en general a dos procesos: al diésel para la operación del

sistema de potencia y al acero para las tuberías de revestimiento. La aportación conjunta de estos dos procesos oscila entre el 84 % hasta el 97 % para todas las categorías de impacto, a excepción del ADP de elementos donde es del 35.64 % ya que éste impacto es dominado por la contribución de la barita. En función de estos resultados, se construyen tres escenarios con la finalidad de conocer como se ven afectadas en las categorías de impacto y estimar cuantitativamente las variaciones del comportamiento ambiental del sistema. En el primer escenario se varía la cantidad de acero a utilizar en las tuberías de revestimiento; en el segundo escenario se estudian los cambios que se causarían a los impactos ambientales si se consideran diferentes opciones a la generación de electricidad para el sistema de potencia, en particular para este escenario se considera sustituir el diésel con biodiésel; pensando en qué la profundidad a la que se consideró construir el pozo es un promedio y que no necesariamente los 23 pozos serán perforados a la misma profundidad, en el último escenario se verá la variación de los impactos en función de la profundidad de pozo construido para generar la misma cantidad de electricidad durante los 30 años del ciclo de vida considerado. Para cada uno de los escenarios se consideran cotas mínimas y máximas para comparar entre ellas y el caso base, ya que como se especifica en la Sec. 5.2, los valores considerados para los parámetros analizados en cada escenario corresponden a los valores promedio.

#### **5.4.1. Escenario: Variación del Espesor de la TR**

La masa de acero necesaria para las tuberías de revestimiento mostró ser uno de los dos procesos que dominaban las contribuciones a las categorías de impacto, algunas veces siendo el principal emisor como en el caso de los ETP y TP, exceptuando al TETP. Recordemos que el MAETP predomina con más del 99 % de las emisiones de DCB eq. y cuantitativamente destaca por sobre las demás categorías de impacto. En las categorías de GWP, ADP fósil, TETP, AP, EP y POCP el acero de la TR es el segundo contribuyente porcentual y en la categoría ODP y ADP de elementos se posiciona en tercer y cuarto lugar respectivamente aunque su contribución porcentual a estas dos categorías es muy parecida con respecto a los procesos que se encuentran en las posiciones por arriba.

El espesor de las TR no es parámetro que se pueda variar a libre albedrío y depende de las

condiciones geológicas de la zona así como de las condiciones termodinámicas presentes, además de ser un factor importante de seguridad al personal que labora, a la construcción misma y a la inversión hecha. Este escenario, más que proponer un cambio en las masas de acero a utilizar es un ejercicio para conocer cuales son las afectaciones medio ambientales que se podrían causar por usar diferentes cantidades de acero en las tuberías de revestimiento para la misma longitud de TR en cada etapa de perforación. Los resultados dan una visión de los posibles impactos mínimos y máximos considerando un mejor y peor escenario respecto al uso del acero.

Por lo tanto, en éste escenario se consideró variar la cantidad de acero utilizado en las tuberías de revestimiento. Para el caso base se tomó el promedio entre el espesor mínimo y máximo que se producen típicamente en la industria siguiendo las normas API. Para estimar la cota inferior de masa de acero se tomó el espesor menor de cada diámetro necesario de la TR. Para calcular la cota superior de masa de acero necesaria en la TR se realizó la misma operación pero considerando los espesores máximos para cada uno de los diámetros de tubería necesarios en el revestimiento. Los espesores, hasta el diámetro de 20 plg, se tomaron del prontuario de la empresa TenarisTamsa (2013) y del libro *Standard Handbook of Petroleum and Natural Gas Engineering* (William C. Lyons, Gary J Plisga, 2005). Para construir los pozos se requiere de instalar TR de 30 plg en el pozo de mayor diámetro perforado, la masa máxima para éste diámetro de tubería se tomo de un caso de estudio en el Golfo de Suez reportado por la empresa Schlumberger (s.f.); en el caso de la masa mínima para este diámetro de la TR se consideraron los valores reportados en memorias de congresos para dos pozos geotérmicos mexicanos (Ramírez-Montes et al., 2014; Tapia et al., 2013). En la tabla 5.13 se describen los valores máximos, mínimos y promedio de masa de acero para cada diámetro de tubería de revestimiento por longitud requerida de la misma y se suma el total necesario para la construcción del pozo.

En la tabla 5.14 se presentan los requerimientos promedio, mínimo y máximos necesarios de acero para instalar las tuberías de revestimiento, tanto para un pozo como para satisfacer la UF. En la misma tabla 5.14 se especifican los cambios en kilogramos de recursos y emisiones para cada cantidad de acero utilizado. Considerando el caso base como el 100 % de los flujos, en el caso de uso de acero mínimo los flujos de recursos y emisiones se reducen al 80 % y en el caso de la utilización de acero máximo los flujos se incrementan al 120 %.

Tabla 5.13: Cantidad de masa de acero promedio, mínima y máxima para la tubería de revestimiento.

Diámetro de la TR	Longitud (m)	Masa de la TR (kg/m)			Masa total (kg)		
		Medio	Minimo	Max	Medio	Minimo	Max
30 plg	12.0	304.1	147.4	460.9	3649.4	1768.3	5530.6
20 plg	50.0	195.7	139.9	251.5	9784.7	6994.4	12575.0
13 3/8 plg	400.0	99.0	71.4	126.5	39585.1	28572.7	50597.5
9 5/8 plg	1250.0	80.3	48.1	112.5	100358.0	60084.6	140631.4
7 plg	800.0	55.1	25.3	85.0	44109.1	20239.0	67979.3
					197486.4	117659.0	277313.8

Tabla 5.14: Requerimientos promedio, mínimo y máximos de masa de acero para el revestimiento por UF y para construir un único pozo.

		kg/pozo	kg/kWh	Recursos [kg/kWh]	Emisiones [kg/kWh]
S3-Acero	Promedio	197486.4	3.28E-04	2.04	2.04
	Mínimo	117659.0	1.95E-04	1.63	1.63
	Máximo	277313.8	4.60E-04	2.45	2.44

En cuanto al cambio en los impactos, destacan los Potenciales de Toxicidad (TP) y Ecotoxicidad (ETP). Siendo el TETP el impacto con una variación porcentual mínima de  $\pm 10.60\%$ ; la categoría que tiene la variación máxima es el FAETP con  $\pm 26.91\%$ . En el caso de MAETP y el HTP existe una variación porcentual entre el caso base y las cotas mínimas y máximas de uso de acero de  $\pm 23.74\%$  y  $\pm 19.80\%$  respectivamente. El resto de las categorías varían entre  $\pm 2.07\%$  y  $\pm 7.02\%$ . En la categoría de calentamiento global, el GWP tiene una variación porcentual de  $\pm 6.05\%$  con la utilización de acero. En la tabla 5.15 se muestran los valores en las variaciones de cada categoría de impacto para las cantidades mínimas y máximas de acero necesario para las TR junto con el porcentaje de variación entre las dos cotas con respecto al caso base.

#### 5.4.2. Escenario: Reemplazo del diésel para el Sistema de Potencia

El biodiésel es un tema bastante amplio con diferentes vertientes y se puede hacer una discusión muy extensa al respecto. Por ahora queda fuera del alcance y propósitos de este texto por lo que acotamos su estudio a proponerlo como sustituto del diésel en el sistema de potencia para la producción de electricidad durante la perforación del pozo con la finalidad de conocer las diferencias

Tabla 5.15: Variación en las categorías de impacto en función del mínimo y máximo de acero requerido para las TR en relación al caso base.

	Base	Mínimo	Máximo	Variación porcentual con el caso base [ $\pm$ %]
(ADP elementos) [kg Sb eq.]	3.84702E-9	3.60198E-9	4.09205E-9	6.37
(ADP fósil) [MJ]	0.05842	0.05587	0.06097	4.36
(AP) [kg SO <sub>2</sub> eq.]	3.74822E-5	3.62919E-5	3.86726E-5	3.18
(EP) [kg Fosfato eq.]	9.62528E-6	9.15757E-6	1.0093E-5	4.86
(FAETP inf.) [kg DCB eq.]	2.97741E-4	2.17605E-4	3.77878E-4	26.91
(GWP 100 years) [kg CO <sub>2</sub> eq.]	0.0042	0.00395	0.00446	6.05
(HTP inf.) [kg DCB eq.]	9.01296E-4	7.22861E-4	0.00108	19.80
(MAETP inf.) [kg DCB eq.]	0.9085	0.69286	1.12414	23.74
(ODP. steady state) [kg R11 eq.]	6.94612E-10	6.80219E-10	7.09006E-10	2.07
(POCP) [kg Eteno eq.]	5.2448E-6	4.8764E-6	5.61319E-6	7.02
(TETP inf.) [kg DCB eq.]	7.34721E-6	6.56872E-6	8.1257E-6	10.60

en los nuevos impactos que se generarían. Éste escenario podría ser el más importante de los tres presentados debido a las fuertes cargas que presenta el diésel quemado en los generadores eléctricos a todas las categorías de impacto. Además, es un parámetro que no está fuera de las decisiones del constructor y por otro lado, los motores diésel aceptan su suministro sin mayores o nulas modificaciones. Se esperaría que el uso del biodiésel conlleve a beneficios sociales y ambientales en comparación a los combustibles fósiles, pero este es un hecho que no podemos afirmar hasta no realizar los estudios pertinentes.

El biodiésel se obtiene a partir de aceites vegetales y en algunos casos también animales. Se utiliza como una opción para sustituir de forma total o parcial al diésel lo que ha creado mucho interés en esa área de investigación ampliando las posibilidades de estudio a diferentes tipos de biomasa para su producción; no sólo aceite de semillas y plantas acuáticas sino también desechos de comida, desperdicios municipales y desechos agrícolas (Dufour et al., 2011). En México, la SENER propone como insumo para la producción de biodiésel diferentes cultivos oleaginosos como la colza (canola), soya, jatropha, girasol y cártamo, así como sebo de animal y aceite reciclado (Masera et al., 2006). El inconveniente de usar estas semillas, aparte de los diferentes retos técnicos-tecnológicos y económicos, es necesario aumentar su área de cultivo ya que México no cubre su propia

demanda en aceites comestibles. Desde esta perspectiva, sería de interés considerar otras opciones para la producción del biodiésel.

El cardo (*Cynara Cardunculus*) tiene variadas aplicaciones (Fernández et al., 2006). En España los tallos son un vegetal comestible y a las flores se les utiliza como cuajo para hacer queso. Desde un punto de vista industrial, dos productos se pueden cosechar con propósitos energéticos: biomasa lignocelulosa y semillas para aceite. La lignocelulosa es biomasa sólida que puede ser usada directamente para calefacción o para generar electricidad. Las semillas de la cynara tiene un alto contenido en aceite por lo que puede ser usada como materia prima en la producción de biodiésel. Adicional a estos usos, puede servir de pastura para ganado, como pulpa en la producción de papel e incluso en la farmacología para la extracción de sustancias activas.

En Europa hay estudios como el realizado por Dufour et al. (2013) en el que compara la factibilidad medioambiental de la producción de biodiésel con cardo y colza (canola). Aunque ambas plantas existen en México, se hace énfasis en proponer el uso del cardo por diferentes razones. La primera es que el proceso de obtención del biodiésel con cardo muestra generar impactos ambientales menores a los de la canola, además de un mejor balance de energía entre el total de energía consumida para su producción y el retorno de contenido energético del biodiésel (Dufour et al., 2013). La segunda razón es que el cardo no tendría problemas asociados con el valor alimenticio como lo es en el caso de la canola. A diferencia de España, donde tiene un uso alimenticio, en México no es deseable la proliferación del cardo y de hecho es considerado una plaga. De acuerdo a la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, s.f.), el cardo es nativo del mediterráneo y en México se encuentra aún en proceso de naturalización, tiene una distribución esparcida en los Estados de México e Hidalgo y en la Ciudad de México con probabilidad de expandirse. Es común en los terrenos baldíos, a orillas de caminos y campos de pastoreo, se encuentra tanto en suelos arenosos como fértiles, al parecer el cardo es tóxico para los animales bajo ciertas condiciones ambientales aunque se reporta que tiene uso medicinal contra la fiebre y otras enfermedades. En general, por sus características, es deseable para la CONABIO erradicar las poblaciones existentes. En países como Argentina se declaró como plaga en la agricultura siendo su manejo y control obligatorio. En la siembra de cereal para pastoreo se hace uso de control químico.

Si se hiciera el cambio del diésel por el biodiésel para el sistema de potencia, en el sistema base

se requieren 585 m<sup>3</sup> de diésel para operarlo durante la perforación de un pozo, de acuerdo a los factores de conversión (5.1) y (5.2), el contenido energético de esa masa de diésel es de 22026128 MJ. La densidad  $\rho_{bd}$  y poder calorífico  $PC_{bd}$  del biodiésel obtenido del cardo están dados por los factores de conversión (5.1) y (5.4) (Lapuerta et al., 2005):

$$\rho_{bd} = 887 \text{ kg/m}^3 \quad (5.3)$$

$$PC_{bd} = 37.20 \text{ MJ/kg} \quad (5.4)$$

Considerando el contenido energético de esa cantidad de diésel y el poder calorífico del biodiésel, ec. (5.4), sería necesaria una masa de biodiésel de cardo de:

$$\text{S2-Biodiesel GE} = 592100.22 \text{ kg}$$

Para éste escenario no se tuvo acceso a la evaluación de los impactos para la producción de biodiésel en la base de datos de GaBi, por lo que se considero calcularlo y adaptarla al modelo. Hasta donde un servidor está enterado, en este momento no se han hecho estudios de ACV a la producción de biodiésel en México aunque si hay trabajos en proceso que realizan esta ardua tarea, como la tesis de posgrado que desarrolla el Ing. Oscar Sanchez Santillan del Instituto de Energías Renovables de la UNAM, dónde analiza los impactos generados por la producción de biodiésel con Jatrofa en México. Desafortunadamente, tampoco se tiene acceso a la información necesaria para realizar el análisis de los impactos.

El inventario recopilado por Dufour et al. (2013) para la producción de biodiésel a base de cardo (*Cynara Cardunculus*) incluye los insumos para el cultivo, transporte del cardo, separación mecánica de la semilla, extracción del aceite, transesterificación con metanol y distribución del biodiésel. En la tabla 5.16 se muestran los flujos de materia y energía para cada una de las etapas en la producción de una tonelada de biodiésel. Los impactos calculados por Dufour et al. (2013) son para las condiciones de España y no se pueden tomar directamente por lo que se pensó en hacer una adaptación del proceso de producción para estimar los impactos a las condiciones de México, para ello se pretendía usar la base de datos de los procesos globales de EcoInvent 3.1 en GaBi y adaptarlo al modelo con el que se obtuvieron los resultados que hasta el momento se han

Tabla 5.16: Insumos de materia y energía para producir una tonelada de biodiésel con cardo (*Cynara Cardunculus*).

Proceso	Flujo	Cantidad por tonelada
Cultivo	Fertilizante	0.433 t
	Pesticida	0.003 kg
	Diésel	0.065 t
Transportación de la biomasa	Diésel	0.062 t
Separación mecánica	Electricidad	0.48 GJ
Extracción del aceite	Electricidad	1.28 GJ
Transesterificación	Metanol	0.156 t
	Hidróxido de potasio	0.0052 t
	Ácido sulfúrico	0.0056 t
	Vapor	0.342 t
	Electricidad	0.18 GJ
Distribución	Diésel	0.002 t

analizado aquí. Con ésta adaptación se sustituiría el diésel quemado en generadores eléctricos para el sistema de potencia (S2-Diésel GE) por biodiésel (S2-Biodiésel GE) y se calcularían las nuevas cargas ambientales generadas a cada categoría de impacto para compararlas con el sistema base.

El principal factor que impidió hacer esta adaptación fue que el fertilizante utilizado por Dufour et al. (2013) en su análisis para el cultivo del cardo es multinutriente a base de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). Las tasas de fertilizante deben ser aplicadas de acuerdo a las características específicas del suelo y éstas se determinan por muestreo. Dufour et al. (2013) sigue las recomendaciones de Fernández et al. (2006) para cultivos en suelos de baja fertilidad usando abono multicomponente en una proporción de 9:18:27 NPK. A pesar de que en algunos ejemplos de fertilizantes multinutrientes con dos macronutrientes (NP y NK) se incluyen en la base de datos de ecoinvent, no se inventarían los fertilizantes NPK por la variedad de formas en que se pueden mezclar el nitrógeno, fósforo y potasio para crear diferentes productos multinutrientes. Sin embargo, la evaluación de los impactos de tales fertilizantes multinutrientes se pueden aproximar combinando los inventarios de la base de datos de ecoinvent. Para ello es necesario conocer el contenido de los nutrientes NPK y la forma del nutriente (por ejemplo amoníaco, nitrato, o urea para nitrógeno) (Nemecek y Kagi, 2007). Éste factor fue determinante para no poder realizar la evaluación de los impactos para la producción de biodiésel, ya que de la información proporcionada por Dufour et

al. (2013) no fue posible reproducir sus resultados. Por otra parte, aun cuando se hubiera podido replicar sus resultados, al ser el cardo una planta silvestre en México, de nulo valor alimenticio y considerada una plaga, podría incluso no hacerse el uso de fertilizantes y pesticidas. Pero si fuera necesario, se preferiría la aplicación de fertilizantes orgánicos. La Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA, 2015), fomenta nueve proveedores de fertilizantes orgánicos y sólo uno inorgánico en su página web. Son muchas las consideraciones que se deben tomar y la información requerida no está disponible. Por ejemplo, independientemente de si se usará fertilizante mineral u orgánico, es necesario hacer estudios del suelo que den las proporciones adecuadas de los nutrientes que necesita, y aun cuando el uso de fertilizantes ha ayudado a incrementar la productividad en las cosechas, su aplicación intensiva puede causar numerosos problemas medioambientales, como por ejemplo (Nemecek y Kagi, 2007): eutrofización a través de filtraciones de nitrógeno y fósforo al agua; acidificación por pérdidas de amoníaco de los fertilizantes de nitrógeno; contaminación de agua potable por nitratos; incremento del efecto invernadero por emisiones de  $N_2O$  durante la desnitrificación de los fertilizantes nitrosos; uso de energía durante la producción y transporte del fertilizante.

Como nos podremos ya haber dado cuenta, sustituir el diésel por biodiésel en el sistema de potencia para generar la energía eléctrica requerida durante las operaciones de perforación suena atractivo pero es necesario llevar a cabo una serie de estudios para generar una evaluación acertada del cambio que habría en los impactos.

### **5.4.3. Escenario: Variación de la Profundidad de Pozo Construido**

Al momento de construir un pozo, la zona de producción puede estar a diferentes profundidades. En éste escenario se consideró para el caso base una profundidad de 2200 m. al ser ésta la profundidad promedio de los pozos perforados en Los Humeros, Puebla (L. Gutiérrez-Negrín, 2015). Para la cota inferior, en el texto de L. C. Gutiérrez-Negrín y Izquierdo-Montalvo (2010) se propone que el reservorio somero se podría encontrar a una profundidad aproximada de 1400 m., por lo tanto, el caso de menor profundidad se tomó a dicha distancia. En el caso de la cota superior, en el mismo texto de L. C. Gutiérrez-Negrín y Izquierdo-Montalvo (2010) se reporta la profundidad

máxima propuesta para el reservorio más profundo como 2800 m., se considera dicho valor para este escenario como el peor caso. En la tabla 5.17 se muestra como cambia el Inventario de Ciclo de Vida para cada una de las profundidades consideradas.

Tabla 5.17: Inventario de Ciclo de Vida para los tres escenarios de profundidades promedio, mínima y máxima. El caso base se considera a una profundidad de 2200m, el mínimo a 1400 m y el máximo a 2800 m de profundidad.

Proceso	Cantidades por pozo			Por kWh durante 30 años para 23 pozos		
	Caso Base	Mínimo	Máximo	Caso Base	Mínimo	Máximo
S1-diésel MC [MJ]	199553	126988.24	253976.48	3.31E-4	2.11E-4	4.21E-4
S2-Bentonita [kg]	326000	207454.55	414909.10	5.41E-4	3.44E-4	6.88E-4
S2-Barita [kg]	20000	12727.27	25454.55	3.32E-5	2.11E-5	4.22E-5
S2-Carbonato de sodio [kg]	25000	15909.09	31818.18	4.15E-5	2.64E-5	5.28E-5
S2-Sosa cáustica [kg]	300	190.91	381.81818	4.98E-7	3.17E-7	6.33E-7
S2-diésel aditivo [kg]	40161.60	25557.38	51114.77	6.66E-5	4.24E-5	8.48E-5
S2-diésel GE [MJ]	22026128	1.40166E7	2.80333E7	0.03654	0.02325	0.04651
S3-Acero [kg]	197486.4	125673.14	251346.23	3.28E-4	2.09E-4	4.17E-4
S4-Cemento [kg]	93000	59181.82	118363.64	1.54E-4	9.82E-5	1.96E-4
S4-Bentonita [kg]	1500	954.55	1909.10	2.49E-6	1.58E-6	3.17E-6
S4-Harina sílica [kg]	45000	28636.36	57272.73	7.47-5	4.75E-5	9.50E-5

Tabla 5.18: Resultados del análisis de sensibilidad correspondiente a la variación en la profundidad del pozo.

	Base	Minimo	Maximo
(ADP elementos) [kg Sb eq.]	3.85E-09	2.45E-09	4.90E-09
(ADP fósil) [MJ]	0.058418059	0.037175129	0.074350257
(AP) [kg SO <sub>2</sub> eq.]	3.75E-05	2.39E-05	4.77E-05
(EP) [kg Fosfato eq.]	9.63E-06	6.13E-06	1.23E-05
(FAETP inf.) [kg DCB eq.]	0.000297741	0.000189472	0.000378944
(GWP 100 years), excl carbon biogénico [kg CO <sub>2</sub> eq.]	0.004202544	0.002674346	0.005348692
(HTP inf.) [kg DCB eq.]	0.000901296	0.000573552	0.001147104
(MAETP inf.) [kg DCB eq.]	0.908498629	0.578135491	1.156270982
(ODP, steady state) [kg R11 eq.]	6.95E-10	4.42E-10	8.84E-10
(POCP) [kg Etileno eq.]	5.24E-06	3.34E-06	6.68E-06
(TETP inf.) [kg DCB eq.]	7.35E-06	4.68E-06	9.35E-06

Al cambiar la profundidad de pozo construido cambian los flujos de recursos y emisiones para cada caso. Los flujos de entrada son 1.3 y 2.6 kg/kWh para el caso de menor y mayor profundidad respectivamente. Los flujos de emisiones por kWh son 1.3 kg para el pozo de 1400 m de profundidad y 2.59 kg para el de 2800 m. Esto implica, con respecto al caso base (2200 m de profundidad), una disminución del 36.4 % en los flujos para el pozo de menor profundidad y un aumento del 27 % en el caso de la construcción del pozo de mayor profundidad. Del mismo modo, los cambios porcentuales en cada categoría de impacto se reducen al 63.6 % en la perforación del pozo de menor profundidad y se incrementan al 127.3 % si se perfora a la profundidad máxima de 2800 m. En la tabla 5.18 se muestran los cambios cuantitativos en los valores absolutos de cada categoría de impacto respecto al caso base.

Parece natural que todas las categorías de impacto se disminuyan o aumenten, según sea el caso, en la misma proporción respecto al caso base. Esto porque la metodología de ACV es lineal y cada entrada de materia y energía se disminuye, o aumenta, en la misma proporción para éste escenario.

## Capítulo 6

### Conclusiones y Trabajo a Futuro

México es potencia en el aprovechamiento de la EG y cuenta con un amplia experiencia de más de cuarenta años principalmente en la generación de geoelectricidad. Se espera que bajo el contexto de las nuevas legislaciones referentes a las ER se aproveche el gran potencial del país en materia de recursos geotérmicos con un inminente aumento de la ya considerable capacidad geotermoeléctrica instalada. Este hecho requiere de una evaluación medioambiental de las tecnologías geotérmicas del país, tanto las ya instaladas como las futuras para apearse a los marcos normativos ambientales vigentes.

El estudios LCA realizado en esta tesis es de relevancia ya que al evaluar los posibles impactos ambientales asociados al proceso típico de construcción de pozos geotérmicos utilizados para la producción de geoelectricidad en México se contribuye al conocimiento de las interacciones entre la construcción de los pozos geotérmicos con el medio ambiente.

Los resultados obtenidos son una buena estimación cuantitativa de los aportes de cada proceso considerado durante la construcción de los pozos a cada una de las categorías de impacto. Dichos resultados ayudan a detectar también aquellas actividades que podrían tener un mayor aporte y a las cuales se les debería buscar una mejora o cambio para minimizar los posibles IA que puedan causar. En este contexto, se detectó al diésel quemado en el sistema de potencia para producir electricidad (S2 - Diésel GE) como el proceso con mayor aporte a la mayoría de las categorías de impacto con un aporte porcentual desde 55.58 % hasta 88.02 %.

Se propone realizar un análisis de factibilidad para sustituir el diésel quemado en el sistema de potencia por biodiésel. Existen diferentes posibilidades para la producción del biodiésel, de las cuales se propone el uso del cardo ya que tiene la ventaja de ser considerado por la CONABIO como plaga en México. Sin embargo, no es posible establecer el impacto en las categorías de impacto debido a que este análisis no se llevo a cabo por la falta de información.

El segundo proceso con un aporte porcentual significativo a las categorías de impacto es el revestimiento, esto debido al uso de acero. Los aportes porcentuales van del 10.79 % al 26.58 % dependiendo de la categoría de impacto. El espesor de las TR es más una cuestión técnica tanto de seguridad para las personas y las instalaciones mismas como para tener un proyecto ambiental y económicamente exitoso. En relación al caso base, el cambio del espesor de la TR causa una variación porcentual a las categorías de impacto que pueden ir de  $\pm 2.07\%$  a  $\pm 26.91\%$ . Las categorías de impacto con mayor sensibilidad a las variaciones del espesor de la TR son el Potencial de Toxicidad Humano ( $\pm 19.80\%$ ) y los Potenciales de Ecotoxicidad Terrestre, Acuático Marino y Acuático de Agua Dulce ( $\pm 10.60\%$ ,  $\pm 23.74\%$ ,  $\pm 26.91\%$  respectivamente). El resto de potenciales presentan una variación porcentual por debajo del 10 %.

Otro factor importante de carácter técnico es la profundidad de perforación de los pozos. En el caso base se considera una profundidad promedio de 2.2 km, una mínima de 1.4 km y la máxima de 2.8 km. En el caso de la profundidad mínima, los valores de las categorías de impacto se reducen en un 36.4 % en relación al caso base y para la profundidad máxima aumentan en un 27.3 %.

# Bibliografía

- Acero, A. P., Rodríguez, C., y Cirotto, A. (2015). *LCIA methods: Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories* (Inf. Téc.). Descargado de <http://www.openlca.org/documents/14826/c548f249-4f66-46a7-93a2-b915b0e0eec6>
- Amponsah, N. Y., Troldborg, M., Kington, B., Aalders, I., y Hough, R. L. (2014). Greenhouse gas emissions from renewable energy sources: A review of lifecycle considerations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 461–475. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.087> doi: 10.1016/j.rser.2014.07.087
- Azapagic, A., y Perdan, S. (2011). *Sustainable Development in Practice: Case Studies for Engineers and Scientists* (2nd Editio ed.). Wiley-Blackwell.
- Baitz, M., Makishi, C., Kupfer, T., In, J. F., Schuller, O., Kokborg, M., ... Liedke, A. (2014). *GaBi Database & Modelling Principles* (n.º November). Descargado de <http://www.gabi-software.com/fileadmin/gabi/Modelling{ }Principles/GaBi{ }Modelling{ }Principles{ }2014.pdf>
- Bayer, P., Rybach, L., Blum, P., y Brauchler, R. (2013). Review on life cycle environmental effects of geothermal power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 446–463. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.039> doi: 10.1016/j.rser.2013.05.039

- Bertani, R. (2016). Geothermal power generation in the world 2010-2014 update report. *Geothermics*, 60, 31–43. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.11.003> doi: 10.1016/j.geothermics.2015.11.003
- Cámara de Diputados México. (2013). *Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energetica (LAFATERTE)*. Descargado de <http://www.iea.org/policiesandmeasures/renewableenergy/?country=Mexico>
- Cámara de Diputados México. (2014a). *Ley de Energía Geotérmica*. Descargado de [http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LEG\\_{\\_}110814.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LEG_{_}110814.pdf)
- Cámara de Diputados México. (2014b). *Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables*.
- Cámara de Diputados México. (2014c). *Reglamento de la Ley de Energía Geotérmica*. Descargado de [http://www.dof.gob.mx/nota\\_{\\_}detalle.php?codigo=5366670{&}fecha=31/10/2014](http://www.dof.gob.mx/nota_{_}detalle.php?codigo=5366670{&}fecha=31/10/2014)
- Castillo-Hernández, P., Mendoza-Domínguez, A., y Caballero- Mata, P. (2012). Análisis de las propiedades fisicoquímicas de gasolina y diesel mexicanos reformulados con Etanol. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XIII(3), 293–306. Descargado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/iit/v13n3/v13n3a4.pdf>
- CeMIEGeo. (2016). *Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica*. Descargado 2016-06-18, de <http://www.cemiegeo.org/index.php/quienesSomos>
- Clark, C. E., Harto, C. B., Sullivan, J. L., y Wang, M. Q. (2010, sep). *Water use in the development and operation of geothermal power plants*. (Inf. Téc.). Argonne, IL (United States): Argonne National Laboratory (ANL). Descargado de <http://www.osti.gov/servlets/purl/1013997-UI59Ky/> doi: 10.2172/1013997
- CONABIO. (s.f.). *Cardo mariano*. Descargado 29/09/2016, de <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/asteraceae/silybum-marianum/fichas/ficha.htm>

- DiPippo, R. (2008). *The Geysers Dry-Steam Power Plants, Sonoma and Lake Counties, California, U.S.A.* Elsevier. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750686204500186> doi: 10.1016/B978-075068620-4.50018-6
- DiPippo, R. (2012a). Appendix A – Worldwide State of Geothermal Power Plant Development as of August 2011. En *Geothermal power plants* (pp. 509–529). Elsevier. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080982069000361> doi: 10.1016/B978-0-08-098206-9.00036-1
- DiPippo, R. (2012b). Chapter 13 - Cerro Prieto Power Station, Baja California Norte, Mexico. En *Geothermal power plants* (pp. 289–304). Elsevier. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080982069000130> doi: 10.1016/B978-0-08-098206-9.00013-0
- DiPippo, R. (2012c). Chapter 23 - Environmental Impact of Geothermal Power Plants. En *Geothermal power plants* (pp. 483–506). Elsevier. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080982069000233> doi: 10.1016/B978-0-08-098206-9.00023-3
- DiPippo, R. (2012d). Chapter 3 - Geothermal Well Drilling. En *Geothermal power plants* (pp. 39–47). Elsevier. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080982069000038> doi: 10.1016/B978-0-08-098206-9.00003-8
- Dufour, J., Arsuaga, J., Moreno, J., Torrealba, H., y Camacho, J. (2013). Comparative life cycle assessment of biodiesel production from cardoon (*Cynara cardunculus*) and rapeseed oil obtained under Spanish conditions. *Energy and Fuels*, 27(9), 5280–5286. Descargado de <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ef400951f> doi: 10.1021/ef400951f
- Dufour, J., Moreno, J., y Rodríguez, R. (2011). Life Cycle Assessment of Biodiesel Production from Microalgae Oil: Effect of Algae Species and Cultivation System. En *Towards life cycle sustainability management* (pp. 437–442). Dordrecht: Springer Netherlands. Descargado de <http://link.springer.com/chapter/10.1007/>

978-94-007-1899-9\_{\_}42[http://www.springerlink.com/index/10.1007/978-94-007-1899-9\\_{\\_}42](http://www.springerlink.com/index/10.1007/978-94-007-1899-9_{_}42) doi: 10.1007/978-94-007-1899-9\_42

Fernández, J., Curt, M. D., y Aguado, P. L. (2006). Industrial applications of *Cynara cardunculus* L. for energy and other uses. *Industrial Crops and Products*, 24(3), 222–229. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669006000847> doi: 10.1016/j.indcrop.2006.06.010

Finger, J., y Blankenship, D. (2010). Handbook of Best Practices for Geothermal Drilling. *Sandia Report (SAND2010-6048)*. ... (December), 84, Figure 2. Descargado de <http://www1.eere.energy.gov/geothermal/pdfs/drillinghandbook.pdf>

Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., ... Suh, S. (2009). Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management*, 91(1), 1–21. Descargado de <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479709002345> doi: 10.1016/j.jenvman.2009.06.018

Frick, S., Kaltschmitt, M., y Schröder, G. (2010). Life cycle assessment of geothermal binary power plants using enhanced low-temperature reservoirs. *Energy*, 35(5), 2281–2294. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544210000708> doi: 10.1016/j.energy.2010.02.016

Fridriksson, T., Mateos Merino, A., Audient, P., y Orucu, A. Y. (2016). *Greenhouse gases from geothermal power production* (Inf. Téc.). Descargado de <http://documents.worldbank.org/curated/en/550871468184785413/pdf/106570-ESM-P130625-PUBLIC.pdf>

GaBi, PE International, y University of Stuttgart. (2016a). *GaBi Paper Clip Tutorial. Part 1: Introduction to LCA and modelling using GaBi*. Descargado de [http://www.gabi-software.com/uploads/media/Paper\\_{\\_}Clip\\_{\\_}Tutorial\\_{\\_}Handbook\\_{\\_}Part1.pdf](http://www.gabi-software.com/uploads/media/Paper_{_}Clip_{_}Tutorial_{_}Handbook_{_}Part1.pdf)

- GaBi, PE International, y University of Stuttgart. (2016b). *GaBi Paper Clip Tutorial. Part 2: Scenario modelling for eco-design*. Descargado de <http://www.gabi-software.com/fileadmin/GaBi{ }Manual/GaBi{ }Paperclip{ }tutorial{ }Part2.pdf>
- Ghazi, M., Quaranta, G., Duplay, J., Hadjamor, R., Khodja, M., Amar, H. A., y Kessaissia, Z. (2011). Life-Cycle Impact Assessment of oil drilling mud system in Algerian arid area. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(12), 1222–1231. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.05.016> doi: 10.1016/j.resconrec.2011.05.016
- Güereca, L. P., Sosa, R. O., Gilbert, H. E., y Reynaga, N. S. (2015, mar). Life cycle assessment in Mexico: overview of development and implementation. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(3), 311–317. Descargado de <http://link.springer.com/10.1007/s11367-014-0844-9> doi: 10.1007/s11367-014-0844-9
- Gutiérrez-Negrín, L. (2012). Update of the Geothermal Electric Potential in Mexico. *Geothermal Resources Council Transactions*, 36(1976), 671–678. Descargado de <http://pubs.geothermal-library.org/lib/grc/1030299.pdf>
- Gutiérrez-Negrín, L. (2015). Mexican Geothermal Plays. En *World geothermal congress 2015* (pp. 19–25). Melbourne, Australia. Descargado de <http://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2015/11078.pdf>
- Gutiérrez-Negrín, L., Maya-González, R., y Quijano-León, J. (2015). Present situation and perspectives of geothermal in Mexico. En *Proceedings world geothermal congress* (pp. 1–10). Melbourne, Australia. Descargado de <http://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2015/01002.pdf>
- Gutiérrez-Negrín, L. C., y Izquierdo-Montalvo, G. (2010). Review and Update of the Main Features of the Los Humeros Geothermal Field , Mexico. En *Proceedings world geothermal congress*. Bali, Indonesia. Descargado de <http://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2010/0617.pdf>

- Hole, H. (2008). *Geothermal Well Design – Casing And Wellhead* (n.º June 9-13). Dubrovnik, Croatia. Descargado de <https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/IGAstandard/ISS/2008Croatia/Hole02.pdf>
- Hondo, H. (2005). Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case. *Energy*, 30(11-12 SPEC. ISS.), 2042–2056. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544204003652> doi: 10.1016/j.energy.2004.07.020
- Hunt, T. M. (2001). *Five Lectures on Environmental Effects of Geothermal Utilization* (n.º 1). Descargado de <http://www.os.is/gogn/unu-gtp-report/UNU-GTP-2000-01.pdf>
- IGA, y IFC. (2014). *Best Practices Guide for Geothermal Exploration* (Inf. Téc.). IGA/IFC. Descargado de <http://www.ifc.org/wps/wcm/connect/dfad690046dcd2ac8f7eef57143498e5/Geothermal+Exploration+Best+Practices-2nd+Edition-FINAL.pdf?MOD=AJPERES>
- IPCC. (2012). *Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. (O. Edenhofer et al., Eds.). United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- ISO 14040:2006. (2006). *Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*. Descargado de <https://www.iso.org/obp/ui/{#}iso:std:iso:14040:ed-2:v1:en>
- ISO 14044:2006. (2006). *Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines*. Descargado de <https://www.iso.org/obp/ui/{#}iso:std:iso:14044:ed-1:v1:en>
- Jaimes-Maldonado, J. G., Gutiérrez-Negrín, L., y León, H. D. D. (2012a). LIFE CYCLE OF GEOTHERMAL WELLS – EXPERIENCE IN MEXICO. En (pp. 1–11). Descargado de <http://www.os.is/gogn/unu-gtp-sc/UNU-GTP-SC-14-20.pdf>

- Jaimés-Maldonado, J. G., Gutiérrez-Negrín, L., y León, H. D. D. (2012b). Life-cycle of geothermal wells - Experiences in Mexico. En Asociación Geotérmica Mexicana (Ed.), *Xx congreso anual, i congreso geotérmico latinoamericano* (p. 12). Morelia. Descargado de <http://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/Mexico/2012/Paper-R2{-}Jaimes{-}et{-}al.pdf>
- Lapuerta, M., Armas, O., Ballesteros, R., y Fernández, J. (2005). Diesel emissions from biofuels derived from Spanish potential vegetable oils. *Fuel*, 84(6 SPEC. ISS.), 773–780. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236104003540> doi: 10.1016/j.fuel.2004.11.010
- Lukawski, M. Z., Anderson, B. J., Augustine, C., Capuano, L. E., Beckers, K. F., Livesay, B., y Tester, J. W. (2014). Cost analysis of oil, gas, and geothermal well drilling. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 118, 1–14. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2014.03.012> doi: 10.1016/j.petrol.2014.03.012
- Lund, J., y Boyd, T. (2015). Direct Utilization of Geothermal Energy 2015 Worldwide Review. *Proceedings World Geothermal Congress(April)*, 25–29. Descargado de <https://pangea.stanford.edu/ERE/db/WGC/papers/WGC/2015/01000.pdf> doi: 10.1016/j.geothermics.2011.07.004
- Majer, E., Nelson, J., Robertson-Tait, A., Savy, J., y Wong, I. (2012). Protocol for Addressing Induced Seismicity Associated with Enhanced Geothermal Systems. (January), 49. Descargado de <https://www1.eere.energy.gov/geothermal/pdfs/geothermal{-}seismicity{-}protocol{-}012012.pdf> doi: DOE/EE-0662
- Martín-Gamboa, M., Iribarren, D., y Dufour, J. (2015, jan). On the environmental suitability of high- and low-enthalpy geothermal systems. *Geothermics*, 53, 27–37. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375650514000364><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0375650514000364> doi: 10.1016/j.geothermics.2014.03.012

- Masera, O., Rodríguez, N., Lazcano, I., Horta, A., Macedo, I., Trindade, S., ... Müller-Langer, F. (2006). *Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el Transporte en México* (SENER/BID/GTZ, Ed.). Descargado de <http://www.bioenergeticos.gob.mx/bio/descargas/SENER-BID-GTZ-Biocombustibles-en-Mexico-Estudio-completo.pdf>
- Miyora, T. (2014). *MODELLING AND OPTIMIZATION OF GEOTHERMAL DRILLING PARAMETERS - A CASE STUDY OF WELL MW-17* (Tesis Doctoral, United Nations University). Descargado de <http://os.is/gogn/unu-gtp-report/UNU-GTP-2014-06.pdf>
- Miyora, T., Jónsson, M. P., y Þórhallsson, S. (2015). Modelling and Optimization of Geothermal Drilling Parameters - A Case Study of Well MW-17 in Menengai, Kenya. En Stanford University (Ed.), *Fourtieth workshop on geothermal reservoir engineering* (p. 15). Stanford, California. Descargado de <https://pangea.stanford.edu/ERE/db/GeoConf/papers/SGW/2015/Miyora.pdf>
- Naganawa, S. (2016). Drilling Technology Development for Supercritical Geothermal Resources in Japan. En *Iea geothermal - central and south america workshop april 19th 2016 cuernavaca*. Descargado de <http://iea-gia.org/wp-content/uploads/2016/05/2-06-Naganawa-Drilling-Technology-Development-for-Supercritical-Geothermal-Resources-in-Japan.pdf>
- Nemecek, T., y Kagi, T. (2007). Life Cycle Inventories of Agricultural Production Systems,ecoinvent report No. 15. *Final report of Ecoinvent V2.0(15)*, 1-360. Descargado de <https://db.ecoinvent.org/reports/15{-}Agriculture.pdf>
- Oppelt, J., Moeller, D. M., Wassermann, D. I., Anders, E., y Ehmann, F. (2016). Innovative Drilling and Production Technology for Deep Geothermal Wells. En *Central and south america workshop april 19th 2016 cuernavaca*. Descargado de <http://iea-gia.org/wp-content/uploads/2016/05/2-04-Lehr-Innovative-Drilling-and-Production-Technology-for-Deep-Geothermal-Wells.pdf>

- PEMEX. (2015). *Indicadores Petroleros* (Inf. Téc.). Descargado de <http://www.pemex.com/ri/Publicaciones/IndicadoresPetroleros/indicador.pdf>
- Pennington, D., Potting, J., Finnveden, G., Lindeijer, E., Jolliet, O., Rydberg, T., y Rebitzer, G. (2004). Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice. *Environment International*, 30(5), 721–739. Descargado de <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0160412003002551> doi: 10.1016/j.envint.2003.12.009
- Ramírez-Montes, M., Flores-Armenta, M., y Morales-Alcalá, L. (2014). Geothermal Drilling: The Price of Reaching the Resource. En *Short course vi on utilization of low-and medium-enthalpy geothermal resources and financial aspects of utilization* (pp. 1–8). Santa Clara, El Salvador: ONU-GTP LaGeo. Descargado de <http://www.os.is/gogn/unu-gtp-sc/UNU-GTP-SC-18-34.pdf>
- Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., y Rydberg, T. (2004). Life cycle assessment Part 1 : Framework , goal and scope definition , inventory analysis , and applications. , 30, 701–720. doi: 10.1016/j.envint.2003.11.005
- SAGARPA. (2015). *Proveedores de Fertilizantes*. Descargado 04/10/2016, de <http://www.sagarpa.gob.mx/agricultura/Precios/Paginas/ProveedoresdeFertilizantes.aspx>
- Santoyo-Castelazo, E., Gujba, H., y Azapagic, A. (2011). Life cycle assessment of electricity generation in Mexico. *Energy*, 36(3), 1488–1499. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2011.01.018> doi: 10.1016/j.energy.2011.01.018
- Schlumberger. (s.f.). *La primera ventana de salida cortada en una tubería de revestimiento de 30 pulgadas permite recuperar una boca de perforación en el Golfo de Suez para Dana Petroleum*. Descargado de <https://www.slb.com/{~}/media/Files/fishingsidettracking/case{~}studies/trackmaster{-}ch{-}gulf{-}suez{-}cs{-}esp.pdf>

- SEMARNAT, y CFE. (2007). *Proyecto Geotermoeléctric Cerro Prieto V* (Inf. Téc.). Descargado de <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/bc/estudios/2007/02BC2007E0001.pdf>
- SEMARNAT, y CFE. (2008). *Proyecto Geotermoeléctrico Cerritos Colorados, Jal.* (Inf. Téc.). Descargado de <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/jal/estudios/2008/14JA2008E0002.pdf>
- SEMARNAT, y CFE. (2014). *Proyecto Geotermoeléctrico Los Humeros II, Pueb.* (Inf. Téc.).
- SENER. (2012, nov). *Prospectiva de Energías Renovables 2012 - 2016.* , 1–156. Descargado de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/62954/Prospectiva{ }de{ }Energ{ }as{ }Renovables{ }2012-2026.pdf>
- SENER. (2014). *Balance Nacional de Energía* (Inf. Téc.). Secretaría de Energía. Descargado de <http://www.energia.gob.mx/res/PE{ }y{ }DT/pub/2013/Balance{ }2013.pdf>
- SENER, y CFE. (2016). *Inventario Nacional de Energías Renovables IRENE.* Descargado de <http://inere.energia.gob.mx/version4.5/>
- Shortall, R., Davidsdottir, B., y Axelsson, G. (2015a, aug). Development of a sustainability assessment framework for geothermal energy projects. *Energy for Sustainable Development*, 27, 28–45. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0973082615000125> doi: 10.1016/j.esd.2015.02.004
- Shortall, R., Davidsdottir, B., y Axelsson, G. (2015b). Geothermal energy for sustainable development : A review of sustainability impacts and assessment frameworks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 391–406. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.020> doi: 10.1016/j.rser.2014.12.020
- Shortall, R., Davidsdottir, B., y Axelsson, G. (2015c, oct). A sustainability assessment framework for geothermal energy projects: Development in Iceland, New Zealand and Kenya. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 372–407. Descargado de <http://>

www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115004487 doi:  
10.1016/j.rser.2015.04.175

Sullivan, J. L., Clark, C. E., Han, J., y Wang, M. Q. (2010, oct). *Life-cycle analysis results of geothermal systems in comparison to other power systems*. (Inf. Téc.). Argonne, IL (United States): Argonne National Laboratory (ANL). Descargado de <http://www.osti.gov/servlets/purl/993694-wlvuul/> doi: 10.2172/993694

Sullivan, J. L., y Wang, M. Q. (2013a). Impact of Well Field Exploration on the Life Cycle Analysis of Geothermal Power Production. , 37. Descargado de <http://pubs.geothermal-library.org/lib/grc/1030665.pdf>

Sullivan, J. L., y Wang, M. Q. (2013b). Life cycle greenhouse gas emissions from geothermal electricity production. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 5(6). doi: 10.1063/1.4841235

Tapia, R., Arvizu, N., Hernández, P., y Ramírez, G. (2013). Evaluación de un nuevo inhibidor de calcita en el pozo LV-4A del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, BCS, México. *Geotermia*, 53–60. Descargado de <http://132.248.9.34/hevila/Geotermia/2013/vol126/no1/6.pdf>

TenarisTamsa. (2013). *Prontuario*. Descargado de <http://www.tenaristamsa.com/wp-content/uploads/2013/03/Prontuario.pdf><http://www.tenaris.com/shared/documents/files/CB754.pdf>

Tester, J. W., Anderson, B. J., Batchelor, A. S., Blackwell, D. D., y DiPippo, R. (2006). The Future of Geothermal Energy - Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century. *MIT - Massachusetts Institute of Technology*, 358. Descargado de [www1.eere.energy.gov/geothermal/pdfs/future\\_{\\_}geo\\_{\\_}energy.pdf](http://www1.eere.energy.gov/geothermal/pdfs/future_{_}geo_{_}energy.pdf)

Teza, D. (2016). ThermoDrill - Fast track innovative drilling system for deep geothermal challenges. En *Central and south american workshop on geothermal energy*. Cuernavaca, México: IEA

Geothermal. Descargado de <http://iea-gia.org/wp-content/uploads/2016/05/2-05-Teza-ThermoDrill-Fast-track-innovative-drilling.pdf>

Tomasini-Montenegro, C., Santoyo-Castelazo, E., Gujba, H., Romero, R. J., y Santoyo, E. (2016). *Life Cycle Assessment of Geothermal Power Generation Technologies: An Updated Review*.

Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., y Weidema, B. (2016). Theecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 3(part I), 1–13. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8> doi: 10.1007/s11367-016-1087-8

William C. Lyons, Gary J Plisga, B. (2005). *Standard Handbook of Petroleum and Natural Gas Engineering* (2.<sup>a</sup> ed.; Gulf Professional Publishing, Ed.). Elsevier.