



**UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO DE MORELOS
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LA CONSTRUCCIÓN
DE POZOS GEOTÉRMICOS: PROPUESTA DE USO DE
BIODIÉSEL PARA REDUCCIÓN DEL IMPACTO
AMBIENTAL**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRÍA EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**

I.Q. GLORIA SERRANO MELGAR

**DIRECTOR(ES): DR. ANTONIO RODRÍGUEZ MARTÍNEZ
DR. EDGAR ROLANDO SANTOYO GUTIÉRREZ**

**NOMBRE DE LOS SINODALES: DRA. HELENA CABAL CUESTA
DR. ROSENBERG JAVIER ROMERO DOMÍNGUEZ
DR. JESÚS CEREZO ROMÁN**

CUERNAVACA, MORELOS

Julio, 2018

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LA CONSTRUCCIÓN
DE POZOS GEOTÉRMICOS: PROPUESTA DE USO DE
BIODIÉSEL PARA REDUCCIÓN DEL IMPACTO
AMBIENTAL**

**DIRECTOR(ES): DR. ANTONIO RODRÍGUEZ MARTÍNEZ
DR. EDGAR ROLANDO SANTOYO GUTIÉRREZ**

NOMBRE DE LOS SINODALES:

**DRA. HELENA CABAL CUESTA
DR. ROSENBERG JAVIER ROMERO DOMÍNGUEZ
DR. JESÚS CEREZO ROMÁN**

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo y patrocinio brindado durante la realización de este proyecto; y por la oportunidad de la realizar mi estancia de investigación fuera del país.

Agradezco a la Red Temática CONACYT de “Sustentabilidad Energética, Medio Ambiente y Sociedad” Sumas por su apoyo en mi formación.

Agradezco a la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM), en especial al Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp), institución de calidad, que me brindó todo el apoyo durante estos estudios.

Agradezco a mis asesores de tesis, el Dr. Antonio Rodríguez Martínez y el Dr. Edgar Rolando Santoyo Gutiérrez, por sus conocimientos invaluable que me brindaron para llevar a cabo esta investigación, por el apoyo y la confianza que me han prestado de forma desinteresada.

Agradezco a los miembros del jurado, la Dra. Helena Cabal Cuesta, el Dr. Rosenberg Javier Romero Domínguez y al Dr. Jesús Cerezo Román, por las valiosas contribuciones y por el tiempo que dedicaron a este proyecto.

Agradezco a los excelentes profesores del programa de maestría que compartieron sus conocimientos conmigo.

Agradezco a mis compañeros de maestría con los que compartí grandes momentos y agradezco su apoyo incondicional.

DEDICATORIAS

Dedico este trabajo...

...a Dios por guiarme durante este camino y permitirme lograr una meta más en mi vida.

...a mis padres por todo el apoyo brindado a lo largo de este camino ya que sin ellos nada de esto sería posible.

...a mis hermanas por ser mis mejores amigas y estar siempre a mi lado.

...a mi novio por su apoyo incondicional.

Quiero hacerles saber que son lo más importante en mi vida, los amo mucho y les dedico este trabajo con todo mi amor.

RESUMEN

Hoy en día existen dos grandes problemas a los que nos afrontamos mundialmente, el primero relacionado con la energía y el segundo con la contaminación ambiental, por esto ha crecido un gran interés en el desarrollo, uso e incremento gradual de las energías renovables en el portafolio energético de los países. Dentro de este contexto aparece la energía geotérmica como una energía renovable usada para la generación de electricidad y la producción de calor de proceso. Diversas tecnologías geotérmicas son actualmente empleadas a nivel mundial con estos propósitos. No obstante que estas tecnologías han madurado eficientemente con aplicaciones comerciales, su evaluación ambiental, desde el punto de vista de la sustentabilidad, no ha permeado aún como tarea fundamental de evaluación. Por lo tanto, se propone el estudio de estas tecnologías mediante el análisis de ciclo de vida como una investigación original y de suma importancia para la identificación de etapas del proceso que requieran reducir o mitigar sus principales impactos ambientales. Dentro de este escenario de sustentabilidad el objetivo del presente estudio fue evaluar la sustentabilidad ambiental utilizando biodiésel en el proceso de construcción de pozos geotérmicos mediante la metodología análisis de ciclo de vida.

En la actualidad se usa energía fósil (diésel) en la perforación de pozos geotérmicos para la preparación de fluidos de perforación y para la generación de energía que permita la operación de los equipos de perforación. Este requerimiento hace que la construcción del pozo presente impactos ambientales imputables directamente al consumo de recursos fósiles. Con el objeto de reducir o mitigar estos impactos, se propuso el uso de biodiésel para minimizar los impactos ambientales en la etapa de perforación de pozos.

Con estos propósitos se realizó un análisis de ciclo de vida con 3 posibles escenarios. El primero a través del uso de diésel (como caso base) y un segundo y tercer caso usando biodiésel de soya y de palma (como energético de reemplazo), respectivamente.

A partir de los resultados obtenidos, se observó que si existe una reducción del impacto ambiental a través de los 2 tipos de biodiésel. El uso de biodiésel de soya y palma permiten un beneficio a través de la reducción de los impactos ambientales atribuidos al calentamiento global, al agotamiento de la capa de ozono, la creación de ozono fotoquímico, la acidificación y el agotamiento de recursos abióticos fósiles. En las categorías de agotamiento de recursos abióticos de elementos, eutrofización, toxicidad humana y ecotoxicidad de agua marina, el uso de biodiésel de soya muestra una afectación o desventaja ambiental, mientras que el biodiésel de palma afecta la ecotoxicidad de agua dulce y la ecotoxicidad terrestre. Estas afectaciones se atribuyen básicamente a los procesos de producción de los 2 biocombustibles. Estos resultados son mostrados con mayor detalle en el trabajo de tesis.

ABSTRACT

Today there are two major problems that we face worldwide, the first related to energy and the second with environmental pollution, which is why there has been a great interest in the development, use and gradual increase of renewable energies in the portfolio energy of the countries. Within this context, geothermal energy appears as a renewable energy used for the generation of electricity and the production of process heat. Several geothermal technologies are currently used worldwide for these purposes. Although these technologies have matured efficiently with commercial applications, their environmental assessment, from the point of view of sustainability, has not yet permeated as a fundamental evaluation task. Therefore, the study of these technologies is proposed through life cycle analysis as an original and very important investigation for the identification of stages of the process that require reducing or mitigating their main environmental impacts. Within this sustainability scenario, the objective of this study was to evaluate environmental sustainability using biodiesel in the construction process of geothermal wells using the life cycle analysis methodology.

At present, fossil energy (diesel) is used in the drilling of geothermal wells for the preparation of drilling fluids and for the generation of energy that allows the operation of drilling equipment. This requirement causes the construction of the well to present environmental impacts directly attributable to the consumption of fossil resources. In order to reduce or mitigate these impacts, the use of biodiesel was proposed to minimize environmental impacts in the well drilling stage.

With these purposes, a life cycle analysis was carried out with 3 possible scenarios. The first through the use of diesel (as a base case) and a second and third case using soy and palm biodiesel (as replacement energy), respectively.

Based on the results obtained, it was observed that there is a reduction of the environmental impact through the 2 types of biodiesel. The use of soybean and palm biodiesel allow a benefit through the reduction of environmental impacts attributed to global warming, the depletion of the ozone layer, the creation of photochemical ozone, acidification and the depletion of fossil abiotic resources. In the categories of depletion of abiotic resources of elements, eutrophication, human toxicity and ecotoxicity of seawater, the use of soybean biodiesel shows an environmental impairment or disadvantage, while palm biodiesel affects the ecotoxicity of freshwater and terrestrial ecotoxicity. These affectations are attributed basically to the production processes of the 2 biofuels. These results are shown in more detail in the thesis work.

ÍNDICE

Agradecimientos	I
Dedicatorias	II
Resumen	III
Abstract	IV
Lista de Tablas	1
Lista de Figuras	2
Capítulo 1. Introducción	4
1.1 Antecedentes	4
1.1.1 Contexto Energético Mundial	4
1.1.2 Contexto del Sector Energético en México	6
1.1.3 Energías Renovables en México	9
1.1.4 Energía Geotérmica	11
1.1.4.1 Energía Geotérmica en México	12
1.1.5 Tecnologías de generación de energía geotérmica	16
1.1.5.1 Tecnología de vapor seco	17
1.1.5.2 Tecnologías de flasheo de vapor	18
1.1.5.3 Tecnología del ciclo binario	19
1.1.5.4 Sistemas geotérmicos mejorados	20
1.1.6 Análisis de Ciclo de Vida de las Tecnologías Geotermoeléctricas	21
1.2 Planteamiento del Problema	26
1.3 Justificación	26
1.4 Hipótesis	26
1.5 Objetivos	27
Capítulo 2. Marco Teórico	28
2.1 Plantas geotermoeléctricas y pozos geotérmicos	28
2.2 Proyecto geotermoeléctrico	29

2.2.1 Preparación de Sitio	30
2.2.2 Perforación del pozo	30
2.2.2.1 Sistemas utilizados en la perforación	30
2.2.3 Revestimiento de pozo	32
2.2.4 Cementación del pozo	33
2.3 Análisis de Ciclo de Vida	35
2.3.1 Definición de objetivo y alcance	36
2.3.2 Análisis de Inventario	37
2.3.3 Evaluación de Impacto	37
2.4.4 Interpretación	38
2.4 Software para ACV	39
2.5 Biodiésel	40
2.5.1 Estudios de ACV aplicados a la producción de biodiésel	41
2.5.2 Escenario de la Producción de Biodiésel en México	42
Capítulo 3. Evaluación de la Sustentabilidad Ambiental de la Construcción de Pozos Geotérmicos	44
3.1 Definición de objetivo y alcance	44
3.1.1 Objetivo	44
3.1.2 Alcance	44
3.1.2.1 Descripción y función del sistema	44
3.1.2.2 Unidad Funcional	45
3.1.2.3 Método de Evaluación	45
3.1.2.4 Suposiciones y limitaciones	46
3.2 Análisis del inventario	48
3.3 Evaluación del impacto ambiental e Interpretación	52

Capítulo 4. Resultados y Discusión	71
4.1 Potencial de Agotamiento de Recursos Abióticos de Elementos	71
4.2 Potencial de Agotamiento de Recursos Abióticos Fósiles	73
4.3 Potencial de Acidificación	75
4.4 Potencial de Eutrofización	77
4.5 Potencial Ecotoxicidad de Agua Dulce	79
4.6 Potencial de Calentamiento Global	81
4.7 Potencial de Toxicidad Humana	83
4.8 Potencial de Ecotoxicidad de Agua Marina	85
4.9 Potencial Agotamiento de la Capa de Ozono	87
4.10 Potencial de Creación de Ozono Fotoquímico	89
4.11 Potencial de Ecotoxicidad Terrestre	91
Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones	93
Referencias	96
Anexos	102

Lista de Tablas

Tabla 1.	Campos geotérmicos en México, capacidad instalada y en funcionamiento en 2014 y 2015.	14
Tabla 2.	Estudios de ACV para plantas de energía geotérmica (vapor seco, flasheo y ciclo binario).	22
Tabla 3.	Materia y energía requeridas para la construcción de pozos geotérmicos.	52
Tabla 4.	Resultados totales por categoría de impacto de la construcción de pozos geotérmicos.	53
Tabla 5.	Valores absolutos y porcentajes del potencial de agotamiento de recursos abióticos de elementos por etapa.	55
Tabla 6.	Valores absolutos y porcentajes del potencial de agotamiento de recursos abióticos fósiles por etapa.	56
Tabla 7.	Valores absolutos y porcentajes del potencial de acidificación por etapa.	58
Tabla 8.	Valores absolutos y porcentajes del potencial de eutrofización por etapa.	59
Tabla 9.	Valores absolutos y porcentajes del potencial de ecotoxicidad acuática de agua dulce por etapa.	61
Tabla 10.	Valores absolutos y porcentajes del potencial de calentamiento global por etapa.	62
Tabla 11.	Valores absolutos y porcentajes del potencial de toxicidad humana por etapa.	64
Tabla 12.	Valores absolutos y porcentajes del potencial de ecotoxicidad acuática marina por etapa.	65
Tabla 13.	Valores absolutos y porcentajes del potencial de agotamiento de la capa de ozono por etapa.	67
Tabla 14.	Valores absolutos y porcentajes del potencial de creación de ozono fotoquímico por etapa.	68
Tabla 15.	Valores absolutos y porcentajes del potencial de ecotoxicidad terrestre por etapa.	70

Lista de Figuras

Fig. 1	Cambio promedio anual en la producción de energía global por combustible.	4
Fig. 2	Consumo final total anual por sector.	5
Fig. 3	Demanda de energía primaria anual por combustible en México.	6
Fig. 4	Demanda de energía por combustible en sectores seleccionados de uso final en México.	7
Fig. 5	Generación de electricidad en México por combustible.	8
Fig. 6	Energía renovable como porcentaje del suministro total de energía primaria en México.	10
Fig. 7	Energía Geotérmica.	11
Fig. 8	Campos Geotérmicos de México.	13
Fig. 9	Sistema de vapor seco.	17
Fig. 10	A) Sistema flasheo simple y doble flasheo, B) Sistema de triple flasheo.	18
Fig. 11	Sistema de ciclo binario.	19
Fig. 12	Esquema de un sistema geotérmico mejorado (EGS).	20
Fig. 13	Impactos ambientales de ciclo de vida de la construcción de un pozo en una planta geotermoeléctrica por etapa.	24
Fig. 14	Impactos ambientales de ciclo de vida de la construcción de un pozo en una planta geotermoeléctrica por proceso de producción de los recursos.	25
Fig. 15	Esquemas de generación geotermoeléctrica.	28
Fig. 16	Esquema general del equipo de perforación.	32
Fig. 17	Esquema representativo de la geometría del pozo perforado.	34
Fig. 18	Etapas de un Análisis de Ciclo de Vida.	36
Fig. 19	Elementos de la Evaluación de Impacto de un Análisis de Ciclo de Vida.	38
Fig. 20.	Sistema de la construcción de pozos geotérmicos.	45
Fig. 21.	Agotamiento de recursos abióticos de elementos, caso diésel, biodiésel de soya y biodiésel de palma.	54
Fig. 22.	Agotamiento de recursos abióticos fósiles, caso diésel, biodiésel de soya y biodiésel de palma.	56
Fig. 23.	Potencial de acidificación, caso diésel, biodiésel de soya y biodiésel de palma.	57
Fig. 24.	Potencial de eutrofización, caso diésel, biodiésel de soya y	59

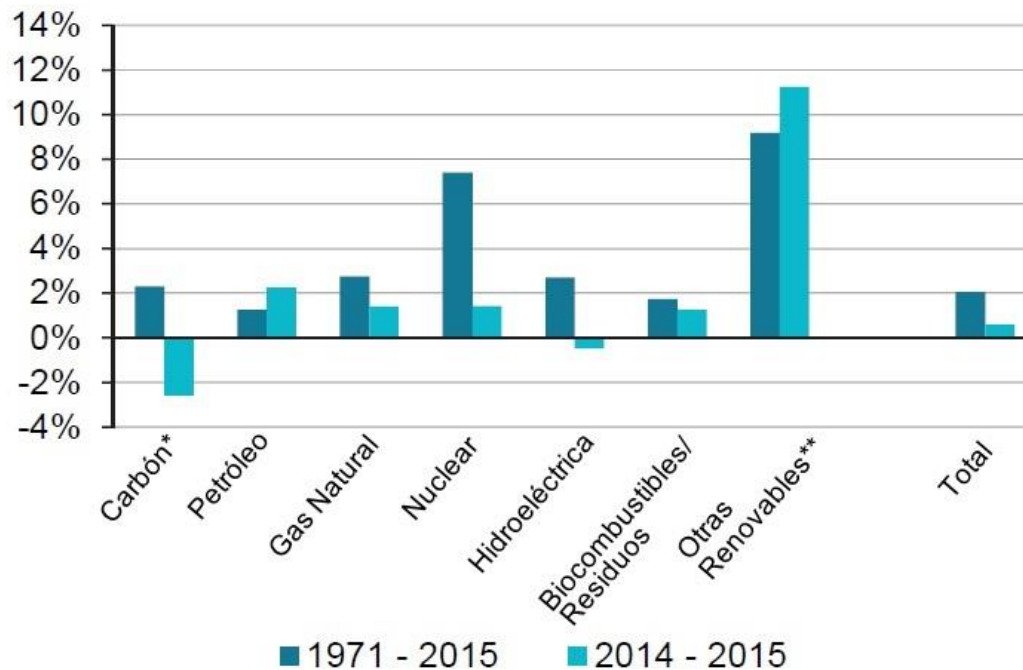
	biodiésel de palma.	
Fig. 25.	Potencial de ecotoxicidad acuática de agua dulce, caso diésel, biodiésel de soya y biodiésel de palma.	60
Fig. 26.	Potencial de calentamiento global, caso diésel, biodiésel de soya y biodiésel de palma.	62
Fig. 27.	Potencial de toxicidad humana, caso diésel, biodiésel de soya y biodiésel de palma.	63
Fig. 28.	Potencial de ecotoxicidad acuática marina, caso diésel, biodiésel de soya y biodiésel de palma.	65
Fig. 29.	Potencial de agotamiento de la capa de ozono, caso diésel, biodiésel de soya y biodiésel de palma.	66
Fig. 30.	Potencial de creación de ozono fotoquímico, caso diésel, biodiésel de soya y biodiésel de palma.	68
Fig. 31.	Potencial de ecotoxicidad terrestre, caso diésel, biodiésel de soya y biodiésel de palma.	69
Fig. 32.	Potencial de agotamiento de recursos abióticos de elementos para cada uno de los procesos considerados.	72
Fig. 33.	Potencial de agotamiento de recursos abióticos fósiles para cada uno de los procesos considerados.	74
Fig. 34.	Potencial de acidificación para cada uno de los procesos considerados.	76
Fig. 35.	Potencial de eutrofización para cada uno de los procesos considerados.	78
Fig. 36.	Potencial de ecotoxicidad de agua dulce para cada uno de los procesos considerados.	80
Fig. 37.	Potencial de calentamiento global dulce para cada uno de los procesos considerados.	82
Fig. 38.	Potencial de toxicidad humana para cada uno de los procesos considerados.	84
Fig. 39.	Potencial de ecotoxicidad de agua marina para cada uno de los procesos considerados.	86
Fig. 40.	Potencial de agotamiento de la capa de ozono para cada uno de los procesos considerados.	88
Fig. 41.	Potencial de creación de ozono fotoquímico para cada uno de los procesos considerados.	90
Fig. 42.	Potencial de ecotoxicidad terrestre para cada uno de los procesos considerados.	92

Capítulo 1. Introducción

1.1. Antecedentes

1.1.1 Contexto Energético Mundial

La producción mundial de energía fue de 13 790 millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep) en 2015 (IEA, World energy balances: Overview, 2017). La producción de petróleo aumentó un 2.3% más por segundo año consecutivo, seguida por 1.9% de energías renovables, 1.4% de gas natural y 1.4% de nuclear. Los combustibles fósiles representaron alrededor del 81.7% de la producción. En conjunto, la producción de estos combustibles fósiles aumentó en un 0.3% en 2015 (IEA, World energy balances: Overview, 2017) (Fig. 1).



*En este gráfico, la turba y la pizarra bituminosa se agregan con carbón.

**Incluye geotérmica, solar térmica, solar fotovoltaica y eólica.

Fig. 1. Cambio promedio anual en la producción de energía global por combustible (IEA, World energy balances: Overview, 2017).

Entre las fuentes no fósiles, los biocombustibles y los residuos mantuvieron su participación en la producción energética mundial en 2015 (9.6%). La energía hidráulica disminuyó ligeramente (-0.5%). Sin embargo, la energía geotérmica tuvo un crecimiento del 4.1%, y otras fuentes renovables como eólica, solar térmica, solar FV, continuaron expandiéndose a un ritmo rápido (+16.8%, +6.8%, +29.7%, respectivamente). Finalmente, la energía nuclear aumentó ligeramente su participación en la producción de energía con un 4.9% (IEA, World energy balances: Overview, 2017).

Entre 1971 y 2015, el consumo final total se duplicó (Fig. 2). Sin embargo, el uso de energía en la mayoría de los sectores económicos no cambió. El uso de energía en el transporte aumentó significativamente, del 23% de consumo final total en 1971 al 29% en 2015. Sin embargo, en 2015 la industria siguió siendo el mayor sector de consumo, solo un punto porcentual menos que en 1971 (37%). El sector residencial ocupó el tercer lugar en 2015 (22%) (IEA, World energy balances: Overview, 2017).

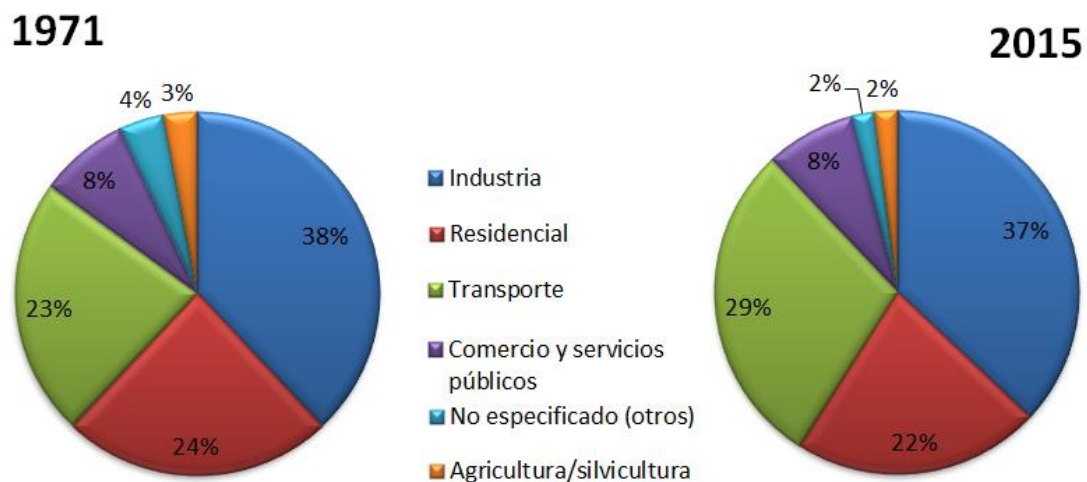


Fig. 2. Consumo final total anual por sector (IEA, World energy balances: Overview, 2017).

1.1.2 Contexto del Sector Energético en México

La demanda de energía primaria en México ha aumentado en un 25% desde 2000. Los combustibles fósiles (el petróleo, el gas natural y el carbón) dominan la mezcla de energía primaria, y representan colectivamente alrededor del 90% de la demanda primaria durante las últimas dos décadas. El petróleo sigue siendo el combustible dominante (IEA, Mexico Energy Outlook, 2017).

En la última década ha habido un cambio del petróleo hacia el gas natural, como se muestra en la figura 3, principalmente en la generación de electricidad, que ha reducido la participación del petróleo en la combinación de energía primaria del 59% en 2000 al 51% en 2014. La demanda de gas natural ha aumentado en más del 70% desde 2000, y su participación en la combinación de energía primaria aumentó del 24% en 2000 al 32% en 2014 (IEA, Mexico Energy Outlook, 2017).

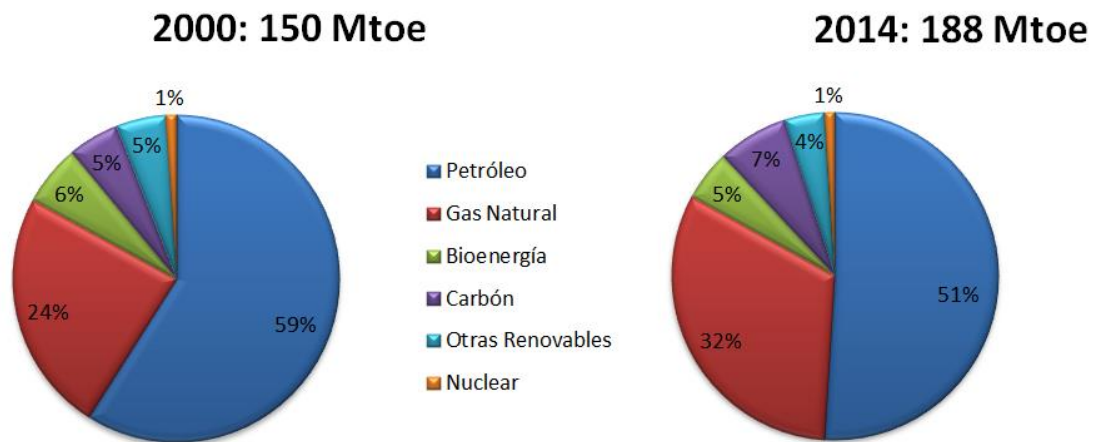


Fig. 3. Demanda de energía primaria anual por combustible en México (IEA, Mexico Energy Outlook, 2017).

La demanda de energía para el transporte representó más del 40% del consumo final total en 2014. El sector del transporte es el mayor consumidor de energía de todos los sectores de energía de uso final en México, muy por encima de la industria (28%) y residencias (20%) (IEA, Mexico Energy Outlook, 2017).

La Fig. 4 muestra como la demanda de energía para el transporte ha aumentado rápidamente, con una tasa de crecimiento anual promedio de 2.6% desde 2000, ya que la existencia de vehículos de pasajeros aumentó de alrededor de 9 millones en 2000 a más de 25 millones en 2014. El consumo del sector del transporte está completamente dominado por los productos del petróleo, y el aumento de la demanda ha llevado a graves problemas de congestión del tráfico y la contaminación del aire en las grandes ciudades. En el sector industrial la demanda de energía ha aumentado en aproximadamente un 14% desde 2000 y para el sector residencial, el consumo de energía ha aumentado en solo un 10% desde 2000 (IEA, Mexico Energy Outlook, 2017).

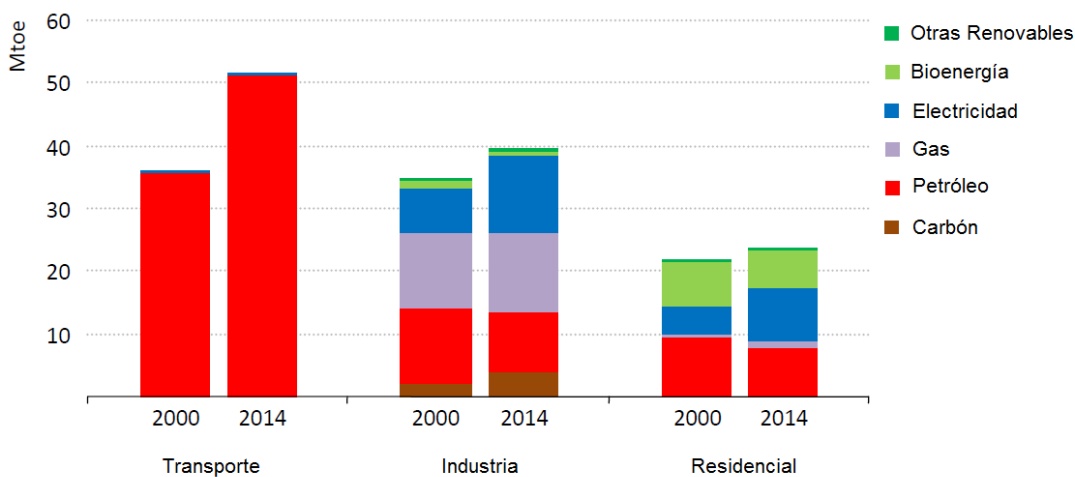
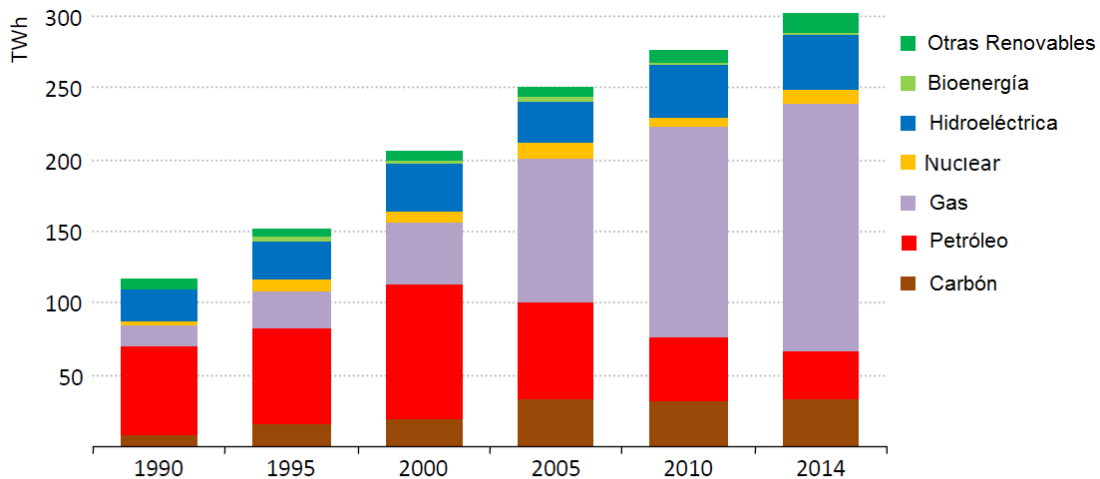


Fig. 4. Demanda de energía por combustible en sectores seleccionados de uso final en México (IEA, Mexico Energy Outlook, 2017).

La demanda de electricidad en México se ha duplicado en los últimos 20 años y en 2014 representó alrededor del 18% del consumo total de energía final, donde más del 99% de la población tiene acceso a la electricidad, pero el consumo per cápita es relativamente bajo. Entre los sectores de uso final, la industria representa más de la mitad (56%) y la demanda de electricidad en el sector residencial, que constituye casi el 40% del consumo final de electricidad. Por el lado de la oferta, la generación está dominada por el gas natural, que ha suplantado al petróleo como principal combustible para la generación de energía (ver Fig.5) (IEA, Mexico Energy Outlook, 2017).



Notas: TWh = terawatt-horas. Otras energías renovables incluyen geotérmica, solar FV y eólica.

Fig. 5. Generación de electricidad en México por combustible (IEA, Mexico Energy Outlook, 2017).

A partir de 2015, México tenía alrededor de 19 gigawatts (GWe) de capacidad de generación de combustible no fósil proporcionando alrededor de una quinta parte de la generación total. La mayor parte de los combustibles no fósiles proviene de la energía hidroeléctrica (9.38%), seguida de la energía eólica (3.19%) y geotérmica (1.95%) (SENER, 2017).

La fuente principal de energías renovables no hidroeléctricas para la generación de energía tradicionalmente había sido la geotermia, pero en los últimos años la contribución de la energía eólica ha crecido rápidamente (IEA, Mexico Energy Outlook, 2017). Comparando el periodo enero-junio 2016 y enero-junio 2017 la generación de energía a partir de energía eólica creció un 7.35% (de 4,745.47 GWh en 2016 a 5,094.43 GWh en 2017) mientras que la geotérmica creció un 1.31% (de 3,069.33 GWh a 3,109.56 GWh) (SENER, 2017).

Es probable que las tecnologías de generación de energía renovable presenten una rápida expansión a medida que la reforma abra oportunidades de inversión para ayudar a cumplir los compromisos de México sobre el cumplimiento de las metas climáticas y de energía limpia (IEA, Mexico Energy Outlook, 2017).

1.1.3 Energías Renovables en México

Las energías renovables representaron 15.5 millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep) o el 8.3% del suministro total de energía primaria de México en 2015. Los biocombustibles/residuos, y la energía geotérmica fueron las principales fuentes renovables con 8.7 Mtep (4.6% de del suministro total de energía primaria) y 3.2 Mtep (1.7% del suministro total de energía primaria), respectivamente, en 2015. La hidroeléctrica representó el 1.4% del suministro total de energía primaria, la energía eólica de 0.4% y la energía solar de 0.2% en el mismo año (Fig. 6) (IEA, Energy Policies Beyond IEA Countries - Mexico, 2017).

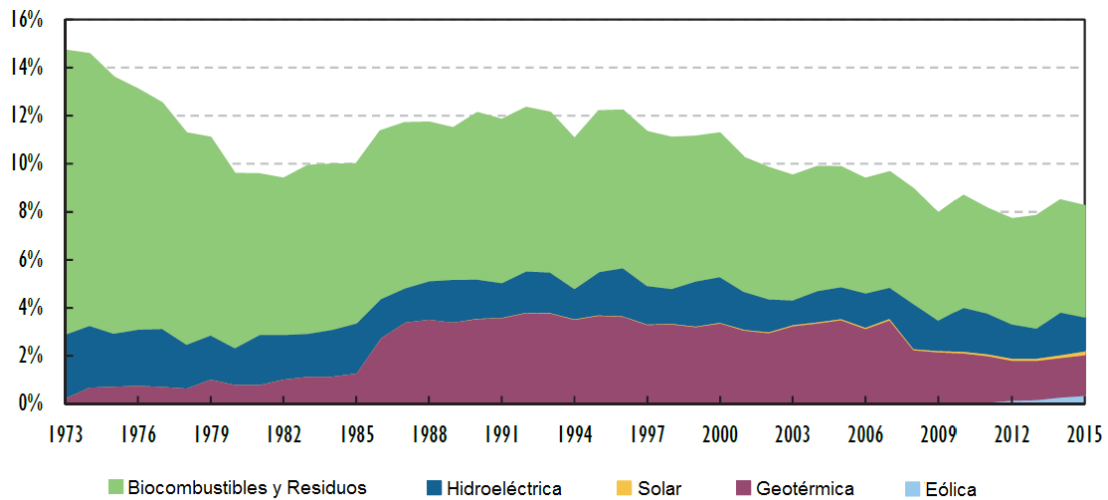


Fig. 6. Energía renovable como porcentaje del suministro total de energía primaria en México (IEA, Energy Policies Beyond IEA Countries - Mexico, 2017).

El suministro de energía renovable aumentó en un 4.9% en los 10 años entre 2005 y 2015. Este bajo crecimiento fue debido principalmente a la disminución en la producción de energía geotérmica y energía proveniente de biocombustibles y desechos.

El suministro de biocombustibles y energía residual se redujo en un 2.6% de 2005 a 2015, aunque con una moderada volatilidad interanual. La producción promedio fue de 8.5 Mtep durante la década, que es, solo ligeramente inferior al promedio de 8.8 Mtep durante la década anterior de 1995-2005.

La generación de energía hidroeléctrica varía año tras año según la disponibilidad de agua. A pesar de la tendencia volátil, los datos muestran que la producción hidroeléctrica de México ha crecido lentamente con el tiempo, un 11% más en 2015 que en 2005. La producción promedio fue de 2.8 Mtep por año durante la década, que es aproximadamente un 16% más que el 2.4 Mtep promedio en la década anterior (IEA, Energy Policies Beyond IEA Countries - Mexico, 2017).

La producción de energía eólica y solar ha crecido en los últimos 10 años. La producción de energía eólica ha aumentado desde 2009, pasando de un nivel insignificante a 7.9 terawatt hora (TWh), que equivale a 0.7 Mtep en 2015. Por el contrario, la producción de energía solar aumentó en la primera década del año 2000, con un crecimiento anual promedio de 13.3% durante 2005-2015, aunque desde una base muy baja.

El suministro de energía geotérmica fue un 49.3% menor durante los 10 años entre 2005 y 2015, alcanzando un máximo de 6.4 Mtep en 2007, con un fuerte descenso en los años siguientes a 3.2 Mtep en 2015 (IEA, Energy Policies Beyond IEA Countries - Mexico, 2017).

1.1.4 Energía Geotérmica

La energía geotérmica (energía de la Tierra), es la energía térmica que fluye desde el interior de nuestro planeta hacia la superficie. Esta fuente de energía renovable corresponde a una energía inmensa y prácticamente inagotable, cuyo potencial es utilizado actualmente para la generación de electricidad y otras múltiples aplicaciones de uso directo (Santoyo et al. 2012). La energía geotérmica es un recurso limpio y renovable que ofrece una alternativa real y más limpia a los combustibles fósiles (Wang et al. 2013). Tiene gran disponibilidad permanente, ya que es independiente de las condiciones climáticas (Arat & Arslan, 2016).

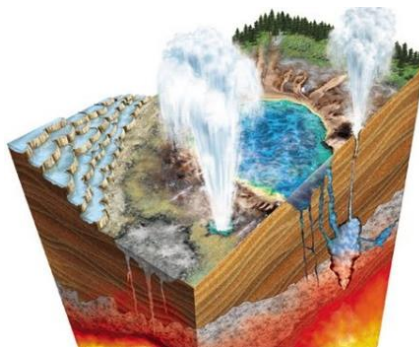


Fig. 7. Energía Geotérmica (<https://erenovable.com/energia-geotermica/>).

Durante más de 100 años, la explotación comercial de los recursos de la energía geotérmica ha proporcionado electricidad de base en el mundo. Los proyectos de generación comercial en desarrollo se concentran en cinco regiones: Asia Pacífico (4.81 GW), América del Norte (3.45 GW), Europa (2.13 GW), América Latina (1.64 GW) y África (0.6 GW) (Bertani, 2016). Dentro de estas regiones, aproximadamente el 90% de la generación total de energía geotérmica se concentra en los ocho países siguientes: Estados Unidos (3,591 MW), Filipinas (1,868 MW), Indonesia (1,809 MW), Turquía (1,100 MW), Nueva Zelanda (980 MW), México (951 MW), Italia (944 MW), e Islandia (710 MW). En donde México ocupa el sexto lugar (Richter, 2018).

1.1.4.1 Energía Geotérmica en México

La energía geotérmica en México tiene una larga tradición, cuyos orígenes se remontan a 1937 cuando el pionero geotérmico mexicano Luis F. de Anda comenzó a trabajar para la Comisión Federal de Electricidad (CFE); promovió el uso de energía geotérmica para generar electricidad. En 1955 fue creada la Comisión de Energía Geotérmica (CEG). Los estudios de exploración se centraron en el campo geotérmico Pathé, ubicado en el estado de Hidalgo. El primer pozo de producción comenzó a producir vapor en enero de 1956 (Gutiérrez & Lippman, 2016).

En 1958, un pozo exploratorio en la zona de Ixtlán de los Hervores también produjo vapor, los primeros estudios de exploración comenzaron en el campo Cerro Prieto en el norte de México. CFE adquirió una planta de energía geotérmica de 3.5 MW construida en Italia, que se instaló en Pathé y se puso en servicio oficialmente el 20 de noviembre de 1959, convirtiéndose así en la primera planta de energía geotérmica comercial en las Américas que estuvo en operación hasta 1973, cuando fue desmantelada. Los Azufres fue el segundo campo geotérmico de México en ser desarrollado (1982).

Después de Los Azufres, se desarrolló el campo Los Humeros (1990) (Gutiérrez & Lippman, 2016).

Simultáneamente con el campo Los Azufres y Los Humeros, CFE también estaba desarrollando el campo Cerritos Colorados que se encuentra en la sección occidental del Cinturón Volcánico Mexicano cerca de la ciudad de Guadalajara. Durante la década de 1980, CFE comenzó a explorar otra área geotérmica, el campo Las Tres Vírgenes, ubicado aproximadamente a la mitad de la península de Baja California (Gutiérrez & Lippman, 2016).

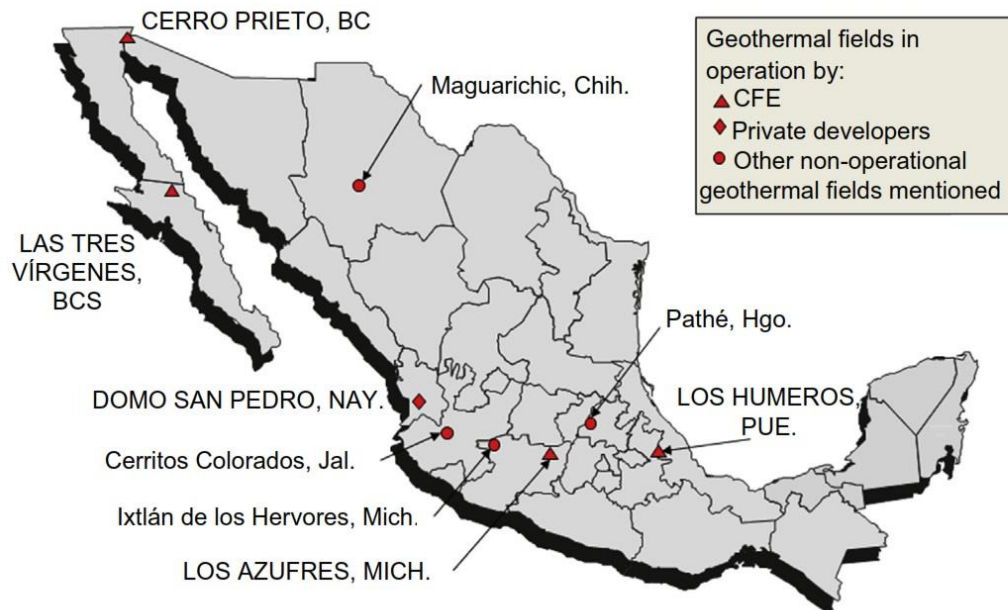


Fig. 8. Campos Geotérmicos de México (Gutiérrez & Lippman, 2016).

Desde finales de 1980, CFE ha realizado varios estudios de exploración en la zona geotérmica de Piedras de Lumbre, cerca del pueblo de Maguarichic, ubicado en el estado norteño de Chihuahua, en lo alto de la Sierra Tarahumara. No se iniciaron nuevos campos geotérmicos después de Maguarichic y Las Tres Vírgenes hasta principios de 2015, cuando se

pusieron en servicio dos unidades de contrapresión de 5 MW cada una en el campo geotérmico Domo San Pedro ubicado en el estado de Nayarit. La Fig. 8 muestra los campos geotérmicos actuales y zonas geotérmicas históricas en México (Gutiérrez & Lippman, 2016).

Los cuatro campos geotérmicos en operación en México durante 2014 representaron una capacidad instalada de 1018 MW, la capacidad en funcionamiento o efectiva fue de 840 MW (Tabla 1). Ese año, la producción eléctrica en esos cuatro campos fue de 6,000 GWh según las estadísticas del sector eléctrico. Por lo tanto, en 2014 el factor de capacidad promedio nacional de las plantas geotérmicas que operan en México en 2014 fue del 81.8% (Gutiérrez & Lippman, 2016).

Tabla 1. Campos geotérmicos, capacidad instalada y en funcionamiento en México en 2014 y 2015 (Gutiérrez & Lippman, 2016).

Campo Geotérmico	Propietario y operador	Capacidad (MW) en 2014		Capacidad (MW) en 2015	
		Instalada	Efectiva	Instalada	Efectiva
Cerro Prieto, Baja California	CFE	720	570	720	570
Los Azufres, Michoacán	CFE	194.4	191.4	227.4	224.4
Los Humeros, Puebla	CFE	93.6	68.6	93.6	68.6
Las Tres Vírgenes, Baja California Sur	CFE	10	10	10	10
Domo San Pedro, Nayarit	Grupo Dragón	0	0	10	10
Total		1018	840	1061	883

En 2014 la capacidad instalada en los campos geotérmicos representó el 1.9% de la capacidad eléctrica instalada en México, considerando las centrales eléctricas despachadas por CFE para el servicio público de electricidad, que ascendieron a 54,372 MW.

La participación de la energía geotérmica en la generación eléctrica nacional en México fue un poco mayor (2.3%) considerando que el total nacional fue de 258,256 GWh (Gutiérrez & Lippman, 2016).

Esto indica que las plantas geotérmicas operaron a un factor de capacidad promedio más alto que el promedio del resto de las plantas conectadas a la red. A partir de 2015, la capacidad instalada geotérmica en México ha aumentado a 1061 MW, gracias a una nueva unidad de potencia de 50 MW puesta en marcha en Los Azufres en febrero, y las dos unidades de contrapresión instaladas en Domo San Pedro en febrero y marzo. En consecuencia, la capacidad efectiva o en funcionamiento aumentó a 883 MW, como se muestra en la Tabla 1 (Gutiérrez & Lippman, 2016).

En México, la Comisión Federal de Electricidad ha venido operando a la fecha cuatro campos geotérmicos de tipo hidrotermal con una capacidad instalada total de alrededor de 931 MW eléctricos (2016), suficientes para satisfacer la demanda de electricidad de unos dos millones de hogares mexicanos promedio (CeMIEGeo, 2018).

1.1.5 Tecnologías de generación de energía geotérmica

Los recursos geotérmicos adecuados para la generación de energía se pueden clasificar en tres grupos principales:

- 1) sistemas dominados por vapor con temperaturas $>240^{\circ}\text{C}$;
- 2) sistemas dominados por líquido con temperaturas de hasta 350°C ; y
- 3) recursos de roca seca petrotérmica o caliente con temperaturas de hasta 650°C .

De estos, los grupos 1 y 2 están relacionados con los sistemas hidrotermales convectivos que se explotan comercialmente en el mundo, mientras que el grupo 3 se refiere al proyecto de explotación de la roca seca caliente o sistemas geotérmicos mejorados (Lund, 2007).

La tecnología de conversión de energía utilizada para explotar los sistemas geotérmicos depende de las propiedades del yacimiento (por ejemplo, geológicas, geofísicas, geoquímicas, fisicoquímicas, termodinámicas, entre otras). Existen tres tipos de tecnologías maduras se han utilizado comercialmente y con éxito para la explotación de recursos geotérmicos, vapor seco (a compresión), flasheo (simple, doble y triple) y centrales de ciclo binario (Santoyo et al. 2017).

1.1.5.1 Tecnología de vapor seco

La temperatura del gradiente de la tierra conduce a embalses con altas temperaturas (>200°C). El vapor extraído de estos depósitos se transporta a una turbina de vapor que convierte la energía térmica en energía mecánica, que luego se envía a un generador desde donde se produce electricidad y se distribuye en la red (Fig. 9).

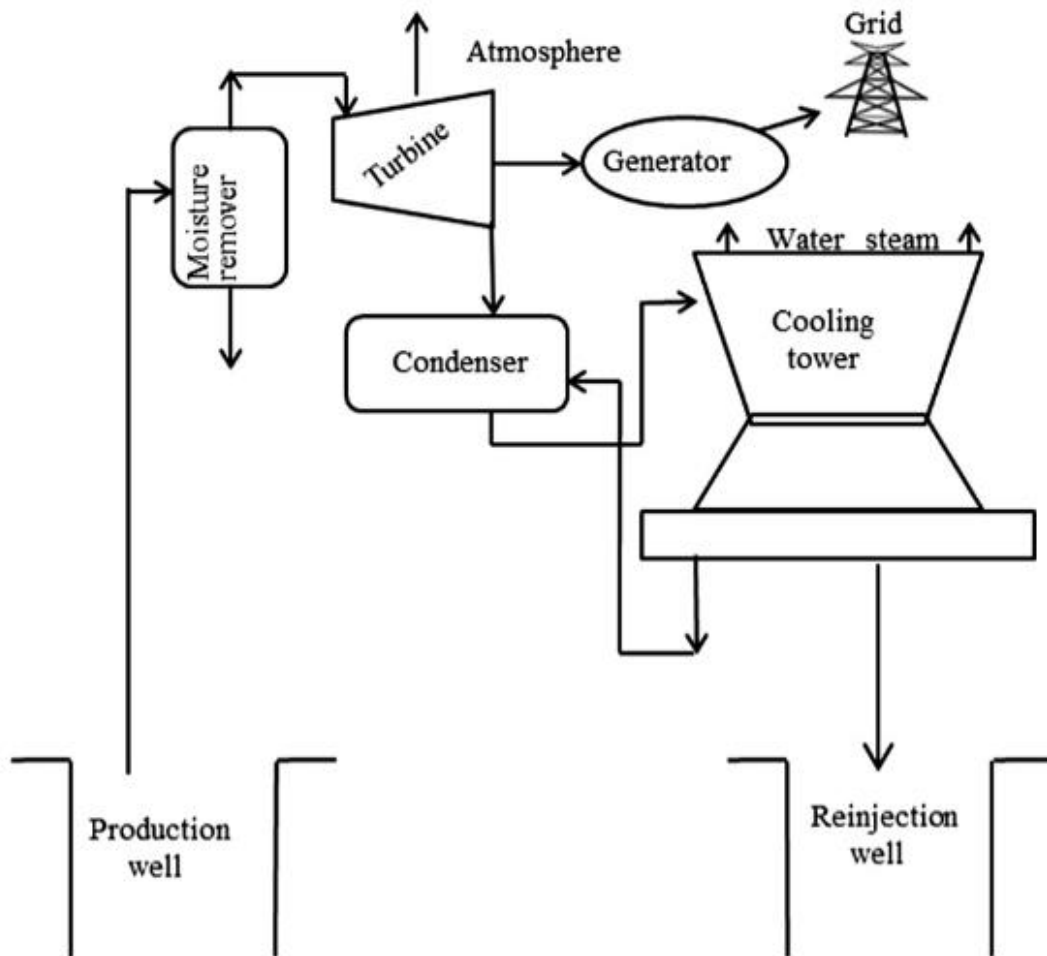


Fig. 9. Sistema de vapor seco (Santoyo et al. 2017).

1.1.5.2 Tecnologías Flasheo de Vapor

Si el fluido geotérmico en el depósito es una mezcla líquido-vapor, entonces se utiliza un proceso previo de separación comúnmente conocido como flasheo de vapor para la generación de energía. Basándose en las características de una mezcla termodinámica, el proceso de separación puede incluir una, dos o tres etapas, a saber, sistemas de flasheo simple, doble y triple flasheo, respectivamente. En este caso, el fluido geotérmico se extrae del pozo de producción y se envía a un separador ciclónico donde las fases de líquido y vapor de la mezcla se separan eficientemente debido a una diferencia de densidades (Fig.10A). El vapor primario pasa del separador a una turbina de vapor de expansión y finalmente a un generador para completar el proceso. La fase líquida restante (salmuera) obtenida del separador se envía a un pozo de reinyección o con el fin de aumentar la eficiencia de este proceso se añade una segunda etapa de separación, conocida como doble flasheo (Fig.10A); o dependiendo de la temperatura residual del fluido también se podría integrar una tercera etapa de separación en la instalación de la planta, que se conoce como plantas de triple flasheo (Fig.10B) (Valdimarsson, 2011).

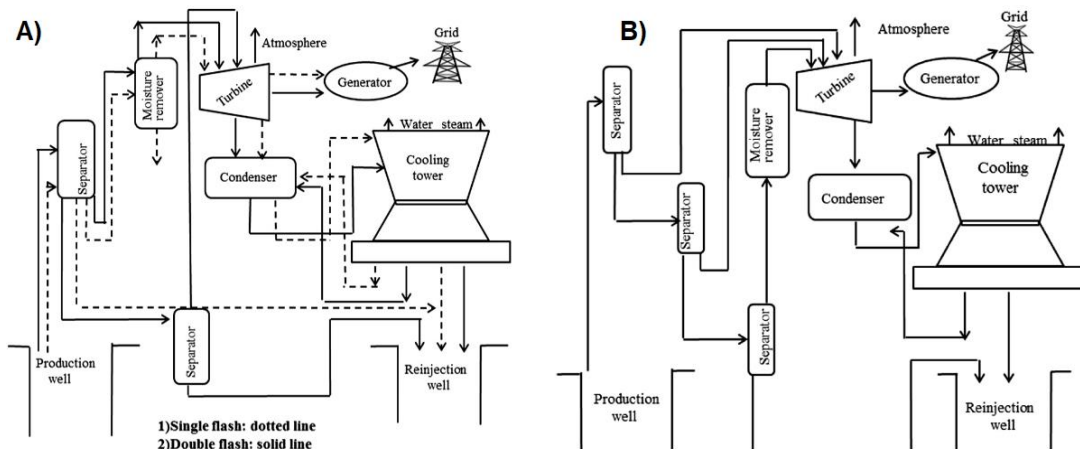


Fig.10. A) Sistema flasheo simple y doble flasheo, B) Sistema de triple flasheo (Santoyo et al. 2017).

1.1.5.3 Tecnología del ciclo binario

En este sistema, el geofluido no puede utilizarse directamente como en otras tecnologías debido a su baja temperatura. La energía térmica disponible en el geofluido puede utilizarse para vaporizar un fluido de trabajo, utilizando un ciclo termodinámico Rankine orgánico o Ciclo Kalina para producir electricidad. El proceso de transferencia de calor se produce en un intercambiador de calor desde donde se produce un vapor orgánico y se envía a un sistema de generación de turbo para producir electricidad. El vapor restante procedente de la turbina se envía a un condensador cuya salmuera se lleva al intercambiador de calor, cerrando así el ciclo termodinámico (Valdimarsson, 2011) (Fig. 11).

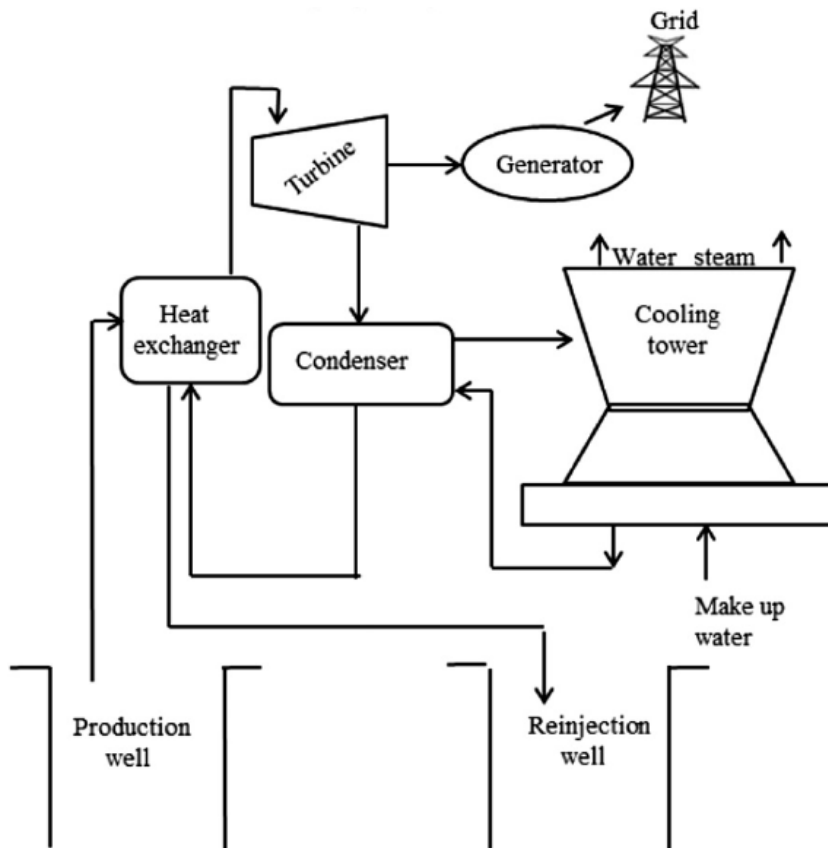


Fig. 11. Sistema de ciclo binario (Santoyo et al. 2017).

1.1.5.4 Sistemas geotérmicos mejorados

El proceso de generación de energía para la explotación de sistemas geotérmicos mejorados es generalmente el mismo que el descrito para plantas de ciclo binario. Estos sistemas están destinados a explotar los depósitos subterráneos profundos, ampliamente disponibles (rocas calientes, rocas calientes húmedas y rocas rotas), donde no existe suficiente agua y/o

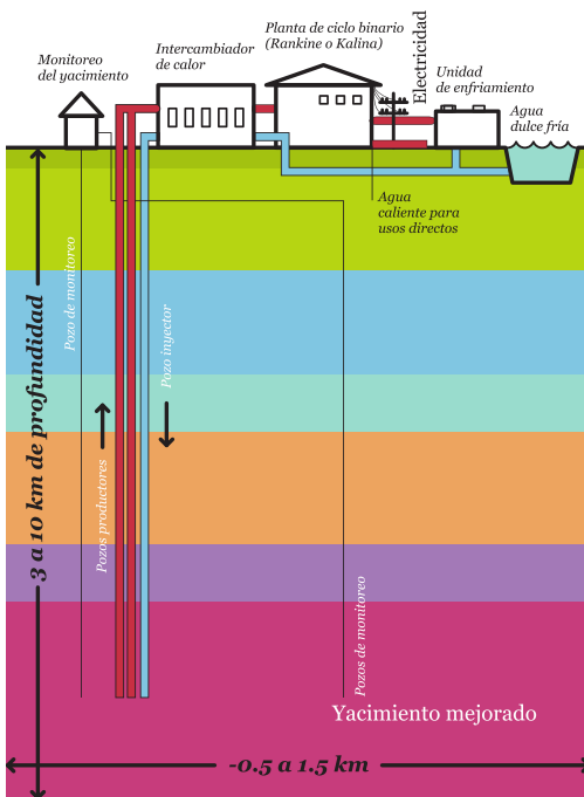


Fig. 12. Esquema de un sistema geotérmico mejorado.

la permeabilidad de la formación de rocas es baja (Breede et al. 2013).

Para explotar tales sistemas geotérmicos, se requiere un proceso mejorado en la permeabilidad de las rocas, ya sea abriendo fracturas preexistentes en la roca o formando otras nuevas para crear un depósito artificial. La energía térmica se explota generalmente inyectando agua, u otro fluido apropiado (por ejemplo, CO₂) en la roca fracturada caliente (o depósito artificial) para estimular

un intercambio de calor intenso y extraer la mayor parte de la energía disponible en la roca. A veces, hay circulación del líquido ya presente en la formación rocosa, que actúa como un bucle de fluido geotérmico. El fluido caliente se extrae de los pozos de producción y se bombea a una central instalada en la superficie para generar electricidad (Breede et al. 2013).

1.1.6 Análisis de Ciclo de Vida de las Tecnologías Geotermoeléctricas

Santoyo en 2017 realizó una revisión actualizada de los estudios ambientales del ciclo de vida para la generación de energía geotérmica por tipo de tecnología, de manera que podemos mencionar que (Sullivan & Wang, 2013) y (Bravi & Basosi, 2014) reportan estudios sobre la evaluación ambiental del ciclo de vida de las plantas de vapor seco. En el caso de las tecnologías de flasheo simple solo el trabajo realizado por (Bravi & Basosi, 2014) fue enfocado a la evaluación de impactos ambientales bajo una perspectiva de ciclo de vida. Con respecto a la tecnología de conversión de doble flasheo, varios autores han conducido estudios de sustentabilidad ambiental, entre los cuales destacan los trabajos reportados por (Hondo, 2005), (Karlsdottir et al. 2010), (Sullivan et al. 2010), (Marchand et al. 2015) y (Atilgan & Azapagic, 2016). Estos estudios han sido realizados considerando diferentes áreas geográficas: Japón, Islandia, Estados Unidos, Francia y Turquía, respectivamente. Finalmente, estudios de sustentabilidad ambiental orientados a la evaluación de plantas de ciclo binario fueron reportados por (Rule et al. 2009), (Gamboa et al. 2015) y (Sullivan et al. 2010).

De la compilación y análisis de los trabajos previos se pudo inferir que la mayoría de los estudios de ACV se han centrado sobre la evaluación del impacto del calentamiento global específico para el tipo de tecnología en análisis. Dentro de este contexto de impacto los análisis muestran que el consumo de diésel requerido para las etapas de construcción de los pozos geotérmicos es el principal factor responsable del impacto relacionado con el calentamiento global (Santoyo et al. 2017). La tabla 2 resume la información compilada, incluyendo los impactos ambientales principales, el método de evaluación de impacto y la unidad funcional usada para los estudios ACV.

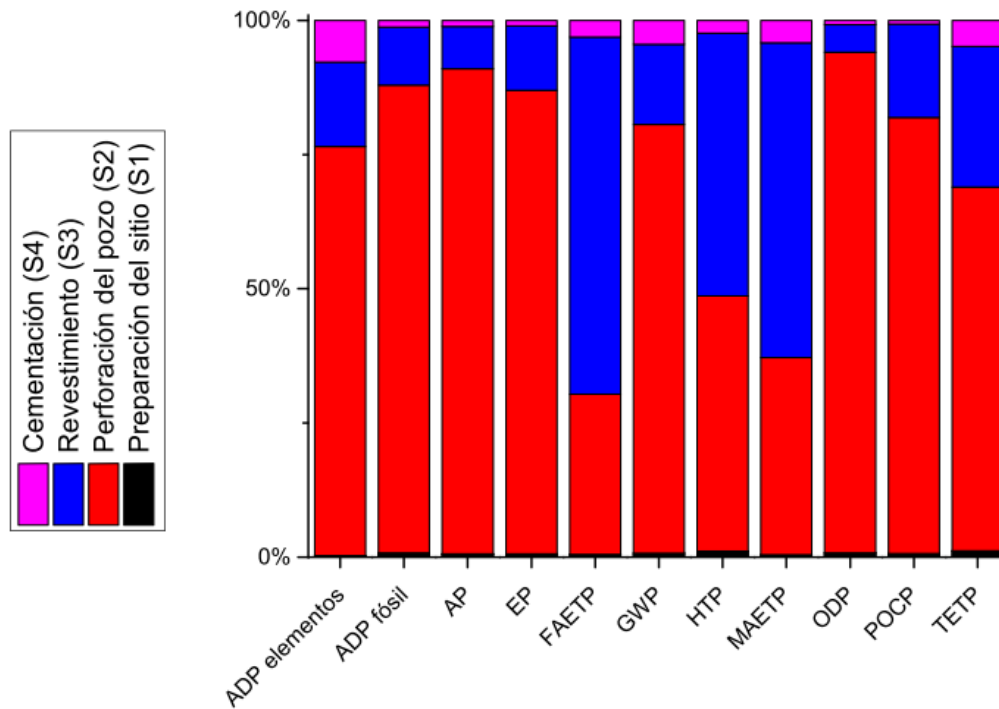
Tabla 2. Estudios de ACV para plantas de energía geotérmica (vapor seco, flasheo y ciclo binario).

Tecnología	Categorías de impacto	Método de evaluación de impacto	Software ACV	Unidad Funcional	Objetivo y alcance	País
Centrales de vapor seco y flash	1, 13	Emisiones de GEI agregadas en base a los valores de GWP	GREET	kWh	Evaluación comparativa de plantas de energía geotérmica, desde la cuna hasta la tumba	EE. UU.
Vapor seco y flash simple	1, 2, 3	CML,2002	Simapro 7.3	kWh	Evaluación ambiental de la producción de electricidad de las plantas de energía geotérmica, desde la cuna hasta la tumba.	Italia
Doble flash	1	LCE	NA	kWh	Evaluación comparativa de nueve tecnologías de generación de energía, desde la cuna hasta la tumba.	Japón
Doble flash	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11	CML2, 2000 CED	Simapro 7	kWh	Evaluación ambiental de la producción de energía geotérmica, desde la cuna hasta la tumba.	Islandia
Doble flash	1, 13	GHG agregado basado en el GWP del IPCC 2007	GREET v2.7	kWh	Evaluación comparativa de tecnologías geotérmicas y otras tecnologías de generación de electricidad, desde la cuna hasta la tumba.	EE. UU.
Doble flash	1, 2,4, 15-22	NA	NA	kWh	Evaluación ambiental de la producción de electricidad de las plantas de energía geotérmica, desde la cuna hasta la tumba.	Francia
Doble flash	1-8, 23, 24	CML 2001	Gabi v6	kWh	Evaluación comparativa de tecnologías geotérmicas y otras tecnologías de generación de electricidad, desde la cuna hasta la tumba.	Turquía
Ciclo Binario	1, 13	GHG agregado según el potencial de GWP del kWh IPCC 2007	GREET v2.7	kWh	Evaluación comparativa de tecnologías geotérmicas y otras tecnologías de generación de electricidad, desde la cuna hasta la tumba.	EE. UU.
Ciclo Binario	13, 14	Emisiones de CO2 agregadas	Simapro 7	kWh	Evaluación comparativa de cuatro tecnologías de energía renovable, desde la cuna hasta la tumba.	Nueva Zelanda
Ciclo Binario	1, 2, 4, 5, 6, 7, 11	CML 2001	Simapro 7	MWh	Evaluación ambiental de la producción de energía geotérmica, desde la cuna hasta la tumba.	España

1: potencial de calentamiento global; 2: potencial de acidificación; 3: potencial de toxicidad humana; 4: potencial de agotamiento abiótico; 5: potencial de eutrofización; 6: potencial de agotamiento de la capa de ozono; 7: potencial de eco toxicidad acuática de agua dulce; 8: potencial de eco toxicidad acuática marina; 9: potencial de ecotoxicidad terrestre; 10: potencial de oxidación fotoquímica; 11: demanda acumulada de energía (CED); 13: relación de energía (sin dimensiones); 14: emisiones de CO; 15: eutrofización en agua dulce; 16: eutrofización marina; 17: eutrofización terrestre; 18: ocupación agrícola y urbana; 19: cáncer de toxicidad humana; 20: toxicidad humana sin cáncer; 21: CED renovable; 22: CED no renovable; 23: potencial de creación de oxidante fotoquímico; 24: potencial de toxicidad terrestre

En el año 2016, a través de una investigación realizada como trabajo de tesis de maestría (Hernández, 2016) describió el caso de un proceso típico de perforación similar al practicado en campos geotérmicos de México, e introdujo la metodología de ACV para evaluar los impactos ambientales potenciales asociados con el proceso típico de construcción de pozos geotérmicos utilizados para la generación geotermoeléctrica en México. Este trabajo representa la primera aplicación de la metodología de ACV a las tecnologías geotérmicas en el país.

De este análisis se pudo concluir que, en las categorías de calentamiento global, agotamiento de recursos abióticos fósiles, ecotoxicidad terrestre, acidificación, eutrofización y creación de ozono fotoquímico están dominadas casi en su totalidad por las etapas de perforación y revestimiento. Esto fundamentalmente por causa de dos procesos: el diésel utilizado en el sistema de potencia como principal contribuyente y el acero usado para revestimiento de los pozos, siendo el segundo proceso con una contribución porcentual importante. En el caso del agotamiento de la capa de ozono, 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 tercera posición. En el caso de los potenciales de ecotoxicidad de agua dulce, toxicidad humana y ecotoxicidad de agua marina el orden de contribución se invierte, en primer lugar, está el acero, y en segundo lugar el diésel requerido para el sistema de potencia. En el agotamiento de recursos abióticos de elementos la mayor contribución está dada por la barita, que es un compuesto utilizado en la mezcla de los fluidos geotérmicos necesarios en la perforación del pozo geotérmico (ver Fig. 13).



ADP, potencial de agotamiento de recursos abióticos; AP, potencial de acidificación; EP, potencial de eutrofización; FAETP, potencial de ecotoxicidad acuática de agua dulce; WGP, potencial de calentamiento global; HTP, potencial de toxicidad humana; MAETP, potencial de ecotoxicidad acuática marina; ODP, potencial de agotamiento de la capa de ozono; POCP, potencial de creación de ozono fotoquímico; TETP, potencial de ecotoxicidad terrestre.

Fig. 13. Impactos ambientales de ciclo de vida de la construcción de un pozo en una planta geotermoeléctrica por etapa (Hernández, 2016).

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 caustica y la harina sílica tienen contribuciones por lo general por debajo del 1% (ver Fig. 14).

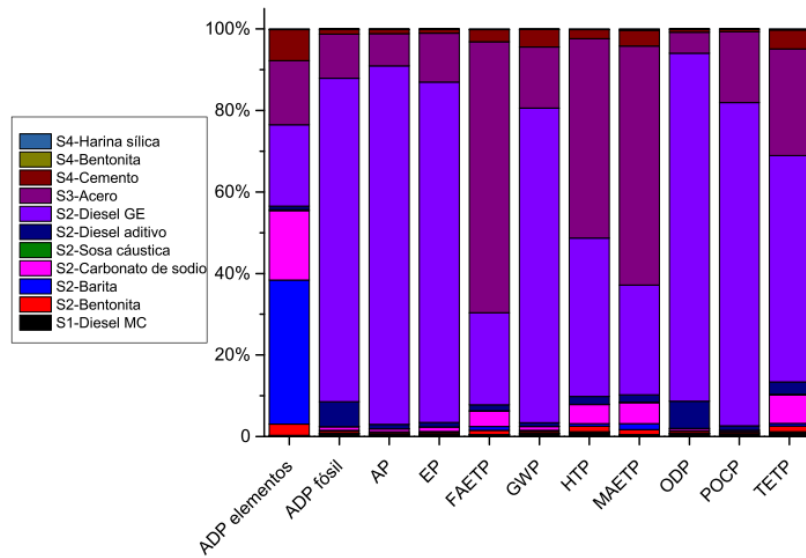


Fig. 14. Impactos ambientales de ciclo de vida de la construcción de un pozo en una planta geotermoelectrica por proceso de producción de los recursos (Hernández, 2016).

En esta investigación, se detectó al diésel quemado en el sistema de potencia para producir electricidad como el proceso con mayor aporte a la mayoría de las categorías de impacto, por lo que se propone realizar un análisis de factibilidad ambiental, económico y técnico para sustituir el diésel quemado en el sistema de potencia por biodiésel.

1.2 Planteamiento del Problema

Los problemas relacionados con la energía y la contaminación ambiental que afrontan nuestro mundo han inspirado gran interés en el desarrollo y uso de los recursos energéticos renovables a nivel mundial, la energía geotérmica, una fuente de energía renovable, es una alternativa respetuosa con el medio ambiente y es una opción importante para resolver los problemas energéticos y ambientales de los sistemas de energía basados en combustibles fósiles.

1.3 Justificación

Hoy en día es de suma importancia el incremento gradual de la participación de las energías renovables en la industria eléctrica con el objetivo de cumplir las metas de generación de energías limpias y reducción de emisiones.

La energía geotérmica es una energía renovable usada para la generación de electricidad, por lo que el estudio de los distintos sistemas geotérmicos mediante el análisis de ciclo de vida es de mucha importancia.

En la actualidad se usa energía fósil (diésel) en la construcción de pozos geotérmicos; por lo cual, se propone el uso de biodiésel para minimizar los impactos ambientales en la etapa de perforación de pozos.

1.4 Hipótesis

El uso de diésel requerido para la construcción de pozos geotérmicos produce un impacto significativo al medio ambiente. Este proyecto propone que, a partir del uso de biodiésel como reemplazo del combustible fósil, se reducirán los impactos ambientales en la etapa de perforación del pozo.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General:

- Evaluar la sustentabilidad ambiental mediante la metodología “Análisis de Ciclo de Vida” del proceso de construcción de pozos geotérmicos usando biodiésel.

1.5.2 Objetivos Específicos:

- Realizar una revisión en el estado del arte de la evaluación ambiental de la construcción de pozos geotérmicos.
- Evaluar la sustentabilidad ambiental de la construcción de pozos geotérmicos utilizando biodiésel en la etapa de perforación.
- Realizar un análisis comparativo entre el uso de diésel (convencional) y biodiésel (propuesta) para la construcción de pozos geotérmicos.
- Generar propuestas como alternativas de mejoras ambientales.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1 Plantas geotermoeléctricas y pozos geotérmicos

Una planta termoeléctrica convencional, como las que generan tres cuartas partes de la energía eléctrica que se consume en México, consta básicamente de cuatro elementos fundamentales: una caldera para hervir agua y generar vapor con alta presión y temperatura; una turbina, cuyos álabes se mueven al ser impulsadas por ese vapor; un generador, que recibe el movimiento de los álabes de la turbina y que convierte la energía mecánica en energía eléctrica, y una subestación eléctrica, cuyo transformador eleva el voltaje de la energía producida en el generador hasta alcanzar la tensión requerida para su transmisión. Las diferencias entre estas plantas termoeléctricas se basan en el tipo de combustible que se utiliza para calentar el agua de la caldera. Las plantas geotermoeléctricas, por su parte, no requieren de una caldera para producir vapor de agua, sino que aprovechan el producido por la naturaleza en los yacimientos geotérmicos (Romero et al. 2011).



Fig. 15. Esquemas de generación geotermoeléctrica
(<http://slideplayer.es/slide/161096/2/images/35/Energia+geotermica.jpg>).

2.2 Proyecto Geotermoeléctrico

Las tres etapas importantes para desarrollar una instalación de energía geotérmica son (Sullivan & Wang, 2013):

1. La exploración y el desarrollo de campos geotérmicos.
2. La construcción de plantas de energía geotérmica.
3. La operación de la planta para generar electricidad.

En México, de acuerdo con la Ley de Energía Geotérmica, se pueden considerar 2 etapas principales en la planeación de un proyecto geotermoeléctrico:

1. Exploración del campo geotérmico.
2. Explotación del campo geotérmico.

La etapa de exploración del campo geotérmico es el conjunto de actividades que contribuyen al conocimiento geológico, geofísico y geoquímico del área geotérmica; así como las obras y trabajos realizados en superficie y en el subsuelo, con el objeto de corroborar la existencia del recurso geotérmico y delimitar el área geotérmica, dentro de las cuales se encuentra el acondicionamiento del sitio, obras civiles asociadas, montaje de maquinaria y equipo, perforación y terminación de pozos exploratorios geotérmicos.

La etapa de explotación del campo geotérmico es el conjunto de actividades, con fines comerciales, que permiten obtener energía eléctrica y otros aprovechamientos por medio del calor del subsuelo, a través de la perforación de pozos, o cualquier otro medio, incluyendo las demás obras necesarias para la construcción, extracción, puesta en marcha, producción y transformación del recurso geotérmico (Cámara de Diputados, 2014).

2.2.1 Preparación de Sitio

Durante la etapa inicial de preparación del sitio, se desarrollarán las actividades cuyas características principales son desmonte, despalme, excavación, compactación, nivelación, cortes y rellenos (SEMARNAT & CFE, 2014).

2.2.2 Perforación del pozo

Una vez acondicionada la infraestructura necesaria como son los caminos de acceso, las plataformas de perforación y las presas de residuos o de lodos, la etapa de perforación se inicia con el armado del equipo de perforación y la instalación sobre la plataforma (SEMARNAT & CFE, 2014).

2.2.2.1 Sistemas utilizados en la perforación

Los cinco sistemas utilizados en la perforación son:

- 1. Sistema rotatorio:** está formado por la unión giratoria, mesa rotatoria, flecha, sarta de perforación que a su vez está compuesta por tubería de perforación, tubería de perforación pesada, barrena, collares de barrena, las trabarrenas y estabilizadores que le dan peso y estabilidad, respectivamente a la barrena y accesorios para la perforación (SEMARNAT & CFE, 2014).
- 2. Sistema de circulación:** es un sistema cerrado por medio del cual el lodo se bombea de los tanques de almacenamiento al pozo, por la tubería de revestimiento (TR). Los equipos que componen el sistema son tres compresores autónomos a base de diésel con capacidad mínima de bombeo de 28 m³/min, dos tanques para almacenamiento y preparación del fluido, con capacidad de 60 m³ cada uno, dos bombas

de lodo, dos bombas centrífugas auxiliares, mangueras de conducción de lodos, una torre de enfriamiento, equipos para mezclado, desarenador, zaranda vibratoria y, bodega para el almacenamiento de los sacos de bentonita y aditivos (SEMARNAT & CFE, 2014).

3. **Sistema de potencia:** integrado por cuando menos tres motores principales de combustión interna diésel los cuales impulsan el malacate, mueven el sistema rotatorio y las bombas de circulación, dos unidades generadoras diésel de 75 y 100 kW para el suministro de energía eléctrica que requiere la casa de máquinas y, dos tanques de almacenamiento de combustible de 20 m³ cada uno (SEMARNAT & CFE, 2014).
4. **Sistema de control superficial o de prevención:** El objeto de este sistema es prevenir flujos espontáneos de vapor durante la perforación, dispone de, cabezal de 508 mm (20 plg) de diámetro, tres preventores tipo cameron con bridas de 305 y 340 mm (12 y 13 3/8 plg) serie 900, capaces de resistir presiones de hasta 21 MP (3 000 lb_f/plg²) y un control remoto para accionar preventores con una bomba Kooney (SEMARNAT & CFE, 2014).
5. **Sistema de izaje:** se compone de mástil, torre de perforación, malacate en el que se enrolla y desenrolla el cable de perforación y mediante el que se sostiene a la sarta, corona, polea viajera, con gancho para soportar una masa máxima de 300 toneladas y cable de perforación (SEMARNAT & CFE, 2014).

La Fig.16 muestra un esquema del equipo empleado en la perforación de pozos geotérmicos.

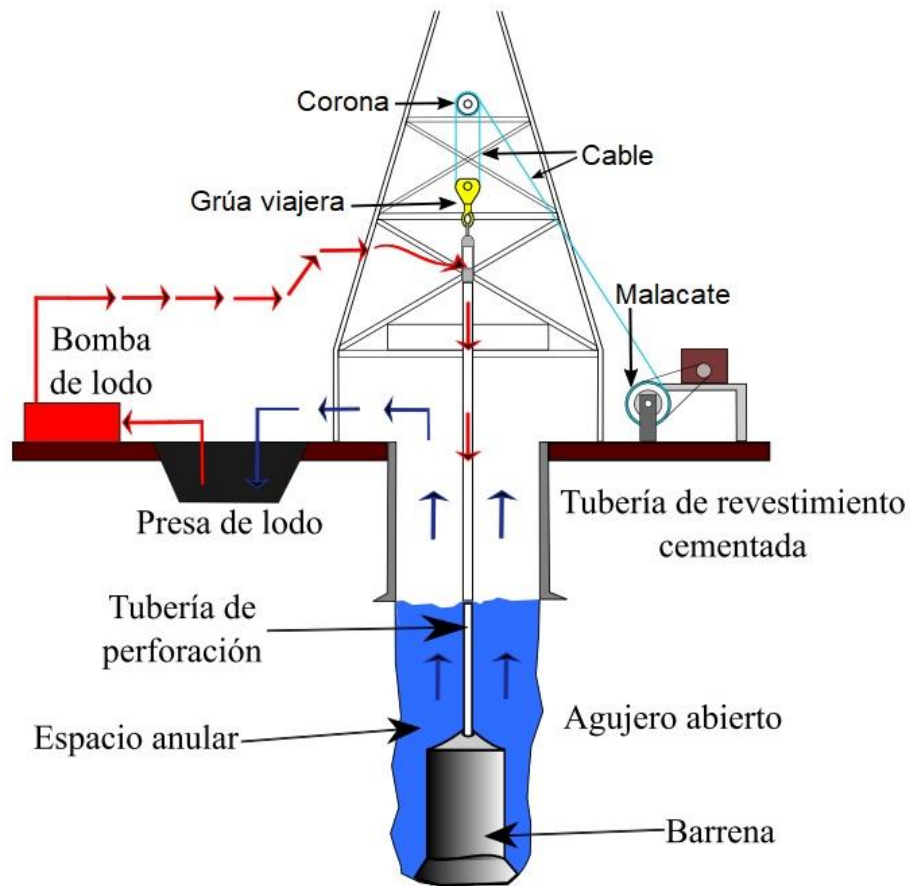


Fig. 16. Esquema general del equipo de perforación (Hernández, 2016).

2.2.3 Revestimiento de pozo

La perforación se inicia con un agujero de un metro de diámetro y una profundidad de cinco metros, en el cual se instala el tubo conductor de forma anular. Este tubo tiene un diámetro interior de 762 mm, el resto es espacio anular que se llena por gravedad de cemento normal.

La siguiente actividad es la perforación hasta los 30 metros de profundidad, para instalar la tubería de revestimiento de 508 mm de diámetro, llamada tubería superficial, el espacio exterior vacío se llena de cemento modificado, con el fin de que ésta quede firmemente anclada a las paredes del agujero.

La siguiente fase es la perforación del agujero hasta los 430 metros de profundidad. Se procede a instalar la tubería de anclaje de 340 mm seguida de la cementación. De esta forma la tubería de anclaje quedará cementada en los primeros 30 metros con la TR de 508 mm y en el resto de su longitud con la pared del pozo.

En la siguiente etapa se perfora el pozo hasta los 1,430 metros de profundidad. En este tramo se instalará y cementará la tubería de producción de 244 mm, desde la superficie hasta unos cuantos metros (5 m) antes del fondo del agujero. De esta forma, la tubería de producción quedará cementada los primeros 430 metros con la tubería de anclaje y los 1,000 metros restantes con la pared natural del pozo.

En la última fase, se perforará hasta encontrar la zona productora o antes si se descubren condiciones atractivas de presión y temperatura. A partir de los 1,430 metros de profundidad y hasta el final del pozo se instala tubería de 178 mm de diámetro. Ésta se caracteriza por tener ranuras verticales en toda su longitud para permitir el acceso del fluido geotérmico. Las características de un pozo geotérmico como el que se acaba de mencionar se pueden observar en la Fig. 17.

2.2.4 Cementación del pozo

La cementación se lleva a cabo utilizando la unidad cementadora de alta presión, con que se hace fluir el cemento hasta la parte inferior del tubo y ascender por el exterior de este y la pared natural del pozo hasta llegar a la superficie. Terminada esta actividad se efectúa la prueba hidráulica para corroborar la homogeneidad de la cementación, si ésta no se logra, será necesario cementar nuevamente.

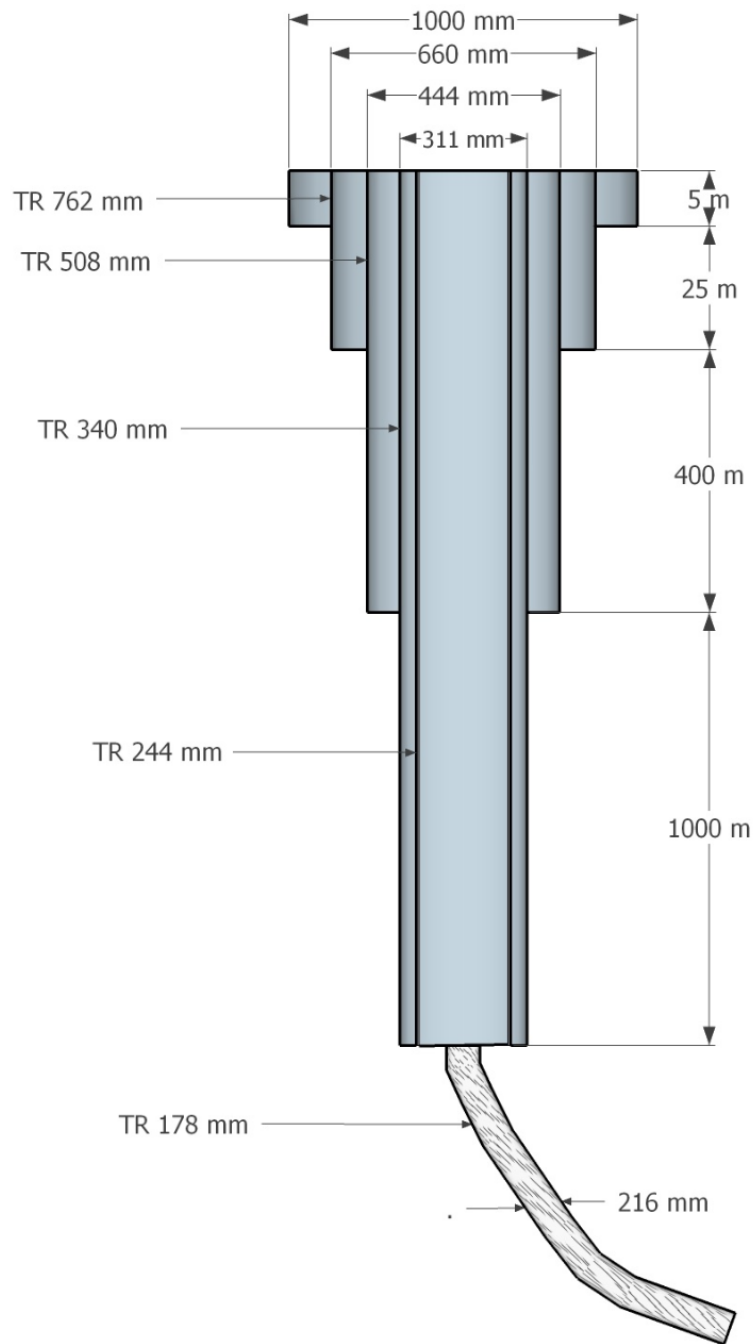


Fig. 17. Esquema representativo de la geometría del pozo perforado (Hernández, 2016).

2.3 Análisis de Ciclo de Vida

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una técnica desarrollada debido al creciente interés por el desarrollo de métodos para comprender mejor y tratar los posibles impactos asociados con los productos para lograr la protección ambiental (ISO, 2006). ACV es la única herramienta de evaluación ambiental estandarizada internacionalmente (ISO 14040 e ISO 14044) para sistemas de productos, incluyendo servicios y procesos. El análisis se realiza «desde la cuna hasta la tumba», es decir, durante todo el ciclo de vida, desde la adquisición de la materia prima, pasando por la producción, uso, tratamiento final, reciclado, hasta su disposición final. El ACV es esencialmente un método comparativo de diferentes sistemas que cumplen la misma función (con el mismo propósito) en base a una «unidad funcional» (Klöpffer, 2005).

Un ACV puede ayudar en:

- ✓ Identificar oportunidades para mejorar el desempeño ambiental de productos en las distintas etapas de su ciclo de vida,
- ✓ Aportar información a quienes toman decisiones en la industria, organizaciones gubernamentales o no gubernamentales,
- ✓ Seleccionar los indicadores de desempeño ambiental pertinentes, incluyendo técnicas de medición, y
- ✓ Marketing o comercialización con certificación de productos o tecnologías.

Las cuatro fases en un estudio de ACV son las siguientes (Fig. 18):

- Definición del objetivo y del alcance,
- Análisis del inventario,
- Evaluación del impacto, e
- Interpretación.

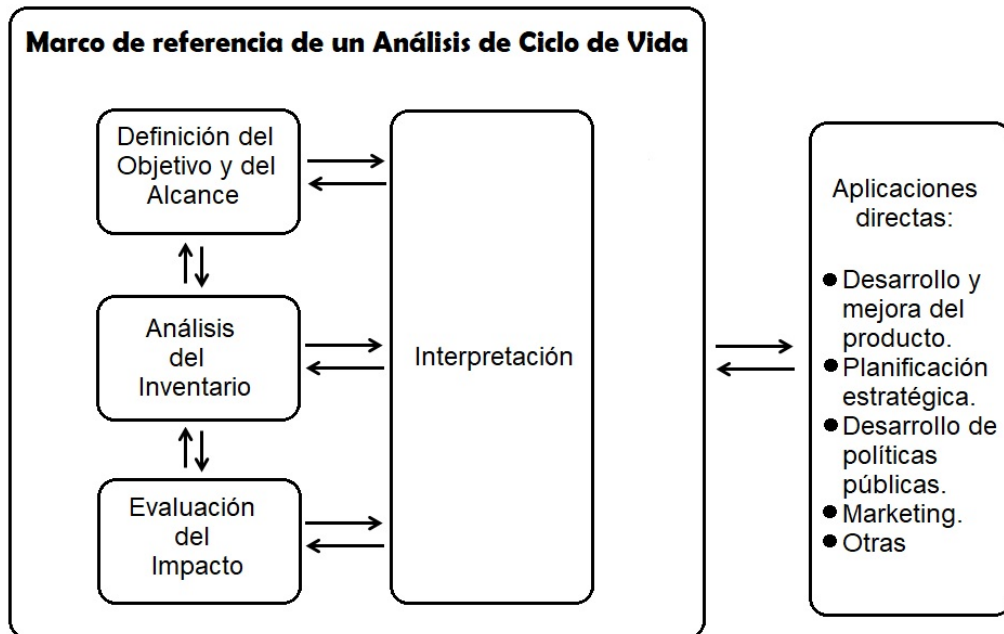


Fig. 18. Etapas de un Análisis de Ciclo de Vida (ISO, 2006).

2.3.1 Definición del objetivo y el alcance

El objetivo de un ACV establece la aplicación prevista y las razones para realizar el estudio, así como el público previsto, es decir las personas a quienes se prevé comunicar los resultados del estudio y utilizar los resultados en aseveraciones comparativas que se divulgarán al público.

El alcance de un ACV debería estar suficientemente bien definido para asegurar que la amplitud, profundidad y el nivel de detalle del estudio sean compatibles y suficientes para alcanzar el objetivo establecido.

El alcance incluye el sistema del producto a estudiar, las funciones del sistema del producto, la unidad funcional, los límites del sistema, los procedimientos de asignación, las categorías de impacto seleccionadas y la metodología de evaluación de impacto, la subsecuente interpretación a utilizar, requisitos relativos a los datos, las suposiciones, las limitaciones, los

requisitos iniciales de calidad de los datos, el tipo de revisión crítica, el tipo y formato del informe requerido para el estudio (ISO, 2006).

2.3.2 Análisis de Inventario

El análisis del inventario implica la recopilación de los datos y los procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas pertinentes de un sistema del producto. La realización de un análisis de inventario es un proceso iterativo. A medida que se recopilan los datos y se aprende más sobre el sistema, se pueden identificar nuevos requisitos o limitaciones, que requieran cambios en los procedimientos de recopilación de datos, de manera que aún se puedan cumplir los objetivos del estudio. Algunas veces, se pueden identificar algunos asuntos que requieren una revisión del objetivo o del alcance del estudio (ISO, 2006).

2.3.3 Evaluación de Impacto

La fase de evaluación de impacto de ciclo de vida (EICV) tiene como propósito evaluar cuán significativos son los impactos ambientales potenciales utilizando los resultados del inventario de ciclo de vida (ICV). En general, este proceso implica la asociación de los datos de inventario con las categorías de impactos ambientales específicos y con los indicadores de esas categorías, para entender estos impactos. La evaluación del impacto puede incluir un proceso iterativo de revisión del objetivo y del alcance del estudio de ACV para determinar si se han cumplido los objetivos de este, o para modificar el objetivo y el alcance si la evaluación indica que no se pueden alcanzar. Los elementos de la evaluación de impacto de un ACV se muestran en la Fig. 19.

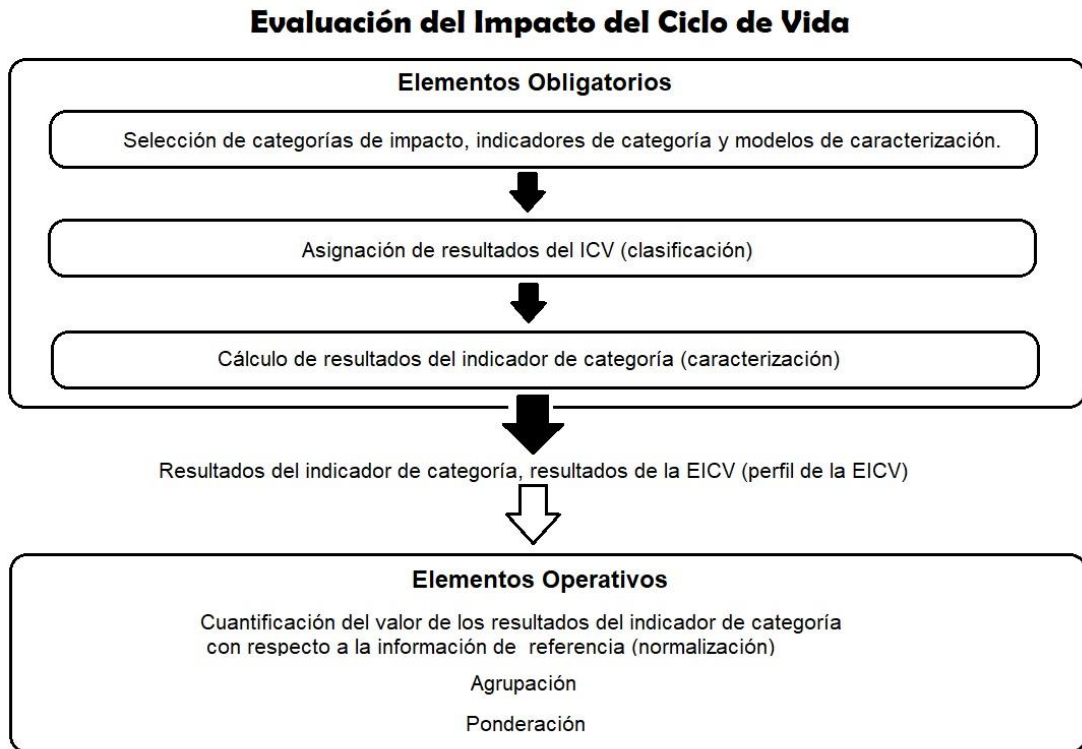


Fig. 19. Elementos de la Evaluación de Impacto de un Análisis de Ciclo de Vida (ISO, 2006).

2.4.4 Interpretación

La interpretación es la fase del ACV, en la cual los hallazgos del análisis del inventario y de la evaluación de impacto se consideran juntos. La fase de interpretación debería proporcionar resultados que sean coherentes con el objetivo y el alcance definidos, que lleguen a conclusiones, expliquen las limitaciones y proporcionen recomendaciones.

La interpretación del ciclo de vida es la fase final del procedimiento de ACV, en la cual se resumen y discuten los resultados del ICV o del EICV o de ambos como base para las conclusiones, recomendaciones y toma de decisiones de acuerdo con el objetivo y alcance definidos.

2.4 Software para ACV

Varios programas comerciales de software han sido desarrollados para realizar los estudios de ACV, entre los cuales destacan por su uso más frecuente SimaPro® y GaBi®.

GaBi® es un software de modelado y evaluación de sistemas de productos que apareció por primera vez en el mercado en 1992, desarrollado y distribuido en todo el mundo por PE INTERNATIONAL, empresa alemana. Del mismo modo, SimaPro es software de modelado y evaluación de sistemas de productos, lanzado en 1990, y también se vende en todo el mundo; SimaPro® es desarrollado y distribuido por PRe Consultants, con sede en Holanda. Ambas herramientas de software incluyen: a) una interfaz de usuario para modelar el sistema del producto; b) una base de datos de proceso de unidad de ciclo de vida; c) una base de datos de evaluación de impacto con datos que soportan varias metodologías de evaluación de impacto de ciclo de vida; y d) bases de datos de acuerdo con el modelado del sistema del producto en la interfaz de usuario (Herrmann & Moltesen, 2015).

El software GaBi® es propuesto como una herramienta alternativa para apoyar la sostenibilidad de productos de próxima generación con una capacidad de análisis potente para la evaluación su ciclo de vida (Thinkstep, 2018). GaBi® modela cada elemento de un producto o sistema desde una perspectiva de ciclo de vida, equipando a las empresas para que tomen las mejores decisiones sobre la fabricación y ciclo de vida de cualquier producto. También proporciona una base de datos de contenido de fácil acceso y actualizada constantemente que detalla los costos, la energía y el impacto ambiental de la obtención y el refinado de cada materia prima o componente procesado de un artículo fabricado. Este software comercial facilita a las empresas la realización de evaluaciones del ciclo de vida con el fin de

proteger sus activos más preciados; su marca y también les permite ofrecer productos más sostenibles pero eficaces que satisfacen mejor las expectativas del consumidor (Thinkstep, 2018).

La elección de este software es debido a que la base de datos GaBi es hoy una de las mayores bases de datos de ACV en el mercado y contiene más de 7.000 perfiles de inventario listos para el uso del ciclo de vida, incorpora las bases de datos más importantes para ACV (GaBi Professional) y bases de datos adicionales, como Ecoinvent, ILCD-ELCD, US LCI, etc., así como también permite utilizar las metodologías de evaluación de impacto más importantes y actualizadas, como: ILCD 2011 Midpoint+, CML – IA baseline, ReCiPe 2016, IPCC 2013 y Traci 2.1.

2.5 Biodiésel

Existe una preocupación tecnológica tanto de la demanda de energía como de los problemas de suministro, la sustitución de los recursos energéticos derivados de combustibles fósiles, el impacto perjudicial en el medio ambiente debido a la combustión de combustibles fósiles, la inestabilidad de la demanda y la oferta de combustibles, y el costo de producción de los productos derivados del petróleo. Actualmente, los investigadores están buscando un combustible alternativo que sea respetuoso del medio ambiente, disponible en el mercado y técnicamente factible (Palash et al. 2013).

En el proceso de búsqueda de estos combustibles amigables con el medio ambiente, la producción de biodiésel ha sido conceptualizada como una solución energética debido a que presenta propiedades funcionales similares a las del combustible diésel. El biodiésel es biodegradable, no explosivo, renovable, no altamente inflamable, no tóxico y también favorable al medio ambiente (Lee et al. 2013).

La principal ventaja de usar biodiésel es que, puede ser utilizado en forma pura o en forma mezclada con diésel sin detrimento de sus propiedades de combustión (Jain & Sharma, 2011).

El biodiésel se puede producir a partir de diferentes tipos de aceites vegetales (por ejemplo, colza, soya, canola, girasol, aceite de palma, etc.) (Sharma & Singh, 2009). La transesterificación se considera como uno de los métodos más eficientes para producir biodiésel a partir de aceites vegetales debido a su bajo costo y simplicidad (Roy et al. 2013).

2.5.1 Estudios de ACV aplicados a la producción de biodiésel

Algunos enfoques del análisis de ciclo de vida de la producción de 1 tonelada de biodiésel de *Jatropha* para evaluación de sus emisiones de energía y de gases de efecto invernadero (GEI) han sido ya reportados en la literatura. La reducción de emisiones de GEI con respecto al diésel de petróleo para la generación de 1GJ de energía varió del 40% al 107%. Además, dependiendo del método de asignación, los valores de reducción de GEI variaron de 50% a 107% y de 40% a 93% para los escenarios irrigados y de lluvia, respectivamente (Kumar et al. 2012).

En otro estudio ACV se compararon las características de combustión, rendimiento y emisión del diésel convencional y del biodiésel producido a partir del aceite de soya y sus mezclas. A partir de estos estudios, se encontró que el biodiésel reduce significativamente el monóxido de carbono (del 28 al 46%) y los hidrocarburos totales no quemados, mientras que las emisiones de óxidos de nitrógeno (6.95-17.62%) y dióxido de carbono (1.46-5.03%) aumentaron ligeramente, (Özener et al. 2014), algunos investigadores han propuesto que el contenido de oxígeno del biodiésel es un factor importante en la formación de NO_x porque provoca un aumento de las temperaturas locales debido al exceso de oxidación de hidrocarburos, y

cuando los niveles de oxígeno aumentan, la temperatura máxima durante la combustión aumenta y la formación de NO_x también aumenta (Beatrice et al. 1996) (Song et al. 2002).

(Nanaki & Koroneos, 2012) realizó otros estudios en Grecia en donde se compararon los impactos ambientales causados por el uso de gasolina, diésel y biodiésel utilizando el ACV como herramienta de evaluación metodológica. Desde el punto de vista ambiental, el biodiésel parece ser más atractivo ya que su uso da lugar a reducciones significativas de las emisiones de GEI en comparación con la gasolina y el diésel. Asimismo, parece tener menores emisiones de metano. Sin embargo, el uso de biodiésel como combustible de transporte aumenta las emisiones de óxido nitroso, óxidos de nitrógeno, así como nutrientes tales como nitrógeno y fósforo; estos últimos son los principales agentes de eutrofización.

2.5.2 Escenario de la Producción de Biodiésel en México

En 2016 la producción nacional de energía primaria fue de 7,714.23 PJ, 6.6% menor respecto al 2015. El sistema energético mexicano se basa en combustibles fósiles; que en el año 2016 suministraron el 86.79% de la energía primaria (62.57% del petróleo, 23.07% del gas natural y 1.14% de condensados) (SENER, 2016). México ocupa el 13° lugar en términos absolutos entre los países emisores de GEI (Boden & Andres, 2018). Algunos estudios citan que la seguridad energética nacional parece estar en riesgo (García et al. 2015), de tal forma que el gobierno mexicano está trabajando en la transformación del sector; donde una de las áreas de transformación sobre las cuáles tendrá un impacto la reforma es el diversificar proyectos que busca detonar proyectos adicionales a la extracción de crudo, que puedan derivar en un beneficio para el país, como un mayor

aprovechamiento del potencial de energía renovable con el que cuenta el territorio nacional, proyectos de extracción y transporte de gas natural, diversificar las fuentes de energía, etc. (SENER, 2014).

En el caso del biodiésel del aceite de palma, los estudios indican emisiones de GEI en el ciclo de vida de aproximadamente 25 gCO₂e/MJ sin los impactos del uso y cambio de la tierra, y hasta 39 gCO₂e/MJ (es decir, un sumidero de carbono) cuando las plantaciones se establecen en los pastizales. Para el caso del sorgo, se espera que el potencial de mitigación sea menor que la caña de azúcar y el biodiésel de palma, mientras que la *jatropha curcas* puede tener resultados mixtos (García et al. 2015). Esto se debe a que los valores de mitigación en comparación con los combustibles fósiles varían de 9 a 29% para el etanol de sorgo y de 30 a 80% para el biodiésel de *jatropha curcas* (excluyendo las emisiones de impactos del uso y cambio de la tierra). Tomando en consideración estos antecedentes (García et al. 2015), resalta la importancia de realizar estudios de ACV de los combustibles fósiles frente a las opciones de bioenergía en México, principalmente con opciones para biocombustibles líquidos. Estos estudios deberían compartir una metodología común y un conjunto de suposiciones, ya que los resultados del ACV varían mucho dependiendo de consideraciones tales como los límites del sistema, la unidad funcional, el tratamiento de los coproductos, las emisiones de impactos de los usos y los cambios en la tierra, entre otros.

Capítulo 3. Evaluación de la Sustentabilidad Ambiental de la Construcción de Pozos Geotérmicos

En el presente capítulo se reporta la descripción metodológica del análisis de ciclo de vida (ACV). En este proyecto se presenta el caso de la evaluación ambiental del proceso de construcción de pozos geotérmicos profundos.

3.1 Definición de objetivo y alcance

3.1.1 Objetivo

El objetivo de este estudio es determinar los impactos ambientales potenciales de la construcción de pozos geotérmicos utilizando biodiésel en la etapa de perforación, y realizar un análisis comparativo contra el uso tradicional de diésel; esperando que el estudio sirva para la innovación de la industria geotérmica y ayude como guía a los tomadores de decisiones dentro de este sector para buscar reducir o mitigar los impactos ambientales de este proceso.

3.1.2 Alcance

3.1.2.1 Descripción y función del sistema

Se realiza el estudio de la construcción de pozos geotérmicos que tiene como primer producto de salida generar electricidad a partir del aprovechamiento de los recursos geotérmicos, el sistema del proceso a estudiar está conformado básicamente por cuatro etapas (Fig. 20):

- Etapa 1. Preparación del Sitio
- Etapa 2. Perforación de Pozos
- Etapa 3. Revestimiento
- Etapa 4. Cementación-Terminación del Pozo

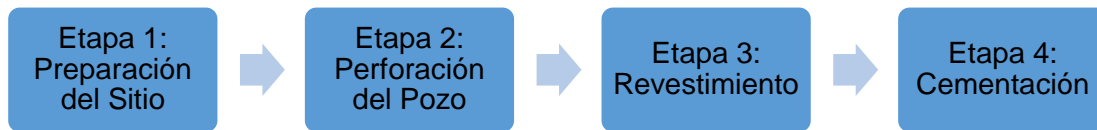


Fig. 20. Sistema de la construcción de pozos geotérmicos

3.1.2.2 Unidad Funcional

Como unidad funcional se ha definido la generación de 1 kWh producido durante el ciclo de vida de una planta geotermoeléctrica tipo flasheo simple tipificada por una vida útil de 30 años (Hernández, 2016).

3.1.2.3 Método de Evaluación

El método seleccionado para hacer la evaluación de los impactos ambientales fue CML (CML es un Instituto de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Leiden), debido a que satisface los elementos obligatorios de clasificación y caracterización de la evaluación de impacto. Además, las categorías de impacto evaluadas por el método CML son aceptadas internacionalmente y los métodos utilizados son científica y técnicamente validos (Chargoy et al. 2013); las categorías de impacto a analizar son el potencial de agotamiento de recursos abióticos, el potencial de acidificación, el potencial de eutrofización, el potencial de ecotoxicidad acuática de mar y agua dulce, el potencial de calentamiento global, el potencial de toxicidad humana, el potencial de agotamiento de la capa de ozono, el potencial de creación de ozono fotoquímico y el potencial de ecotoxicidad terrestre.

La base de datos utilizada fue la Ecoinvent v3.1, ya que Ecoinvent contiene inventarios de ciclo de vida internacionales en una gran variedad de procesos y presenta una base de datos global que soporta ICV regionalizados incrementando la relevancia de la base de datos para evaluaciones fuera de Europa.

3.1.2.4 Suposiciones y limitaciones

Para este estudio se han adoptado las mismas consideraciones mencionadas en el análisis previo realizado por (Hernández, 2016), para lo cual se ha considerado: (i) un campo geotérmico hipotético con 23 pozos de producción en operación que alimentan 9 unidades de flasheo simple para tener una capacidad de operación de 51.8 MWe con los cuales se producen 462.1 GWh al año; (ii) Se asume además que durante los 30 años considerados de ciclo de vida para el campo geotérmico, 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; y (iii) se considera que la producción de electricidad no varía durante los 30 años de operación de la planta y se mantiene constante cada año (Hernández, 2016).

En el sistema de estudio descrito no se incluyen las actividades de pre-perforación, entendiéndolas como las tareas empleadas para identificar zonas promisorias y evaluar si su potencial geotérmico es comercialmente viable de explotación (Hernández, 2016).

No se está considerando la maquinaria pesada necesaria para la preparación del sitio de perforación ni la maquinaria instalada en la plataforma de perforación, solo el diésel requerido para su funcionamiento. De acuerdo con un estudio presentado en 2013, los métodos exploratorios previos a las tareas de perforación y sus impactos son despreciables en comparación al ciclo de vida completo (Hernández, 2016).

(Bayer et al. 2013) afirma que las cantidades de residuos remanentes de la perforación geotérmica tales como recortes, residuos de cemento y lodos de perforación (bentonita) son consideradas despreciables.

En el campo geotérmico Los Humeros, Puebla, la profundidad promedio es de 2.2 km y es la que se tomó para este caso; ya que esta varía dependiendo de la geología particular del lugar donde se pretende perforar.

Para la terminación del pozo es necesario la instalación de un árbol de válvulas para el control del flujo y alimentación del yacimiento hacia el pozo. Sin embargo, dado que no se cuenta con la información necesaria respecto a la cantidad de materia necesaria para 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.

Aparte de las consideraciones descritas en los párrafos anteriores, en este estudio análisis de ciclo de vida se excluye cualquier otro elemento que no sea parte de las etapas de construcción y terminación de los pozos (Hernández, 2016).

3.2 Análisis del inventario

La calidad de los datos a usarse en el ACV es una clave fundamental para entender sus resultados, su confiabilidad y para interpretar correctamente las implicaciones de éstos. Actualmente se reconoce que los estudios ACV son una nueva metodología aún no implementada sistemáticamente en la evaluación de procesos y tecnologías en México, en donde las bases de datos requeridas para los estudios constituyen una componente crucial que requiere una compilación-revisión cuidadosa para una mejor confiabilidad y representatividad de los procesos, tecnologías o productos a evaluar.

En el caso particular de este estudio, los datos utilizados para construir el inventario de este análisis de ciclo de vida fueron compilados de reportes públicos reportados por Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

y la Comisión Federal de Electricidad (SEMARNAT & CFE, 2014), y del análisis realizado previamente en el IER-UNAM (Hernández, 2016).

1. Se considera que, para la etapa de preparación del sitio, la ejecución de las obras civiles no utilizará energía eléctrica, se consumirá exclusivamente combustible diésel. Para la obra civil, se estima un consumo de 5 m³ de diésel para 30 días de trabajo (SEMARNAT & CFE, 2014);
2. En la etapa de perforación (asumiendo que existen pérdidas de circulación), el consumo de diésel en motores de combustión interna se calcula en 6.5 m³ por día, considerando la potencia total de los motores y turnos continuos. Esto produce como resultado un consumo de 585 m³ para tres meses de perforación. Los aditivos utilizados para los lodos de perforación son 280 toneladas de bentonita, 0.3 toneladas de sosa cáustica, 20 toneladas de barita, 25 toneladas de carbonato de sodio y 48 m³ de diésel (SEMARNAT & CFE, 2014). Asimismo, se requieren 10 toneladas de material obturante grueso, medio y fino de cada uno, pero no especifica cuál es su composición; de igual manera, son necesarios 16 toneladas de lignex (SEMARNAT & CFE, 2014), sustancia de la que no se tiene una evaluación de impacto en la base de datos de Ecolnvent v3.1, con la que se trabajó. El total de 30 toneladas de material obturante, más las 16 toneladas de lignex se están considerando agregándose a la bentonita total. (Hernández, 2016);
3. En la etapa de revestimiento del pozo se reportan los diámetros y longitudes necesarias, pero no el espesor de las tuberías. Se realizó la estimación y se obtuvo que se necesitan 197,486.4 kg de acero

correspondientes a las tuberías de revestimiento. (Hernández, 2016); finalmente;

4. En la etapa de cementación y terminación del pozo se requieren 45 toneladas de harina sílica, 1.5 toneladas de bentonita y 90 toneladas de cemento tipo G. (SEMARNAT & CFE, 2014). En la base de datos de EcoInvent v3.1 no se encontró la evaluación de impacto para este el cemento tipo G, por lo que, siguiendo las tendencias en la literatura, se aproximó a través del proceso de producción para el cemento portland, aunque se reconoce que este tipo de cemento no resiste la alta temperatura.

En la Tabla 3 se resumen los flujos de entrada requeridos para la construcción de pozos geotérmicos. En los casos que fue necesario convertir el volumen de diésel y biodiésel a masa o energía, se utilizó la densidad y poder calorífico.

- **Diésel**

(Castillo et al. 2012) reporta datos fisicoquímicos sobre la densidad y poder calorífico para el diésel mexicano a una temperatura de 20°C y sin etanol:

$$\rho_{diésel} = 836.7 \text{ kg}/\text{m}^3 \quad (3.1)$$

$$PC_{diésel} = 45 \text{ MJ}/\text{kg} \quad (3.2)$$

Por lo tanto, la masa de diésel utilizado para la preparación del sitio es:

$$m = (5.3 \text{ m}^3) \left(836.7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = 4,434.51 \text{ kg}$$

Entonces, la energía contenida en la masa de diésel utilizado para la preparación del sitio es:

$$E = (4,434.51 \text{ kg}) \left(45 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right) = 199,552.95 \text{ MJ}$$

Del mismo modo, la masa de diésel utilizado para la perforación del pozo es:

$$m = (585 \text{ m}^3) \left(836.7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = 489,469.5 \text{ kg}$$

Entonces, la energía contenida en la masa de diésel utilizado para la perforación del pozo es:

$$E = (489,469.5 \text{ kg}) \left(45 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right) = 22,026,127.5 \text{ MJ}$$

La masa requerida de diésel como aditivo para la perforación del pozo geotérmico es:

$$m = (48 \text{ m}^3) \left(836.7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = 40,161.6 \text{ kg}$$

- **Biodiésel de Soya**

Según datos reportados por (Torres et al. 2016) la densidad del biodiésel de soya producido en México es:

$$\rho_{\text{Biodiésel de Soya}} = 860 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (3.3)$$

El poder calorífico del biodiésel es 37.27 MJ/kg aproximadamente. Esto es un 9% menor que el diésel.

$$PC_{\text{biodiésel}} = 37.27 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \quad (3.4)$$

Por lo tanto, la masa de biodiésel de soya utilizado para la perforación de pozo es:

$$m = (585 \text{ m}^3) \left(860 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = 503,100 \text{ kg}$$

Entonces, la energía contenida en la masa de biodiésel de soya utilizado para la perforación del pozo es:

$$E = (503,100 \text{ kg}) \left(37.27 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right) = 18,750,537 \text{ MJ}$$

- **Biodiésel de Palma**

La densidad para el biodiésel de palma (Pathiyamattom & Aguilar, 2017) reportado en México es:

$$\rho_{\text{Biodiésel de Palma}} = 861 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (3.4)$$

Por lo tanto, la masa de biodiésel de palma utilizado para la perforación de pozo es:

$$m = (585 \text{ m}^3) \left(861 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = 503,685 \text{ kg}$$

Entonces, la energía contenida en la masa de biodiésel de palma utilizado para la perforación del pozo es:

$$E = (503,685 \text{ kg}) \left(37.27 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right) = 18,772,339.95 \text{ MJ}$$

Tabla 3. Materia y energía requeridas para la construcción de pozos geotérmicos				
Etapa	Flujo	Caso Base (Diésel)	Caso 1 (Biodiésel de Soya)	Caso 2 (Biodiésel de Palma)
Etapa 1. Preparación del Sitio	Diésel E1	199,553 MJ		
Etapa 2. Perforación del Pozo	Bentonita	326 t		
	Barita	20 t		
	Carbonato de sodio	25 t		
	Sosa cáustica	0.3 t		
	Diésel Aditivo	40.162 t		
	Diésel E2	22,026,128 MJ	No aplica	No aplica
	Biodiésel	No aplica	503.1 t	503.685 t
Etapa 3. Revestimiento	Acero	197.486 t		
Etapa 4. Cementación	Cemento G	93 t		
	Bentonita	1.5 t		
	Harina sílica	45 t		

3.3 Evaluación del impacto ambiental e Interpretación

Con el objeto de obtener la evaluación de los impactos ambientales causados por: el agotamiento de recursos abióticos, la acidificación, la eutrofización, la ecotoxicidad acuática de agua dulce, el calentamiento global, la toxicidad humana, la ecotoxicidad acuática marina, el agotamiento de la capa de ozono, la creación de ozono fotoquímico y la ecotoxicidad terrestre; los datos del inventario de los 3 escenarios fueron implementados y analizados mediante el uso del software GaBi. Los resultados totales obtenidos de este análisis por categoría de impacto se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados totales por categoría de impacto de la construcción de pozos geotérmicos.

Categoría de Impacto	Unidad	Diésel	Biodiésel Soya	Biodiésel Palma
Potencial de Agotamiento de Recursos Abióticos de Elementos	kg Sb eq.	3.86E-09	9.84E-09	5.17E-09
Potencial de Agotamiento de Recursos Abióticos Fósiles	MJ	5.84E-02	2.61E-02	1.83E-02
Potencial de Acidificación	kg SO ₂ eq.	3.75E-05	1.33E-05	1.04E-05
Potencial de Eutrofización	kg PO ₄ ³⁻ eq.	9.63E-06	2.24E-05	6.42E-06
Potencial de Ecotoxicidad Acuática de Agua Dulce	kg DCB eq.	2.98E-04	6.49E-04	2.07E-03
Potencial de Calentamiento Global	kg CO ₂ eq.	4.21E-03	1.49E-03	2.23E-03
Potencial de Toxicidad Humana	kg DCB eq.	9.02E-04	2.13E-03	1.65E-03
Potencial de Ecotoxicidad Acuática Marina	kg DCB eq.	9.10E-01	1.52E+00	9.84E-01
Potencial de Agotamiento de la Capa de Ozono	kg R-11 eq.	6.95E-10	2.58E-10	1.41E-10
Potencial de Creación de Ozono Fotoquímico	kg C ₂ H ₄ eq.	5.25E-06	4.38E-06	3.32E-06
Ecotoxicidad Terrestre	kg DCB eq.	7.36E-06	2.98E-05	7.89E-04

3.3.1 Potencial de Agotamiento de Recursos Abióticos de Elementos

El total del potencial de agotamiento de recursos abióticos de elementos obtenido para el caso-base (diésel) fue de $3.86E-09$ kg Sb eq. La Fig. 21 muestra que el 76.2% del total del agotamiento de recursos abióticos de elementos es debido principalmente a la etapa de perforación del pozo. La etapa de revestimiento aporta el 15.7%, la etapa de cementación aporta el 7.8% y la aportación de la etapa de preparación del sitio es mínima con 0.3% del total. Por otro lado, el total del agotamiento de recursos abióticos de elementos obtenido para el caso de biodiésel de soya fue mayor y equivalente a $9.84E-09$ kg Sb eq.; mientras que para biodiésel de palma fue ligeramente menor y equivalente a $5.17E-09$ kg Sb eq. (Fig. 21). Los aportes respectivos de la preparación del sitio, perforación del pozo, revestimiento y cementación del biodiésel de soya fueron 0.1%, 90.7%, 6.2% y 3.1% respectivamente, mientras que para biodiésel de palma indicaron valores de 0.2%, 82.3%, 11.7% y 5.8% respectivamente.

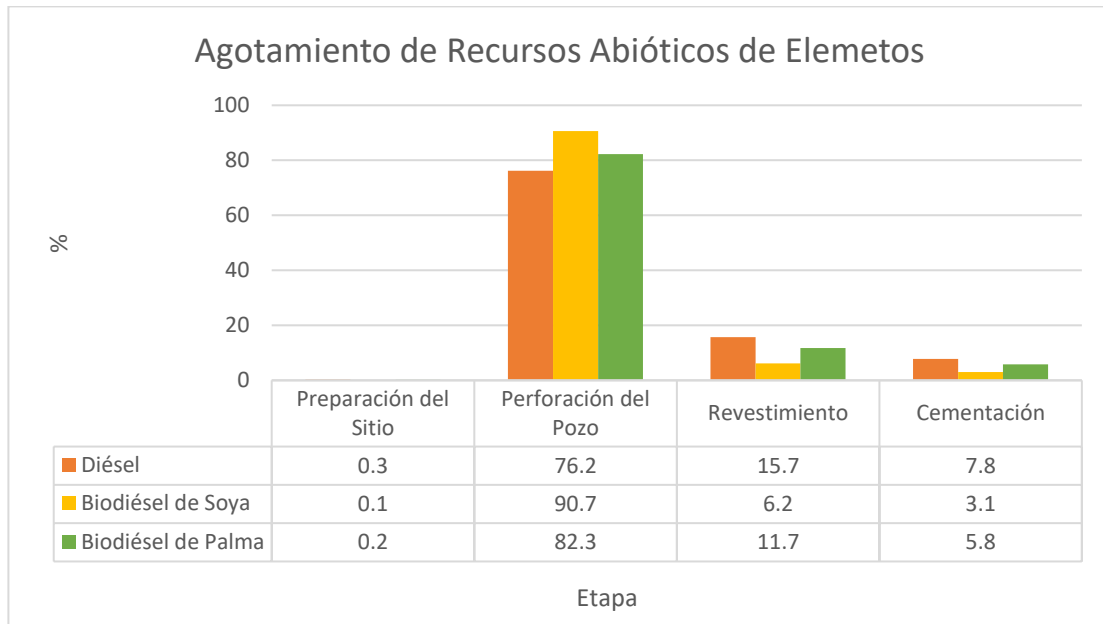


Fig. 21. Agotamiento de recursos abióticos de elementos, caso diésel, biodiésel de soya y biodiésel de palma.

En la Tabla 5 se enlistan los valores totales correspondientes al potencial del agotamiento de recursos abióticos de elementos de cada etapa en la construcción de pozos geotérmicos que se produce, así como su contribución relativa.

Tabla 5. Valores absolutos y porcentajes del potencial de agotamiento de recursos abióticos de elementos por etapa.						
Caso	Diésel		Biodiésel de Soya		Biodiésel de Palma	
Etapas/Unidad	kg Sb eq.	%	kg Sb eq.	%	kg Sb eq.	%
Preparación del Sitio	1.14E-11	0.3	1.14E-11	0.1	1.14E-11	0.20
Perforación del Pozo	2.94E-09	76.2	8.92E-09	90.7	4.26E-09	82.3
Revestimiento	6.06E-10	15.7	6.06E-10	6.2	6.06E-10	11.7
Cementación	3.00E-10	7.78	3.00E-10	3.1	3.00E-10	5.8
Total	3.86E-09	100	9.84E-09	100	5.17E-09	100

3.3.2 Potencial de Agotamiento de Recursos Abióticos Fósiles

Con respecto al potencial agotamiento de recursos abióticos fósiles el valor total obtenido para el caso-base del diésel fue 5.84E-02 MJ, mientras que para el biodiésel de soya y palma mostraron valores más bajos de 2.61E-02 y 1.83E-02 MJ, respectivamente. En el caso del diésel, la etapa de perforación del pozo contribuye con el 87.2%, la etapa de revestimiento contribuye con el 10.8%, la etapa de cementación contribuye con el 1.3% y la etapa de preparación del sitio contribuye con el 0.8%. En el caso de biodiésel de soya, la etapa de perforación del pozo contribuye con el 71.3%, la etapa de revestimiento contribuye con el 24.1%, la etapa de cementación contribuye con el 2.8% y la etapa de preparación del sitio contribuye con el 1.7%, mientras que, para el caso de biodiésel de palma, se tuvieron valores de 59.0%, 34.5%, 4.1% y 2.4%, respectivamente (ver Fig. 22).

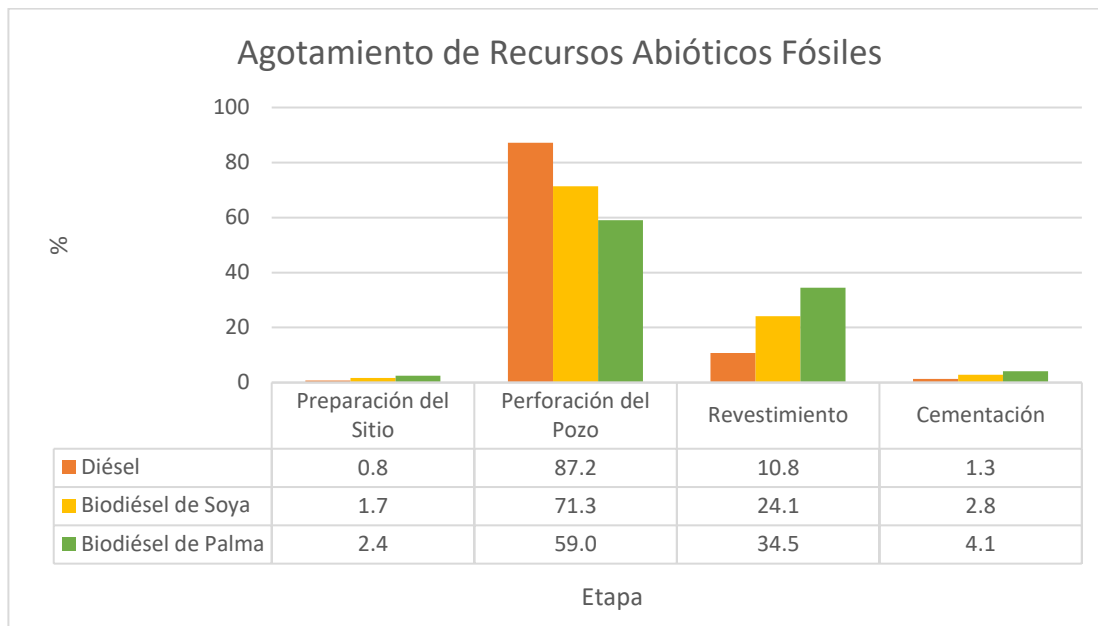


Fig. 22. Agotamiento de recursos abióticos fósiles, caso diésel, biodiésel de soya y biodiésel de palma.

La Tabla 6 se enlistan los valores totales correspondientes al potencial agotamiento de recursos abióticos fósiles de cada etapa en la construcción de pozos geotérmicos que se produce, así como su contribución relativa al total de este potencial.

Tabla 6. Valores absolutos y porcentajes del potencial de agotamiento de recursos abióticos fósiles por etapa.						
Caso	Diésel		Biodiésel de Soya		Biodiésel de Palma	
Etapas/Unidad	MJ	%	MJ	%	MJ	%
Preparación del Sitio	4.48E-04	0.8	4.48E-04	1.7	4.48E-04	2.4
Perforación del Pozo	5.09E-02	87.2	1.86E-02	71.3	1.08E-02	59.0
Revestimiento	6.31E-03	10.8	6.31E-03	24.1	6.31E-03	34.5
Cementación	7.43E-04	1.3	7.43E-04	2.8	7.43E-04	4.1
Total	5.84E-02	100	2.61E-02	100	1.83E-02	100

3.3.3 Potencial de Acidificación

El total de potencial de acidificación estimado para el caso de diésel fue de 3.75E-05 kg SO₂ eq. los cuales el 0.6% son a causa de la etapa de preparación del sitio, el 90.4% por la etapa de perforación del pozo, el 7.9% por la etapa de revestimiento y el 1.2% por la etapa de cementación. Para los casos, biodiésel de soya y biodiésel de palma el valor obtenido para este potencial fue de 1.33E-05 y 1.04E-05 kg SO₂ eq. respectivamente. Donde los aportes de la preparación del sitio, perforación del pozo, revestimiento y cementación del biodiésel de soya fueron 1.8%, 72.8%, 22.1% y 3.3% respectivamente; mientras que para biodiésel de palma fueron 2.3%, 65.2%, 28.3% y 4.2% respectivamente (ver Fig. 23).

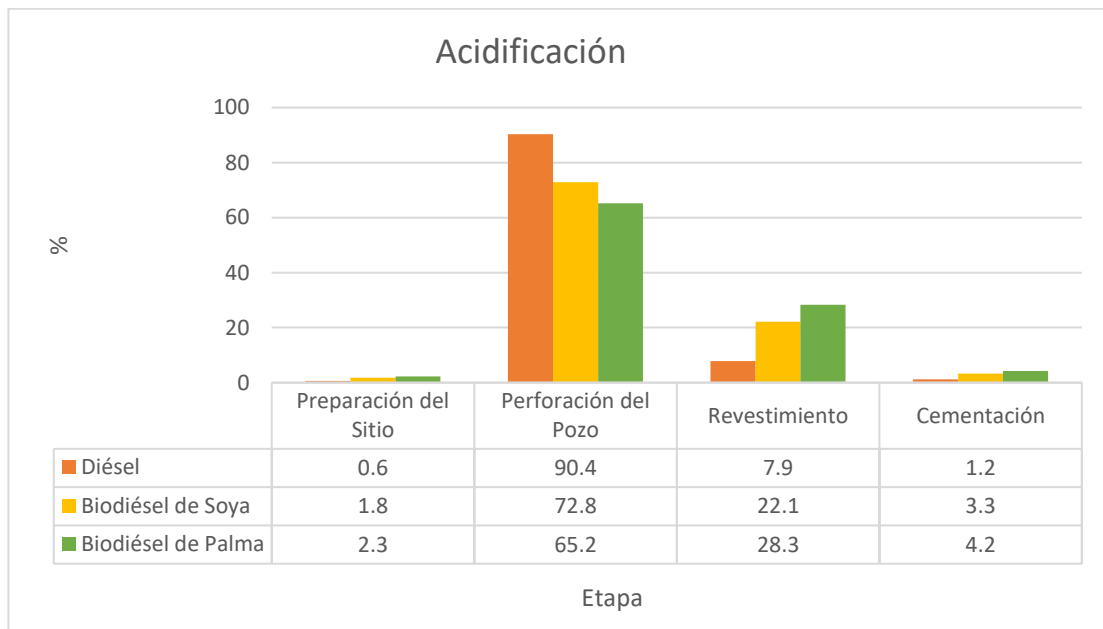


Fig. 23. Potencial de acidificación, caso diésel, biodiésel de soya y biodiésel de palma.

En la Tabla 7 se enlistan los valores totales correspondientes al potencial de acidificación de cada etapa en la construcción de pozos geotérmicos, así como su contribución relativa al total del potencial de acidificación.

Tabla 7. Valores absolutos y porcentajes del potencial de acidificación por etapa.						
Caso	Diésel		Biodiésel de Soya		Biodiésel de Palma	
	kg SO ₂ eq.	%	kg SO ₂ eq.	%	kg SO ₂ eq.	%
Preparación del Sitio	2.36E-07	0.6	2.36E-07	1.8	2.36E-07	2.3
Perforación del Pozo	3.39E-05	90.4	9.70E-06	72.8	6.78E-06	65.2
Revestimiento	2.94E-06	7.9	2.94E-06	22.1	2.94E-06	28.3
Cementación	4.38E-07	1.2	4.38E-07	3.3	4.38E-07	4.2
Total	3.75E-05	100	1.33E-05	100	1.04E-05	100

3.3.4 Potencial de Eutrofización

El potencial de eutrofización (Fig.24) estimado para el caso diésel fue de 9.63E-06 kg PO₄³⁻ eq., y principalmente debido a la etapa de perforación, la cual aporta al 86.3% del total, seguido en menor medida por la etapa de revestimiento con el 12.0% del total del potencial, y por último las etapas de etapa de preparación del sitio y la etapa de cementación con un 0.6% y 1.0% respectivamente. En el caso biodiésel de soya se estimó un valor mayor equivalente a 2.24E-05 kg PO₄³⁻ eq., mientras que para el biodiésel de palma se tuvo un valor menor de 6.42E-06 kg PO₄³⁻ eq. En el caso del biodiésel de soya, las etapas de preparación del sitio, perforación, revestimiento, y cementación aportan 0.3%, 94.1%, 5.2%, y 0.4% respectivamente; mientras que para biodiésel de palma se obtuvo el 0.9%, 79.5%, 18.0% y 1.5% respectivamente.

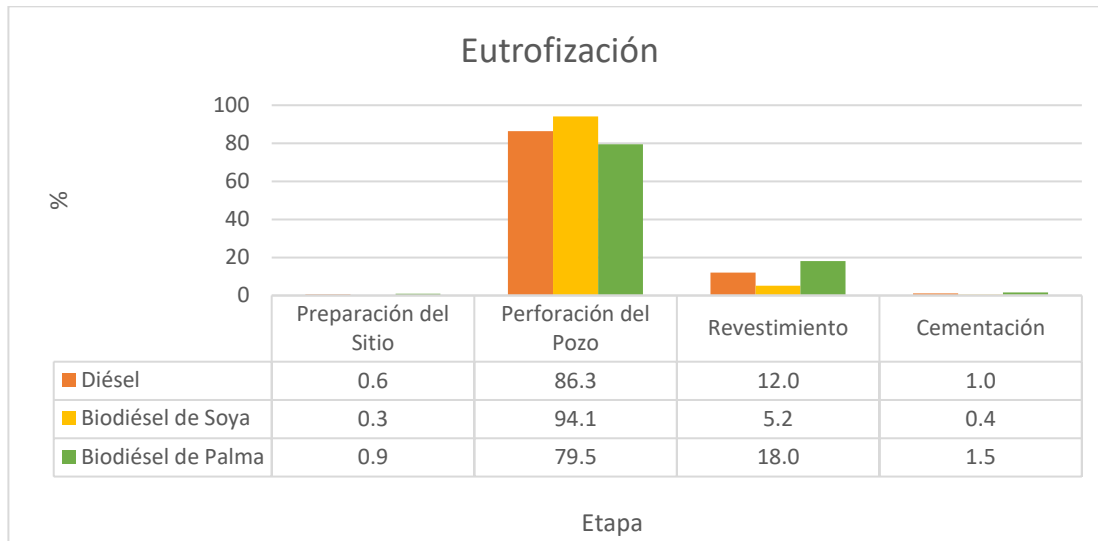


Fig. 24. Potencial de eutrofización, caso diésel, biodiésel de soya y biodiésel de palma.

En la Tabla 8 se enlistan los valores totales correspondientes al potencial de eutrofización de cada etapa en la construcción de pozos geotérmicos y su contribución relativa al total de este potencial de eutrofización.

Tabla 8. Valores absolutos y porcentajes del potencial de eutrofización por etapa.						
Caso	Diésel		Biodiésel de Soya		Biodiésel de Palma	
	kg PO ₄ ³⁻ eq.	%	kg PO ₄ ³⁻ eq.	%	kg PO ₄ ³⁻ eq.	%
Preparación del Sitio	6.07E-08	0.6	6.07E-08	0.3	6.07E-08	0.9
Perforación del Pozo	8.31E-06	86.3	2.11E-05	94.1	5.10E-06	79.5
Revestimiento	1.16E-06	12.0	1.16E-06	5.2	1.16E-06	18.0
Cementación	9.85E-08	1.0	9.85E-08	0.4	9.85E-08	1.5
Total	9.63E-06	100	2.24E-05	100	6.49E-04	100

3.3.5 Potencial de Ecotoxicidad Acuática de Agua Dulce

La siguiente categoría de impacto es el potencial de ecotoxicidad acuática de agua dulce; en donde casi la totalidad del potencial calculado para el caso-base (2.98E-04 kg DCB eq.) es causado por la etapa de revestimiento con un 66.5% y por la etapa de perforación del pozo con un 29.9%. Las etapas de cementación y preparación del sitio contribuyen con el 3.1% y 0.5% al total del potencial respectivamente. Por otro lado, el total del potencial de ecotoxicidad acuática de agua dulce obtenido para el caso de biodiésel de soya fue 6.49E-04 kg DCB eq.; mientras que para biodiésel de palma fue equivalente a 2.07E-03 kg DCB eq. Los aportes del biodiésel de soya fueron 0.2%, 67.8%, 30.5% y 1.4%, mientras que para biodiésel de palma indicaron valores de 0.1%, 89.9%, 9.6% y 0.4% respectivos de la preparación del sitio, perforación del pozo, revestimiento y cementación (ver Fig.25).

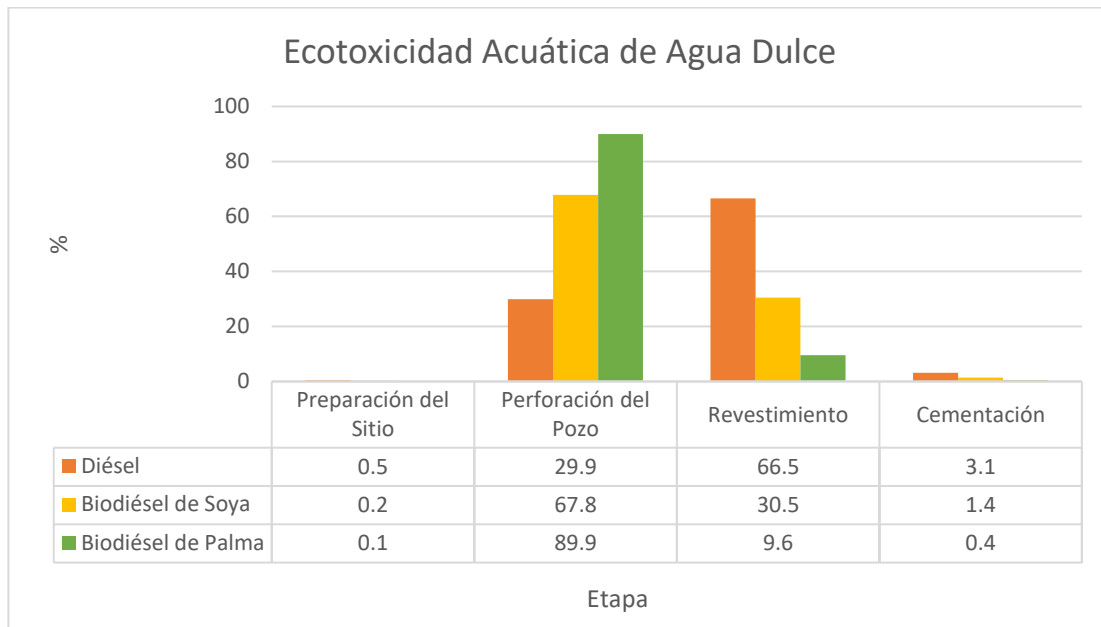


Fig. 25. Potencial de ecotoxicidad acuática de agua dulce, caso diésel, biodiésel de soya y biodiésel de palma.

La Tabla 9 se enlistan los valores totales correspondientes al potencial de ecotoxicidad acuática de agua dulce para cada etapa en la construcción de pozos geotérmicos en los tres casos, así como su contribución relativa.

Tabla 9. Valores absolutos y porcentajes del potencial de ecotoxicidad acuática de agua dulce por etapa.						
Caso	Diésel		Biodiésel de Soya		Biodiésel de Palma	
	kg DCB eq.	%	kg DCB eq.	%	kg DCB eq.	%
Preparación del Sitio	1.43E-06	0.5	1.43E-06	0.2	1.43E-06	0.1
Perforación del Pozo	8.91E-05	29.9	4.40E-04	67.8	1.87E-03	89.9
Revestimiento	1.98E-04	66.5	1.98E-04	30.5	1.98E-04	9.6
Cementación	9.29E-06	3.1	9.29E-06	1.4	9.29E-06	0.4
Total	2.98E-04	100	6.49E-04	100	2.07E-03	100

3.3.6 Potencial de Calentamiento Global

El total del potencial de calentamiento global obtenido para el caso-base (diésel) fue de 4.21E-03 kg CO₂ eq. La Fig. 26 muestra que el 79.9% del total del potencial de calentamiento global es debido principalmente a la etapa de perforación del pozo. La etapa de revestimiento aporta el 14.9%, la etapa de cementación aporta el 4.5% y la aportación de la etapa de preparación del sitio es mínima con 0.7% del total. Por otro lado, el total del potencial de calentamiento global obtenido para el caso de biodiésel de palma fue mayor y equivalente a 2.23E-03 kg CO₂ eq.; mientras que para biodiésel de soya fue ligeramente menor y equivalente a 1.49E-03 kg CO₂ eq. Los aportes respectivos de la preparación del sitio, perforación del pozo, revestimiento y cementación del biodiésel de palma indicaron valores de 1.4%, 62.0%, 28.1% y 8.5% respectivamente, mientras que para biodiésel de soya fueron 2.1%, 43.0%, 42.2% y 12.8% respectivamente (Fig.26).

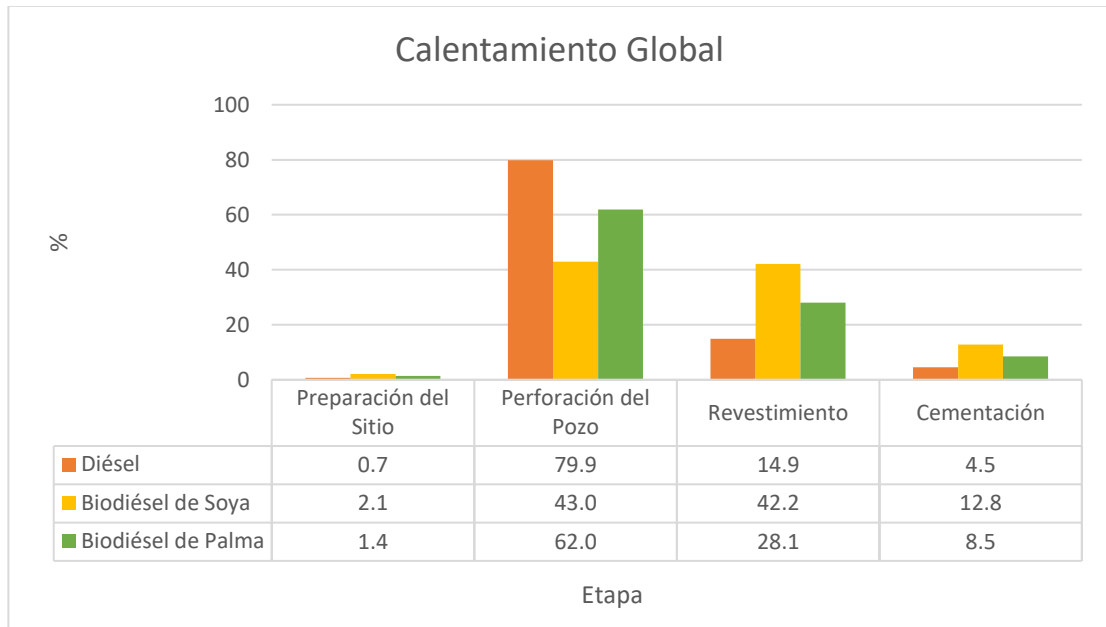


Fig. 26. Potencial de calentamiento global, caso diésel, biodiésel de soya y biodiésel de palma.

En la Tabla 10 se enlistan los valores totales correspondientes al potencial de calentamiento global de cada etapa en la construcción de pozos geotérmicos que se produce, así como su contribución relativa al total de este potencial.

Tabla 10. Valores absolutos y porcentajes del potencial de calentamiento global por etapa.

Caso	Diésel		Biodiésel de Soya		Biodiésel de Palma	
	kg CO ₂ eq.	%	kg CO ₂ eq.	%	kg CO ₂ eq.	%
Preparación del Sitio	3.12E-05	0.7	3.12E-05	2.1	3.12E-05	1.4
Perforación del Pozo	3.36E-03	79.9	6.38E-04	43.0	1.38E-03	62.0
Revestimiento	6.26E-04	14.9	6.26E-04	42.2	6.26E-04	28.1
Cementación	1.90E-04	4.5	1.90E-04	12.8	1.90E-04	8.5
Total	4.21E-03	100	1.49E-03	100	2.23E-03	100

3.3.7 Potencial de Toxicidad Humana

Con respecto al potencial de toxicidad humana (Fig. 27) el valor total obtenido para el biodiésel de soya fue 2.13E-03 kg DCB eq., mientras que para el caso-base del diésel y biodiésel de palma mostraron valores más bajos de 9.02E-04 y 1.65E-03 kg DCB eq., respectivamente. En el caso de biodiésel de soya, la etapa de perforación del pozo contribuye con el 77.8%, la etapa de revestimiento contribuye con el 20.7%, la etapa de cementación contribuye con el 1.0% y la etapa de preparación del sitio contribuye con el 0.5%. En el caso del diésel, la etapa de perforación del pozo contribuye con el 47.5%, la etapa de revestimiento contribuye con el 48.9%, la etapa de cementación contribuye con el 2.4% y la etapa de preparación del sitio contribuye con el 1.1%. mientras que, para el caso de biodiésel de palma, se tuvieron valores de 71.3%, 26.8%, 1.3% y 0.6%, respectivamente.

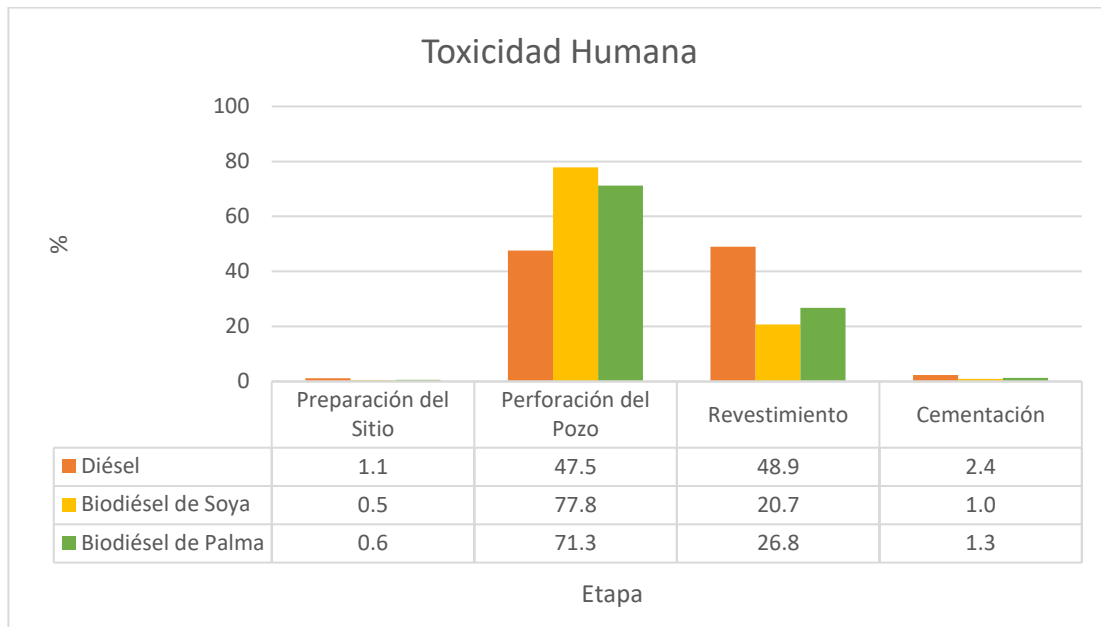


Fig. 27. Potencial de toxicidad humana, caso diésel, biodiésel de soya y biodiésel de palma.

En la Tabla 11 se enlistan los valores totales y contribución relativa correspondientes al potencial de ecotoxicidad humana de cada etapa en la construcción de pozos.

Tabla 11. Valores absolutos y porcentajes del potencial de toxicidad humana por etapa.						
Caso	Diésel		Biodiésel de Soya		Biodiésel de Palma	
Etapas/Unidad	kg DCB eq.	%	kg DCB eq.	%	kg DCB eq.	%
Preparación del Sitio	1.03E-05	1.1	1.03E-05	0.5	1.03E-05	0.6
Perforación del Pozo	4.29E-04	47.5	1.66E-03	77.8	1.17E-03	71.3
Revestimiento	4.41E-04	48.9	4.41E-04	20.7	4.41E-04	26.8
Cementación	2.13E-05	2.4	2.13E-05	1.0	2.13E-05	1.3
Total	9.02E-04	100	2.13E-03	100	1.65E-03	100

3.3.8 Potencial de Ecotoxicidad Acuática Marina

El total de potencial de ecotoxicidad acuática marina estimado para el caso de diésel fue de 0.91 kg DCB eq. los cuales el 0.5% son a causa de la etapa de preparación del sitio, el 36.7% por la etapa de perforación del pozo, el 58.6% por la etapa de revestimiento y el 4.2% por la etapa de cementación. Para los casos, biodiésel de soya y biodiésel de palma el valor obtenido para este potencial fue de 1.52 y 0.98 kg DCB eq. respectivamente. Donde los aportes de la preparación del sitio, perforación del pozo, revestimiento y cementación del biodiésel de soya fueron 0.3%, 62.1%, 35.1% y 2.5% respectivamente; mientras que para biodiésel de palma fueron 0.4%, 41.5%, 54.2% y 3.9% respectivamente (ver Fig. 28).

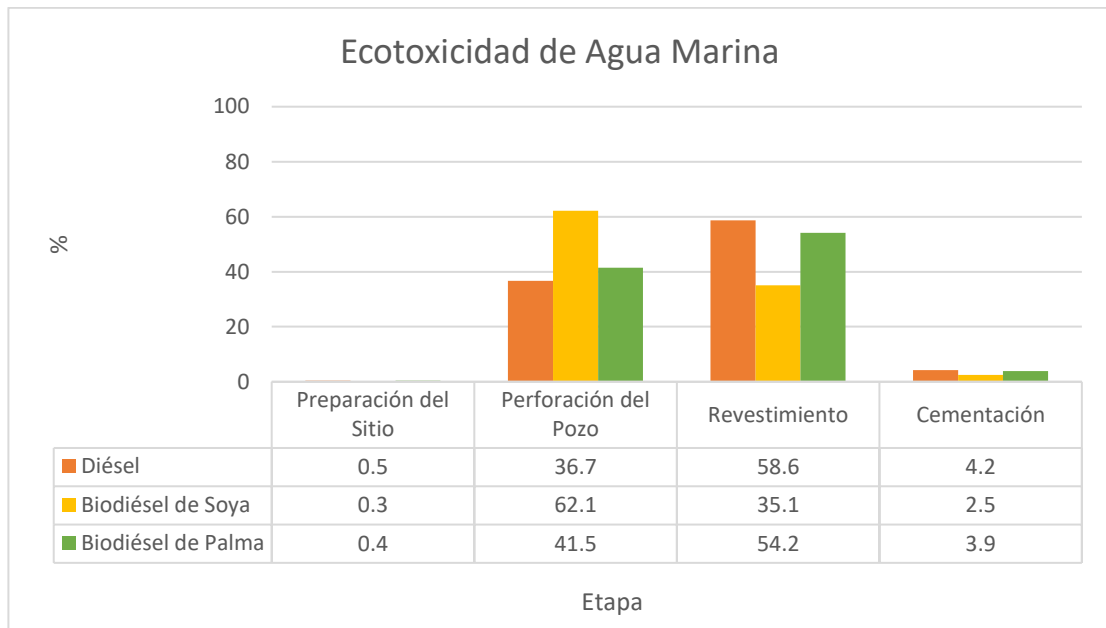


Fig. 28. Potencial de ecotoxicidad acuática marina, caso diésel, biodiésel de soya y biodiésel de palma.

En la Tabla 12 se enlistan los valores totales correspondientes al potencial de ecotoxicidad acuática marina de cada etapa en la construcción de pozos geotérmicos que se produce, así como su contribución relativa.

Tabla 12. Valores absolutos y porcentajes del potencial de ecotoxicidad acuática marina por etapa.						
Caso	Diésel		Biodiésel de Soya		Biodiésel de Palma	
	kg DCB eq.	%	kg DCB eq.	%	kg DCB eq.	%
Preparación del Sitio	4.12E-03	0.5	4.12E-03	0.3	4.12E-03	0.4
Perforación del Pozo	3.34E-01	36.7	9.45E-01	62.1	4.09E-01	41.5
Revestimiento	5.33E-01	58.6	5.33E-01	35.1	5.33E-01	54.2
Cementación	3.82E-02	4.2	3.82E-02	54.2	3.82E-02	3.9
Total	0.91	100	1.52	100	0.98	100

3.3.9 Potencial de Agotamiento de la Capa de Ozono

El potencial de agotamiento de la capa de ozono (Fig.29) estimado para el caso diésel fue de $6.95E-10$ kg Sb eq., y principalmente debido a la etapa de perforación, la cual aporta al 93.3% del total, seguido en menor medida por la etapa de revestimiento con el 5.1% del total del potencial, y por último las etapas de etapa de preparación del sitio y la etapa de cementación con un 0.8% y 0.8% respectivamente. En el caso biodiésel de soya se estimó un valor de $2.58E-10$ kg Sb eq., mientras que para el biodiésel de palma se tuvo un valor de $1.41E-10$ kg Sb eq. En el caso del biodiésel de soya, las etapas de preparación del sitio, perforación, revestimiento, y cementación aportan 2.2%, 81.8%, 13.8%, y 2.2% respectivamente; mientras que para biodiésel de palma se obtuvo el 4.0%, 66.7%, 25.3% y 4.0% respectivamente.

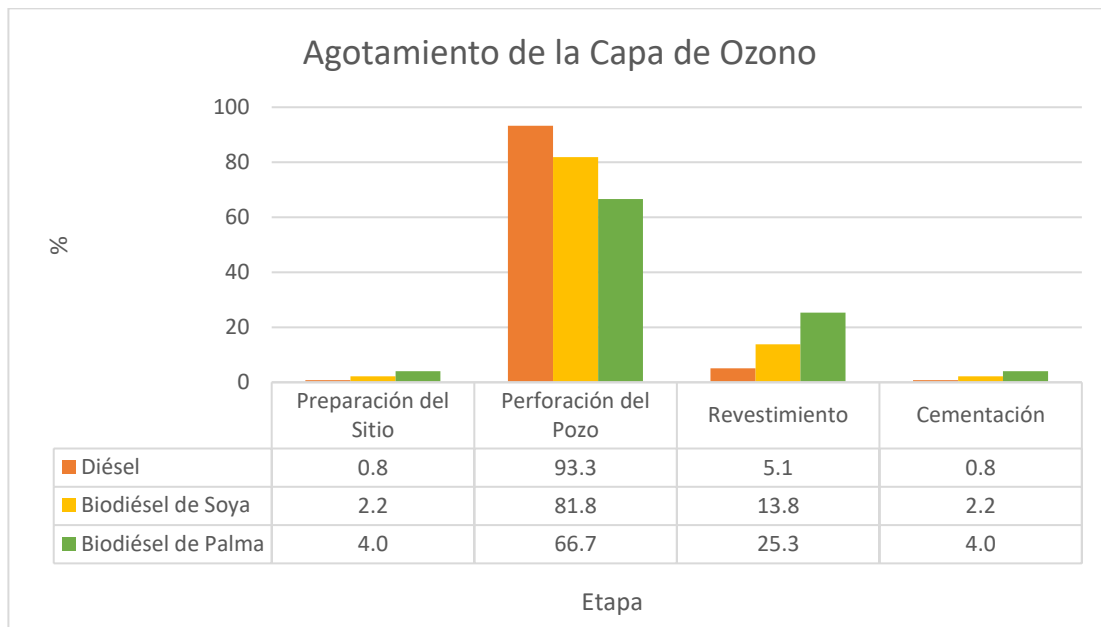


Fig. 29. Potencial de agotamiento de la capa de ozono, caso diésel, biodiésel de soya y biodiésel de palma.

En la Tabla 13 se enlistan los valores totales correspondientes al potencial de agotamiento de la capa de ozono de cada etapa en la construcción de pozos geotérmicos que se produce, así como su contribución relativa.

Tabla 13. Valores absolutos y porcentajes del potencial de agotamiento de la capa de ozono por etapa.						
Caso	Diésel		Biodiésel de Soya		Biodiésel de Palma	
Etapas/Unidad	kg Sb eq.	%	kg Sb eq.	%	kg Sb eq.	%
Preparación del Sitio	5.61E-12	0.8	5.61E-12	2.2	5.61E-12	4.0
Perforación del Pozo	6.48E-10	93.3	2.11E-10	81.8	9.37E-11	66.7
Revestimiento	3.56E-11	5.1	3.56E-11	13.8	3.56E-11	25.3
Cementación	5.64E-12	0.8	5.64E-12	2.2	5.64E-12	4.0
Total	6.95E-10	100	2.58E-10	100	1.41E-10	100

3.3.10 Potencial de Creación de Ozono Fotoquímico

La siguiente categoría de impacto es el potencial de creación de ozono fotoquímico (Fig. 30); en donde casi la totalidad del potencial calculado para el caso-base ($5.25E-06$ kg MJ eq.) es causado por la etapa de perforación del pozo con un 81.2% y por la etapa de revestimiento con un 17.4%. Las etapas de preparación del sitio y cementación contribuyen con el 0.7%. Por otro lado, el total del potencial de creación de ozono fotoquímico obtenido para el caso de biodiésel de soya fue $4.38E-06$ kg MJ eq.; mientras que para biodiésel de palma fue equivalente a $3.32E-06$ kg MJ eq. Los aportes del biodiésel de soya fueron 0.8%, 77.5%, 20.8% y 0.8%, mientras que para biodiésel de palma indicaron valores de 1.1%, 70.4%, 27.4% y 1.1% respectivos de la preparación del sitio, perforación del pozo, revestimiento y cementación.

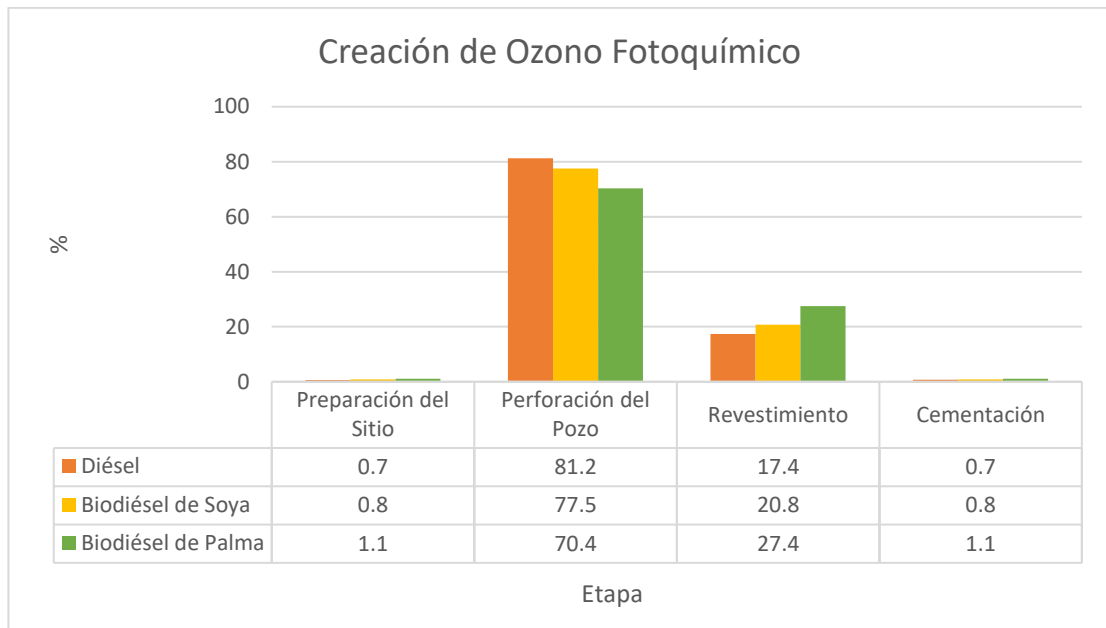


Fig. 30. Potencial de creación de ozono fotoquímico, caso diésel, biodiésel de soya y biodiésel de palma.

En la Tabla 14 se enlistan los valores totales correspondientes al potencial de creación de ozono fotoquímico de cada etapa en la construcción de pozos geotérmicos que se produce, así como su contribución relativa.

Tabla 14. Valores absolutos y porcentajes del potencial de creación de ozono fotoquímico por etapa.						
Caso	Diésel		Biodiésel de Soya		Biodiésel de Palma	
	kg MJ eq.	%	kg MJ eq.	%	kg MJ eq.	%
Preparación del Sitio	3.57E-08	0.7	3.57E-08	0.8	3.57E-08	1.1
Perforación del Pozo	4.26E-06	81.2	3.40E-06	77.5	3.57E-08	70.4
Revestimiento	9.11E-07	17.4	9.11E-07	20.8	9.11E-07	27.4
Cementación	3.68E-08	0.17	3.68E-08	0.8	3.68E-08	1.1
Total	5.25E-06	100	4.38E-06	100	3.32E-06	100

3.3.11 Potencial de Ecotoxicidad Terrestre

El total del potencial de ecotoxicidad terrestre obtenido para el diésel (caso-base) fue de $7.36E-06$ kg DCB eq. La Fig. 31 muestra que el 67.8% del total del potencial de ecotoxicidad terrestre es debido principalmente a la etapa de perforación del pozo. La etapa de revestimiento aporta el 26.2%, la etapa de cementación aporta el 4.9% y la aportación de la etapa de preparación del sitio es 1.2% del total. Por otro lado, el total del potencial de ecotoxicidad terrestre obtenido para el caso de biodiésel de soya fue $2.98E-05$ kg DBC eq.; mientras que para biodiésel de palma fue $7.89E-04$ kg DBC eq. (Fig. 31). Los aportes respectivos de la preparación del sitio, perforación del pozo, revestimiento y cementación del biodiésel de soya fueron 0.3%, 92.0%, 6.5% y 1.2% respectivamente, mientras que para biodiésel de palma indicaron valores de 0.0%, 99.7%, 0.2% y 0.0% respectivamente.

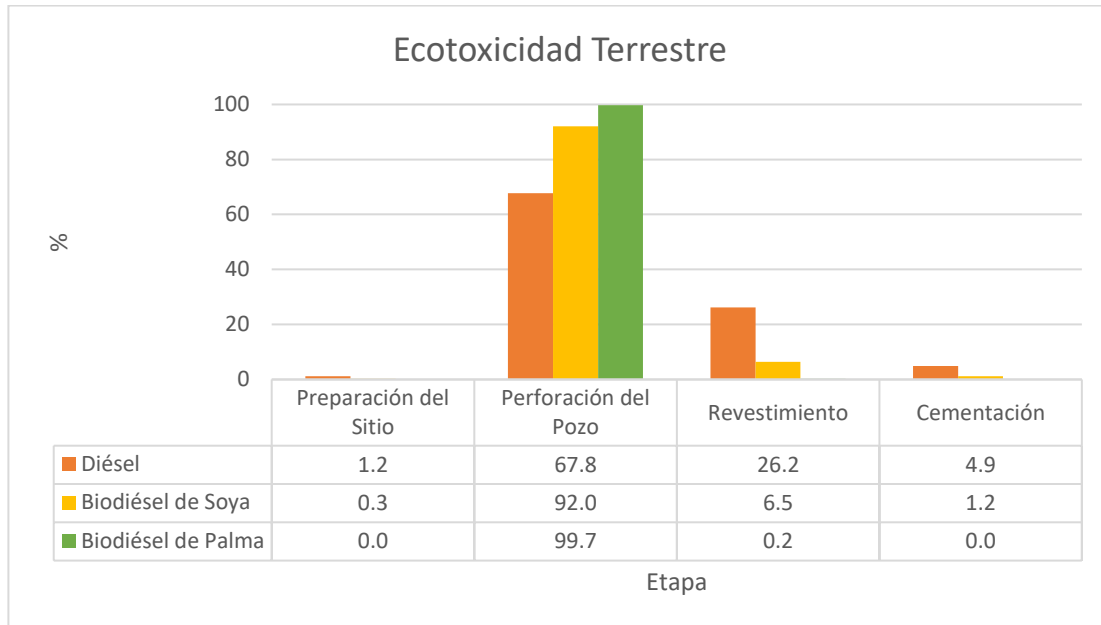


Fig. 31. Potencial de ecotoxicidad terrestre, caso diésel, biodiésel de soya y biodiésel de palma.

En la Tabla 15 se enlistan los valores totales correspondientes al potencial de ecotoxicidad terrestre de cada etapa en la construcción de pozos geotérmicos que se produce, así como su contribución relativa al total del potencial de ecotoxicidad terrestre.

Tabla 15. Valores absolutos y porcentajes del potencial de ecotoxicidad terrestre por etapa.						
Caso	Diésel		Biodiésel de Soya		Biodiésel de Palma	
Etapas/Unidad	kg DBC eq.	%	kg DBC eq.	%	kg DBC eq.	%
Preparación del Sitio	8.81E-08	1.2	8.81E-08	0.3	8.81E-08	0.0
Perforación del Pozo	4.99E-06	67.8	2.74E-05	92.0	7.86E-04	99.7
Revestimiento	1.93E-06	26.2	1.93E-06	6.5	1.93E-06	0.2
Cementación	3.58E-07	4.9	3.58E-07	1.2	3.58E-07	0.0
Total	7.36E-06	100	2.98E-05	100	7.89E-04	100

Capítulo 4. Resultados y Discusión

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos para las once categorías de impacto analizadas en la evaluación ambiental de la construcción de pozos geotérmicos mediante el análisis de ciclo de vida.

4.1 Potencial de Agotamiento de Recursos Abióticos de Elementos

En la Fig. 32 podemos ver que, para el potencial de agotamiento de recursos abióticos de elementos, el caso de biodiésel de soya es el que más afecta a esta categoría de impacto y esto se le atribuye en primer lugar al biodiésel de soya utilizado para generar electricidad aportando 68.62%, en segundo lugar, la barita aportando 13.87%, en tercer lugar, el carbonato de sodio aportando 6.68% y cuarto lugar el acero para el revestimiento aportando 6.16%. En el caso de biodiésel de palma los procesos que más aportan son el biodiésel de palma, la barita, el carbonato de sodio, el acero y el cemento aportando 40.34%, 26.37%, 12.70%, 11.71% y 5.68% respectivamente. En el caso de diésel el proceso que más aporta a esta categoría es la barita con 35.38%, el diésel usado para generar electricidad con 19.95%, el carbonato de sodio con 17.04%, el acero con 15.72% y el cemento con 7.62%.

Las contribuciones al potencial de agotamiento de recursos abióticos de elementos son debido a la explotación de todos los recursos que forman parte del ecosistema por parte del ser humano. Dentro del proceso de construcción de pozos geotérmicos podemos ver que los elementos que más afectan a esta categoría son el biodiésel de soya y palma; esto puede ser debido a todos recursos requeridos en la producción de estos combustibles, como son el agua y suelo.



Fig. 32. Potencial de agotamiento de recursos abióticos de elementos para cada uno de los procesos considerados.

4.2 Potencial de Agotamiento de Recursos Abióticos Fósiles

Para el agotamiento de recursos abióticos fósiles podemos observar que, de los tres casos, el caso-base (diésel) es el que más afecta a esta categoría de impacto y esto es debido principalmente al diésel utilizado para la generación de electricidad aportando un 79.38%, seguido del acero utilizado en las tuberías de revestimiento con un 10.79% y por último el diésel utilizado como aditivo con un 6.16%. Seguido de este, está el caso de biodiésel de soya, donde podemos atribuir los aportes al biodiésel de soya utilizado para la generación de electricidad (53.91%), al acero utilizado en el revestimiento (24.12%) y diésel utilizado como aditivo (13.77%). El último caso que afecta a este potencial es el biodiésel de palma, donde el acero y el biodiésel de palma son los principales procesos que aportan a esta categoría con 34.48% y 34.11% respectivamente, seguidos del diésel utilizado como aditivo (19.68%), el cemento (3.85%) y el carbonato de sodio (2.85%) (ver Fig.33).

El agotamiento de recursos abióticos se puede definir como la disminución de la disponibilidad de recursos naturales. Para el caso-base (diésel) es el que más afecta al agotamiento de recursos abióticos fósiles debido a que el ciclo de vida del biodiésel consume menos recursos fósiles que el diésel. En comparación con el diésel fósil, la producción de biodiésel puede reducir el uso de petróleo crudo (extracción), que es la principal fuente para la producción de diésel (Hou et al. 2011).

Agotamiento de Recursos Abióticos (ADP fósil)



Fig. 33. Potencial de agotamiento de recursos abióticos fósiles para cada uno de los procesos considerados.

4.3 Potencial de Acidificación

En la Fig.34 podemos observar que el caso diésel es el que más afecta al potencial de acidificación, seguido por el caso biodiésel de soya y en último lugar el biodiésel de palma.

Para el caso-base, el diésel requerido en el sistema de potencia es el que mayor aporte tiene con un 88.02%, el acero para el revestimiento aporta un 7.85%, y el resto de los procesos aportan menos del 1%.

En el escenario biodiésel de soya; son el biodiésel de soya requerido en el sistema de potencia (66.27%) y el acero para el revestimiento (22.11%) los que más aportan, seguidos por el cemento, diésel utilizado como aditivo, el carbonato de sodio y el diésel utilizado en la preparación del sitio aportando 3.10%, 2.99%, 1.97%, y 1.77% respectivamente.

En el caso biodiésel de palma los procesos que aportan a esta categoría son el biodiésel de palma con 56.81%, el acero con 28.31%, el cemento con 3.98%, el diésel utilizado como aditivo con 3.83% y el resto de los procesos aportando menos del 3%.

El potencial de acidificación se basa en la contribución del dióxido de azufre (SO_2), óxidos nitrosos (NO_x) y amoníaco (NH_3) al potencial de deposición acida. La mayor parte de las emisiones de SO_2 y de NO_x proceden de la quema de carbón y combustibles, por lo que los combustibles utilizados para generar electricidad son los que más afectan a esta categoría impacto en el proceso de construcción de pozos durante la etapa de perforación.

Acidificación (AP)

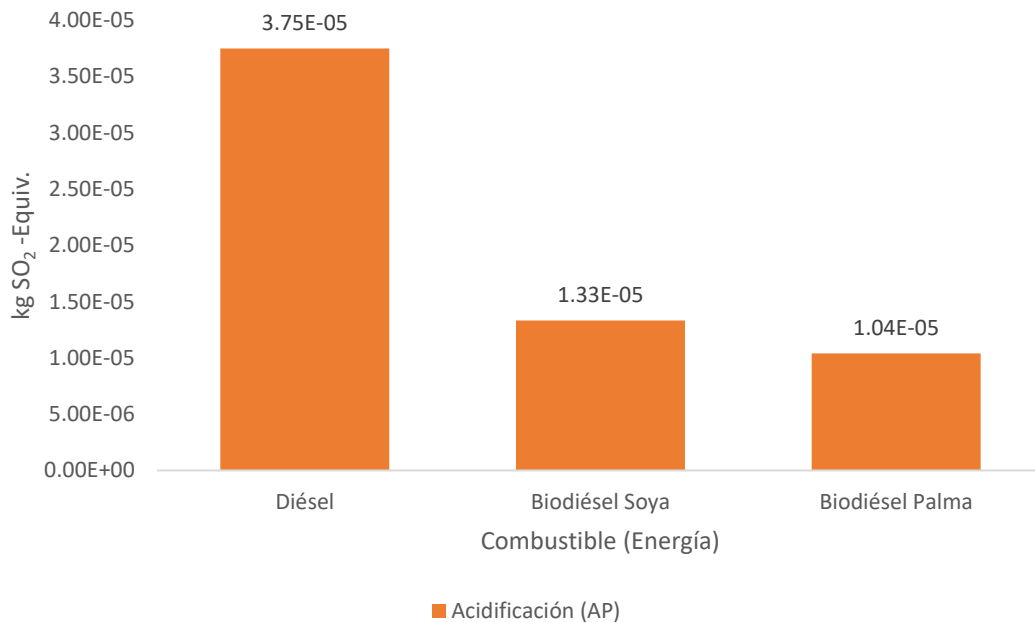
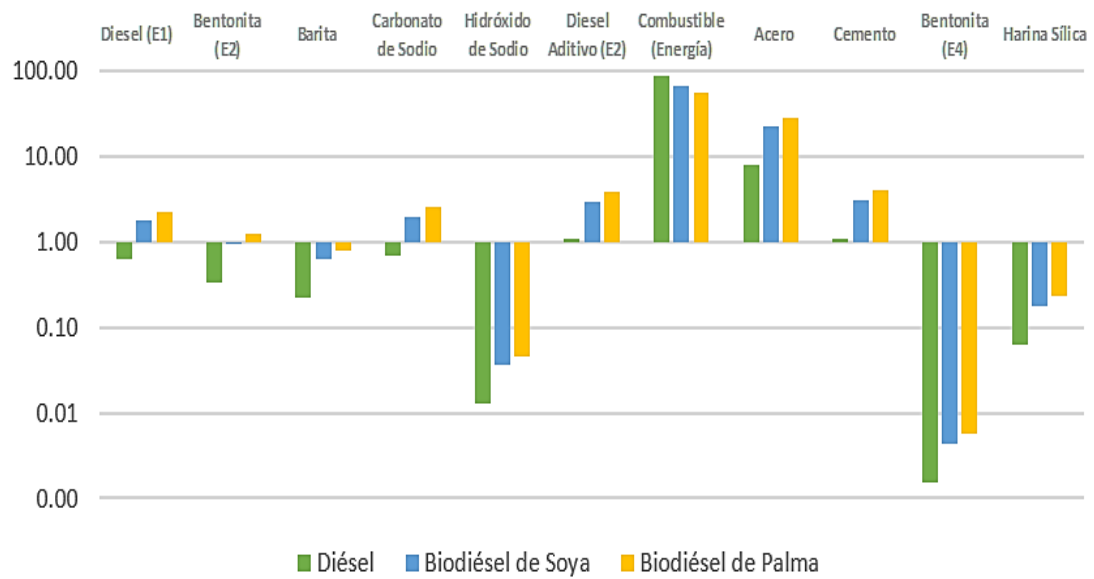


Fig. 34. Potencial de acidificación para cada uno de los procesos considerados.

4.4 Potencial de Eutrofización

Para el potencial de eutrofización el caso que más afecta a este es el biodiésel de soya y esto debido principalmente al biodiésel requerido para generar electricidad contribuyendo con el 92.91% del total, el segundo proceso que aporta a esta categoría es el acero con un 5.16% y el resto de los procesos aportan menos del 1%. Posteriormente el diésel es el segundo caso que más afecta a este potencial, donde el 83.50% es por el diésel requerido para generar electricidad, el 12.02% es por el acero para el revestimiento, el 1.12% por el carbonato de sodio, el 1.11% por el diésel utilizado como aditivo y el resto de los procesos son menores al 1%. Finalmente, para el caso biodiésel de palma, siendo el que menos afecta a esta categoría, se puede atribuir los aportes al biodiésel requerido para generar electricidad (75.23%), el acero para el revestimiento (18.03%), el carbonato de sodio (1.68%), diésel utilizado como aditivo (1.67%), el cemento (1.46%) y el resto de los procesos aportando menos de 1% (ver Fig. 35).

El potencial de eutrofización se define como el potencial de los nutrientes que puede causar una sobre fertilización del agua y suelo; es por lo que los casos en los que se usa biodiésel son los que más aportan a esta categoría de impacto, debido a que las zonas agrícolas contienen habitualmente elevadas concentraciones de nitrógeno y fósforo, por el incremento en el consumo de fertilizantes y por la transformación en la tierra para usos agrícolas. Para el caso de biodiésel de soya otros estudios mencionan que el aporte a esta categoría también es debido a las emisiones de metanol y la producción de metóxido de sodio (principalmente SO_2 y NO_x y producción de energía) en el proceso de transesterificación (Geraldés et al. 2015)



Fig. 35. Potencial de eutrofización para cada uno de los procesos considerados.

4.5 Potencial Ecotoxicidad de Agua Dulce

En la figura 36 se muestra el potencial de ecotoxicidad de agua dulce donde podemos observar que el caso biodiésel de palma es el que más afecta a esta categoría y esto debido principalmente por el biodiésel utilizado en como combustible para la generación de electricidad aportando el 88.88% del total y el acero que aporta 9.56%; el resto de los procesos aportan menos del 1%. Para el caso biodiésel de palma es similar, los dos procesos que más aportan son el biodiésel para generar electricidad y el acero para revestimiento con 64.46% y 30.54%; el carbonato de sodio aporta 1.76%, el cemento 1.36% y el resto de los procesos menos del 1%. Por último, el caso del diésel se ve afectado por el acero utilizado en el revestimiento ya que aporta el 66.52%, el diésel requerido para generar electricidad que aporta el 22.59%, el carbonato de sodio porta el 3.83%, el cemento el 2.96% y el resto de los procesos menos de 1%.

El principal causante del potencial de ecotoxicidad de agua dulce en el ciclo de vida del biodiésel se debe principalmente a las emisiones aguas arriba de lixiviados de nitrato y fosfato al agua subterránea. La agricultura es también el principal contribuyente a este en el ciclo de vida del biodiésel, debido al uso de agroquímicos (Hou et al. 2011). Por lo que esta categoría de impacto es más afectada por los casos en los que se utiliza biodiésel, que por el caso base.

Un estudio del biodiésel de palma menciona que la emisión de DQO, P y N al agua contribuyen a la eutrofización, así como que el efluente de aceite de palma es la principal fuente de impacto, seguido de los fertilizantes utilizados en la etapa de plantación de palma y el metanol en la etapa de conversión de biodiesel (Silalertruksa & Gheewala, 2012).

Ecotoxicidad Acuática de Agua Dulce (FAETP)



Fig. 36. Potencial de ecotoxicidad de agua dulce para cada uno de los procesos considerados.

4.6 Potencial de Calentamiento Global

Para la categoría de calentamiento global el caso que más afecta es el de diésel, seguido por el de biodiésel de palma, y por último el de biodiésel de soya. En el caso-base (diésel), los procesos que más aportan son el diésel requerido para generar electricidad con un 77.21%, el acero para el revestimiento con un 14.87% y el cemento con un 4.43%; el resto de los procesos aportan menos del 1%. En el caso biodiésel de palma los procesos que aportan son el biodiésel, el acero, el cemento con un aporte de 56.93%, 28.11% y 8.37% respectivamente; el resto de los procesos aportan menos del 2%. Para el caso biodiésel de soya los procesos de biodiésel con mayor aporte son el acero, el biodiésel, y el cemento con 42.15%, 35.42 y 12.55%; el resto de los procesos aportan menos del 3%. (Fig. 37).

El dióxido de carbono es el principal contribuyente al forzamiento radiactivo de la Tierra, lo que conduce al cambio climático. Los siguientes contribuyentes son metano y óxido nitroso. Al igual que el CO₂, existen grandes incertidumbres sobre las fuentes de CH₄ y N₂O. Por lo tanto, la discusión anterior también se aplica a estos gases, aunque su impacto sobre el cambio climático es menor que el del CO₂, en parte debido a la magnitud de las emisiones y en parte debido a los tiempos de vida más cortos (en el caso de CH₄) (Bréon & Ciais, 2010).

La razón principal de la disminución de emisiones de CO₂ para los casos biodiésel es la gran cantidad de energía solar y la absorción de CO₂ en el crecimiento de la biomasa. Y por otro lado también se evitan las emisiones de la extracción y refinación de petróleo crudo, lo que causa una disminución significativa del impacto de agotamiento de recursos abióticos en la producción de biodiésel (Hou et al. 2011).

Calentamiento Global (GWP)



Fig. 37. Potencial de calentamiento global dulce para cada uno de los procesos considerados.

4.7 Potencial de Toxicidad Humana

La Figura 38 representa el potencial de toxicidad humana del que podemos decir que el caso que más afecta a este es el de biodiésel de soya y esto debido al proceso del biodiésel utilizado para generar electricidad (74.15%), el acero utilizado en el revestimiento (20.69%) y el carbonato de sodio (1.98%); posteriormente el caso biodiésel de palma es el segundo que afecta a esta categoría, en este los mismos procesos son los que más aportan, esto es, el biodiésel utilizado para generar electricidad con un 66.49%, el acero utilizado en el revestimiento con un 26.82% y el carbonato de sodio con 2.56%. El caso diésel es el que menos afecta a esta categoría y los procesos que más aportan son el acero con 48.94%, el diésel para generar electricidad con 38.85% y el carbonato de sodio con 4.67%.

La caracterización de la toxicidad humana proporciona comparaciones relativas de una gran cantidad de sustancias químicas que pueden tener el potencial de contribuir al cáncer u otros efectos negativos para la salud humana. El potencial de toxicidad para el ser humano para cada emisión de una sustancia tóxica al aire, agua y suelo a menudo se mide en relación con 1,4 diclorobenceno (DB). Este potencial solo tiene un alcance de emisiones de NO_x, SO₂ y partículas y también es aportado principalmente por la producción de fertilizantes en la plantación de palma de aceite (Silalertruksa & Gheewala, 2012).

Un estudio realizado para el biodiesel de soya menciona que la cadena de suministro agrícola contribuye a categorías de cancerígenos, no cancerígenos y toxicidad, que un gran porcentaje a estas aportaciones proviene de la fabricación de fertilizantes, particularmente de los fertilizantes fosfatados (Xue et al. 2012).



Fig. 38. Potencial de toxicidad humana para cada uno de los procesos considerados.

4.8 Potencial de Ecotoxicidad de Agua Marina

En el potencial de ecotoxicidad de agua marina de manera similar a la ecotoxicidad terrestre el caso biodiésel de soya es el que más afecta, después el caso biodiésel de palma y el caso diésel. Para el caso biodiésel de soya los procesos que más aportan son el biodiésel utilizado para generar electricidad, el acero utilizado para el revestimiento, el carbonato de sodio y el cemento con 56.30%, 35.08%, 3.06% y 2.36% respectivamente. Para el caso biodiésel de palma los procesos que más aportan son el acero utilizado en el revestimiento con 54.20% del total, el biodiésel utilizado para generar electricidad con 34.38%, el carbonato de sodio con 4.73% y el cemento con 3.65%. Para el caso diésel ocurre igual que en el de biodiésel de palma, siendo el primer proceso que aporta el acero con 58.65%, después el diésel requerido para generar electricidad con 26.93% y el carbonato de sodio con 5.12% y por último el cemento con 3.95% (ver Fig. 39).

Al igual que para la toxicidad humana, el potencial de ecotoxicidad acuática marina en el ciclo de vida del biodiésel se debe en gran medida a los procesos de producción de productos químicos, vapor y electricidad (Hou et al. 2011).

El estudio de (Gerald et al. 2015) menciona que las afectaciones a la ecotoxicidad en agua dulce y marina es debido a que las emisiones de cultivo de soya (principalmente nitrato y fósforo) contribuyen más del 70%. En cuanto a la ecotoxicidad acuática marina, para el éster metílico de soya es debido a la menor absorción de nitrógeno por el cultivo (rendimiento más bajo) y, en consecuencia, se lixiviaron más nitratos.

Ecotoxicidad de Agua Marina (MAETP)

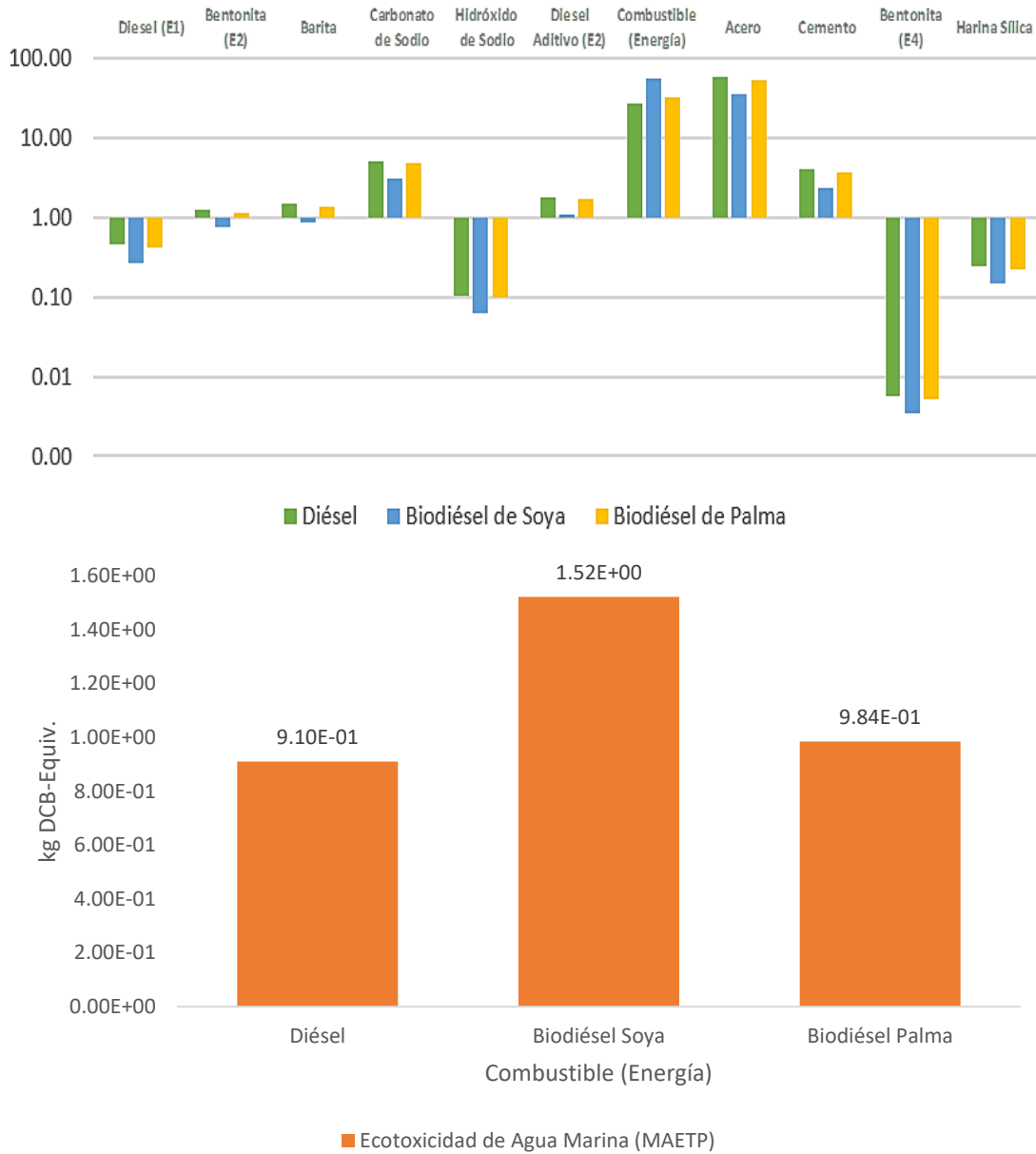


Fig. 39. Potencial de ecotoxicidad de agua marina para cada uno de los procesos considerados.

4.9 Potencial Agotamiento de la Capa de Ozono

En la figura 40 podemos observar que el caso diésel es el que más afecta al potencial de agotamiento de la capa de ozono, seguido por el biodiésel de soya y al final el biodiésel de palma. En el caso-base, siendo el diésel requerido en el sistema de potencia el que mayor aporta con un 85.42%, el diésel utilizado como aditivo con un 6.63% y el acero para el revestimiento aportando un 5.13%. En el caso biodiésel de soya, el comportamiento es similar, siendo el biodiésel de soya requerido en el sistema de potencia (60.68%), el diésel utilizado como aditivo (17.87%) y el acero para el revestimiento (13.82%) los que más aportan. En el caso biodiésel de palma los procesos que aportan a esta categoría son el diésel utilizado como aditivo con 32.77%, el biodiésel de palma con 27.90% y el acero con 25.34%, seguidos del diésel utilizado en la preparación de sitio con 3.99%, el cemento con 3.79%.

Las emisiones responsables del agotamiento de la capa de ozono son sustancias químicas que tienen el potencial de reaccionar con las moléculas de ozono presentes en la estratosfera. Estas emisiones se relacionan principalmente con la combustión de combustibles fósiles (extracción y refinación de petróleo, operaciones agrícolas y producción de calor en las fábricas). Es por lo que el caso-base es el que más afecta a esta categoría.

El impacto del agotamiento del ozono por biodiésel de soya es en parte debido al cultivo, a la transesterificación. Las principales emisiones que contribuyeron a este potencial por el éster metílico de soya fueron el bromotrifluorometano, bromoclorodifluorometano y el tetraclorometano (Gerald et al. 2015).

Agotamiento de la Capa de Ozono (ODP)



Fig. 40. Potencial de agotamiento de la capa de ozono para cada uno de los procesos considerados.

4.10 Potencial de Creación de Ozono Fotoquímico

La Fig. 41 representa el potencial de creación de ozono fotoquímico en donde podemos observar que, de los tres casos, el de diésel es el que más afecta a esta categoría de impacto y esto es debido principalmente al diésel utilizado para la generación de eléctrica aportando un 79.32%, el segundo proceso que atribuye a esta categoría es el acero utilizado en las tuberías de revestimiento con un 17.37% y en tercer lugar el diésel utilizado como aditivo con un 1.08%. Seguido de este, está el caso de biodiésel de soya, donde podemos atribuir los aportes al biodiésel de soya utilizado para la generación de electricidad (75.24%), al acero utilizado en el revestimiento (20.80%) y diésel utilizado como aditivo (1.29%). El último caso que afecta a este potencial es el biodiésel de palma, donde el biodiésel de soya y el acero son los principales procesos que aportan a esta categoría con 67.32% y 27.45% respectivamente, seguido por el diésel utilizado como aditivo (1.71%).

Bajo la influencia de la radiación solar, los óxidos de nitrógeno (NO_x), CH_4 y CO reaccionan con los compuestos orgánicos volátiles para producir ozono troposférico. El diésel es el principal causante de estos óxidos al ser utilizados en motores para generar electricidad y es por eso por lo que el caso base es el que más afecta a esta categoría. Por otro lado, en el caso del biodiésel de palma, la molienda de aceite de palma es la etapa principal que resulta alto impacto y el principal contribuyente en esta etapa son las emisiones de metano del efluente del molino de aceite de palma en estanques abiertos (Silalertruksa & Gheewala, 2012). Para el biodiésel de soya, el cultivo, extracción, refinación y transesterificación son los causantes de la formación de oxidantes fotoquímicos, pues los NO_x debido a las operaciones agrícolas, así como el hexano emitido por la planta de extracción, son los principales emisores (Gerald et al. 2015).

Creación de Ozono Fotoquímico (POCP)

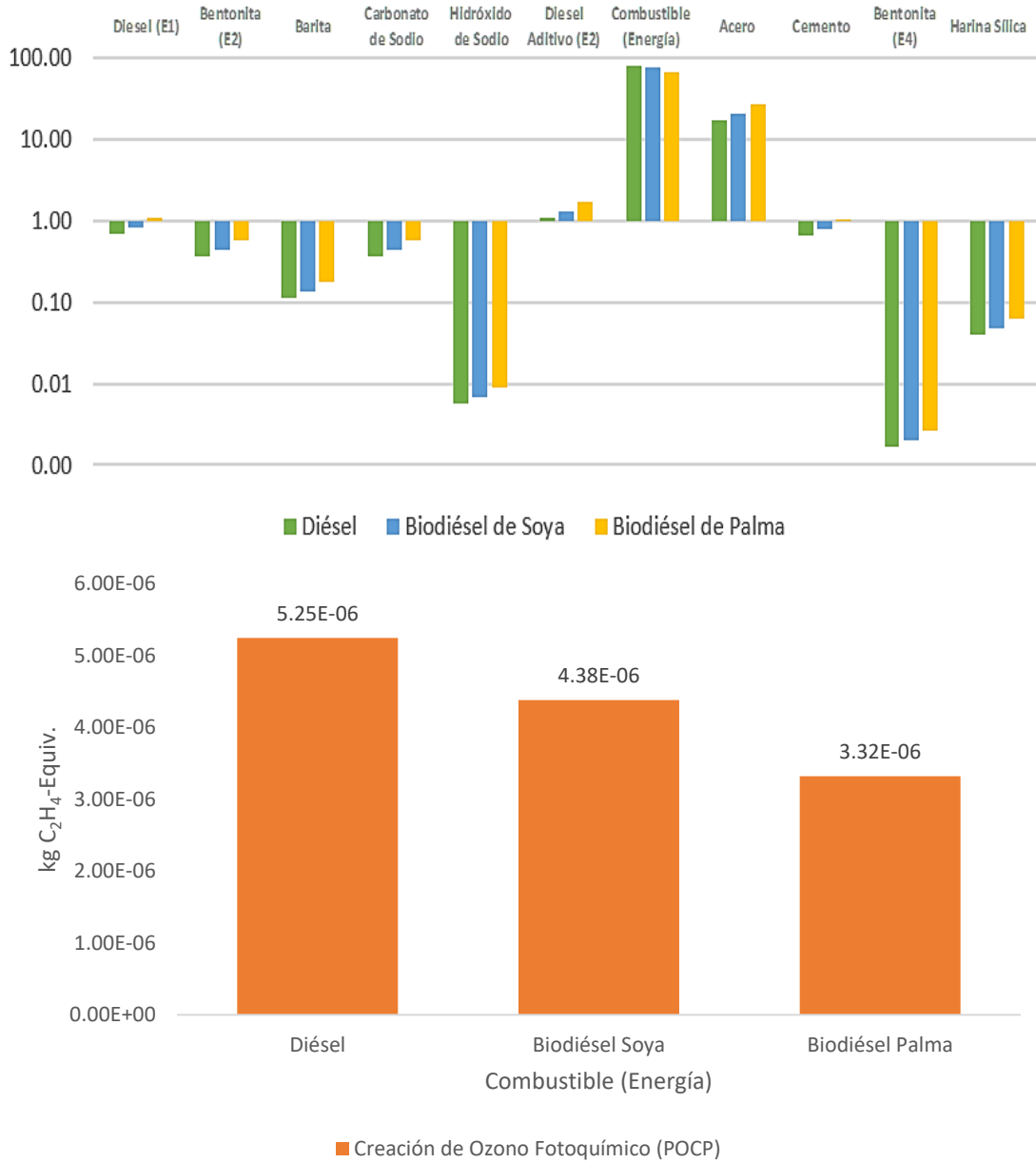


Fig. 41. Potencial de creación de ozono fotoquímico para cada uno de los procesos considerados.

4.11 Potencial de Ecotoxicidad Terrestre

La figura 42 muestra el potencial de ecotoxicidad terrestre donde podemos observar que el caso del biodiésel de palma el que más afecta a esta categoría y esto debido principalmente por el biodiésel que aporta 99.59%, ya que el resto de los procesos aportan menos del 1%. Para el caso biodiésel de soya los dos procesos que más aportan son el biodiésel para generar electricidad y el acero para revestimiento con 89.03% y 6.46%; el carbonato de sodio aporta 1.74%, el cemento 1.15% y el resto de los procesos menos del 1%. Por último, el caso del diésel se ve afectado por el diésel requerido para generar electricidad que aporta el 55.58%, el acero utilizado en el revestimiento ya que aporta el 26.17%, el carbonato de sodio aporta el 7.03%, el cemento aporta el 4.65% y el diésel utilizado como aditivo aporta el 3.04%.

Los principales contribuyentes al potencial de ecotoxicidad terrestre en el ciclo de vida del biodiésel se deben principalmente a las emisiones al aire de la aplicación de fertilizantes N y P, amoníaco y óxido nítrico; por otro lado, la agricultura, debido al uso de agroquímicos (Hou et al. 2011).

Este impacto es a causa del cultivo de palma y se debe al uso de pesticidas y fertilizantes, así como también, la extracción de aceite de palma requiere más insumos que para la soya (Escobar et al. 2014).

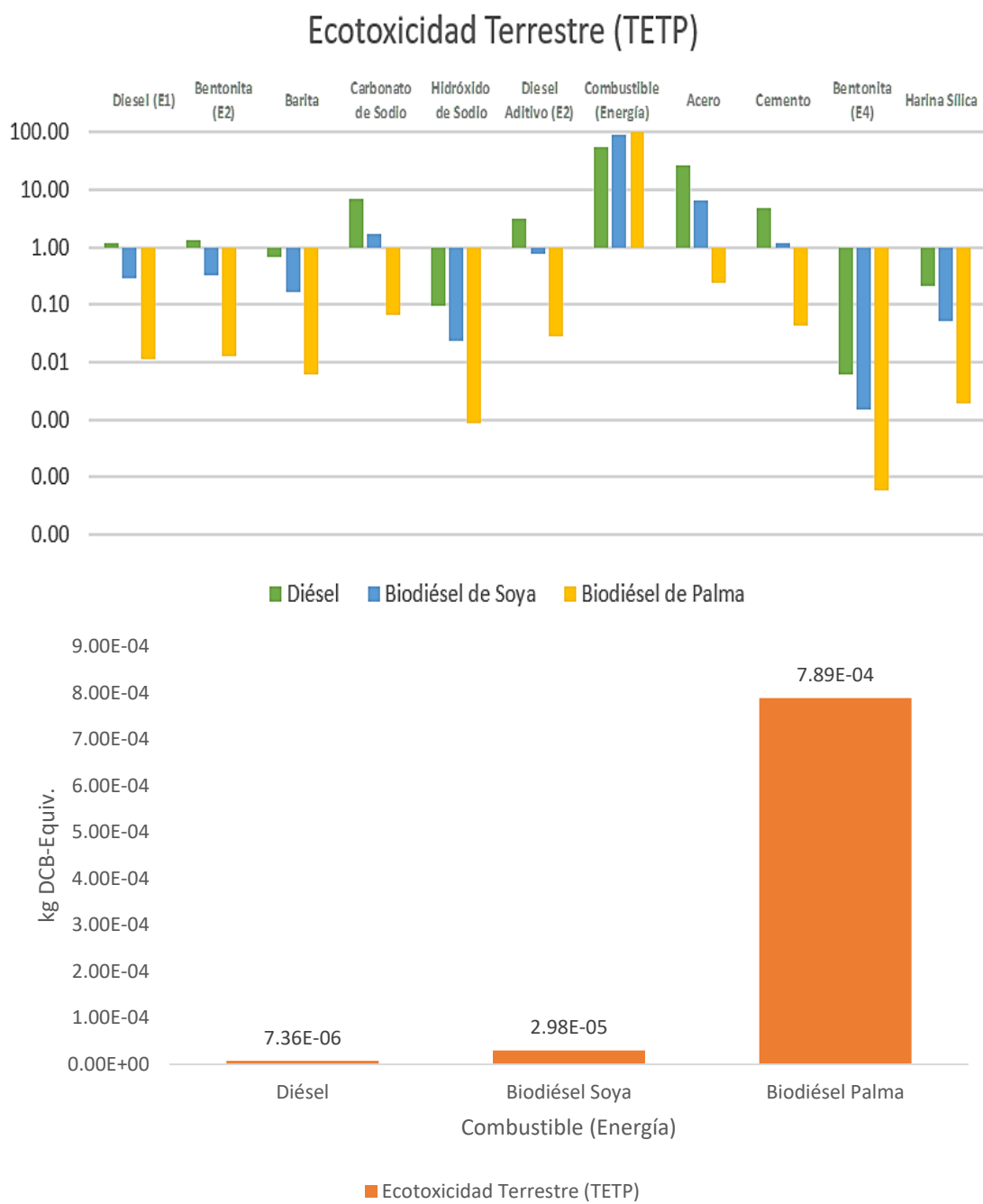


Fig. 42. Potencial de ecotoxicidad terrestre para cada uno de los procesos considerados.

Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones

En este estudio se realizó la evaluación de sustentabilidad ambiental mediante la metodología análisis de ciclo de vida con 3 posibles escenarios. El primero a través del uso de diésel (como caso base) y un segundo y tercer caso usando biodiésel de soya y de palma (como energético de reemplazo), respectivamente.

Se logró realizar un análisis comparativo de 11 categorías de impacto y para estas se observó que si existe una reducción del impacto ambiental a través del uso de biodiésel. El uso de biodiésel de soya y palma permiten un beneficio a través de la reducción de los impactos ambientales atribuidos al calentamiento global, al agotamiento de la capa de ozono, la creación de ozono fotoquímico, la acidificación y el agotamiento de recursos abióticos fósiles. En las categorías de agotamiento de recursos abióticos de elementos, eutrofización, toxicidad humana y ecotoxicidad de agua marina, el uso de biodiésel de soya muestra una afectación o desventaja ambiental, mientras que el biodiésel de palma afecta la ecotoxicidad de agua dulce y la ecotoxicidad terrestre. Estas afectaciones se atribuyen básicamente a los procesos de producción de los biocombustibles. No se puede concluir cuál de los tres escenarios es el mejor, ya que se tendría que buscar una metodología para jerarquizar cuales son los indicadores más importantes, así como realizar un análisis económico, para ver qué tan viable es realizar este cambio.

Con este estudio podemos visualizar que son muy escasos los ACV aplicados a la industria geotérmica en México, siendo este el segundo, por lo que las recomendaciones serían, seguir investigando del tema, realizar el ACV del biodiésel de jatropha para poder incluirlo en estudios como este, ya

que tiene un gran potencial en el territorio del país, así como realizar análisis de las otras fases de una planta geotermoeléctrica.

Las categorías de impacto de agotamiento de recursos abióticos fósiles, acidificación, calentamiento global, agotamiento de la capa de ozono, y creación de ozono fotoquímico son las más afectadas por el caso diésel, dominadas por la etapa de perforación de pozos y esto a causa del diésel requerido en el sistema de potencia; estas categorías de impacto en el caso que son menos afectadas es el del biodiésel de palma. Las categorías de agotamiento de recursos abióticos de elementos, eutrofización, toxicidad humana y ecotoxicidad de agua marina son las más afectadas por el caso biodiésel de soya y siendo en su mayoría menos afectadas por el caso del diésel. Las dos categorías que se ven más afectadas por el caso biodiésel de palma son la ecotoxicidad de agua dulce y la ecotoxicidad terrestre, para estas seis categorías de impacto afectadas por los casos en los que se utiliza biodiésel, de igual manera que el caso diésel están dominadas por la misma etapa (perforación de pozos) y a causa del mismo proceso (biodiésel requerido en el sistema de potencia).

Para las categorías agotamiento de recursos abióticos fósiles, acidificación, calentamiento global, agotamiento de la capa de ozono, y creación de ozono fotoquímico el proceso que más afecta es el diésel requerido en el sistema de potencia con un aporte mínimo de 77.21% al potencial de calentamiento global, hasta un máximo de 88.02% para el potencial de acidificación. El segundo proceso con una contribución importante a estas categorías es el acero utilizado en las tuberías de revestimiento, con un valor mínimo de 7.85% para el potencial de acidificación hasta un valor máximo de 17.37% para el de creación de ozono fotoquímico. Los procesos que se encuentran en tercer lugar son el cemento con un aporte de 1.10% y 4.43% para los potenciales de acidificación y calentamiento global respectivamente; y el

diésel utilizado como aditivo con 1.08% y 6.16% para los potenciales de creación de ozono fotoquímico y agotamiento de recursos abióticos fósiles respectivamente. Para la categoría de impacto de agotamiento de la capa de ozono, el segundo proceso con más aporte es el diésel utilizado como aditivo con 6.63% y en tercer lugar se encuentra el acero con un 5.13%.

Para las categorías agotamiento de recursos abióticos de elementos, eutrofización, toxicidad humana y ecotoxicidad de agua marina el proceso que más afecta a estas es el biodiésel de soya requerido en el sistema de potencia con un aporte mínimo de 56.30% al potencial de ecotoxicidad de agua marina, hasta un máximo de 92.91% para el potencial de eutrofización. El segundo proceso con una contribución importante a estas categorías es el acero utilizado en las tuberías de revestimiento, con un valor mínimo de 5.16% para el potencial de eutrofización hasta un valor máximo de 35.08% para el potencial de ecotoxicidad de agua marina. El proceso que se encuentra en tercer lugar es el carbonato de sodio con un aporte mínimo 0.48% y un máximo de 3.06% para los potenciales eutrofización y ecotoxicidad de agua marina respectivamente. Para la categoría de impacto de agotamiento de recursos abióticos de elementos, el segundo proceso con más aporte es la barita con 13.87% y en tercer lugar se encuentra el acero con un 6.16%.

Para las categorías ecotoxicidad de agua dulce y la ecotoxicidad terrestre el proceso que más afecta a estas es el biodiésel de palma requerido en el sistema de potencia con un aporte de 88.88% al potencial de ecotoxicidad de agua dulce y con un aporte de 99.59% al potencial de ecotoxicidad terrestre. El segundo proceso con una contribución importante a estas categorías es el acero utilizado en las tuberías de revestimiento, con un aporte de 9.56% al potencial de ecotoxicidad de agua dulce y con un aporte de 0.24% al potencial de ecotoxicidad terrestre.

Referencias

- Arat, H., & Arslan, O. (2016). Exergoeconomic analysis of district heating system boosted by the geothermal heat pump. *Energy*, 1-12.
- Atilgan, B., & Azapagic, A. (2016). Renewable electricity in Turkey: life cycle environmental impacts. *Renewable Energy*, 649–657.
- Bayer, P., Rybach, L., Blum, P., & Brauchler, R. (2013). Review on life cycle environmental effects of geothermal power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 446–463.
- Beatrice, C., Bertoli, C., D'Alessio, J., Del Giacomo, N., Lazzaro, M., & Massoli, P. (1996). Experimental characterization of combustion behaviour of new diesel fuels for low emission engines. *Combustion Science and Technology*, 335-355.
- Bertani, R. (2016). Geothermal generation in the world 2010-2014 update report. *Geothermics*, 31-43.
- Boden, T., & Andres, B. (31 de Mayo de 2018). *Carbon Dioxide Information Analysis Center and World Data Center*. Obtenido de <http://cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/emis/top2011.tot>
- Bravi, M., & Basosi, R. (2014). Environmental impact of electricity from selected geothermal power plants in Italy. *Journal of Cleaner Production*, 301–308.
- Breede, K., Dzebisashvili, K., Liu, X., & Falcone, G. (2013). A systematic review of enhanced (or engineered) geothermal systems: past, present and future. *Geothermal Energy*, 1–27.

- Bréon, F. M., & Ciais, P. (2010). Spaceborne remote sensing of greenhouse gas concentrations. *Comptes Rendus Geoscience*, 412-424.
- Cámara de Diputados, C. d. (2014). *Ley de Energía Geotérmica*. México: Diario Oficial de la Federación.
- Castillo, H., Mendoza, D., & Caballero, M. (2012). Análisis de las propiedades fisicoquímicas de gasolina y diésel mexicanos reformulados con Etanol. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 293-306.
- CeMIEGeo, C. M. (08 de Febrero de 2018). *CeMIEGeo*. Obtenido de Geotermia en México - CeMIEGeo:
<http://www.cemiegeo.org/index.php/geotermia-en-mexico>
- Chargoy Amador, J. P., Garcia Fiol, E., Sojo Benitez, A., & Suppen Reynaga, N. (2013). *Análisis de Ciclo de Vida de vasos desechables en México. Poliestireno Expandido (EPS) y papel plastificado*. México, D.F.: Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable (CADIS).
- Escobar, N., Ribal, J., Clemente, G., & Sanjua, N. (2014). Consequential LCA of two alternative systems for biodiesel consumption in Spain, considering uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 61-73.
- Gamboa, M., Iribarren, D., & Dufour, J. (2015). On the environmental suitability of high- and low-enthalpy geothermal systems. *Geothermics*, 27–37.
- García, C. A., Riegelhaupt, E., Ghilardi, A., Skutsch, M., Islas, J., Manzini, F., & Omar, M. (2015). Sustainable bioenergy options for Mexico: GHG mitigation and costs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 545–552.
- Geraldes, C. É., Grisol, R., Coelho, S., Da Silva, G. A., & Freire, F. (2015). Life-cycle assessment of soybean-based biodiesel in Europe:

- comparing grain, oil and biodiesel import from Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 188-201.
- Gutiérrez, L., & Lippman, M. (2016). Mexico: thirty-three years of production in the Los Azufres geothermal field. En R. DiPippo, *Geothermal Power Generation. Developments and Innovation* (págs. 717–742). Elsevier.
- Hernández, J. D. (2016). *Análisis de ciclo de vida en la construcción de pozos geotérmicos para la producción de electricidad*. México: Tesis UNAM.
- Herrmann, I. T., & Moltesen, A. (2015). Does it matter which Life Cycle Assessment (LCA) tool you choose? - A comparative assessment of SimaPro and GaBi. *Journal of Cleaner Production*, 163-169.
- Hondo, H. (2005). Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case. *Energy*, 2042–2056.
- Hou, J., Zhang, P., Yuan, X., & Zheng, Y. (2011). Life cycle assessment of biodiesel from soybean, jatropha and microalgae in China conditions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 5081–5091.
- IEA. (2017). *Energy Policies Beyond IEA Countries - Mexico*.
- IEA. (2017). *Mexico Energy Outlook*.
- IEA. (2017). *World energy balances: Overview*.
- ISO. (2006). *Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia. (ISO 14040:2006)*. ISO 14040:2006.
- Jain, S., & Sharma, M. (2011). Oxidation stability of blends of Jatropha biodiesel with diesel. *Fuel*, 14-20.

- Karlsdottir, M., Palsson, O., & Palsson, H. (2010). LCA of combined heat and power production at Hellisheiði geothermal power plant with focus on primary. *Power*, 16.
- Klöpffer, W. (2005). Life Cycle Assessment as Part of Sustainability Assessment for Chemicals. *Environmental Science and Pollution Research*, 173-177.
- Kumar, S., Singh, J., Nanoti, S., & Garg., M. (2012). A comprehensive life cycle assessment (LCA) of Jatropha biodiesel production in India. *Bioresource Technology*, 723-729.
- Lee, H., Taufiq-Yap, Y., Hussein, M., & Yunus, R. (2013). Transesterification of Jatropha oil with methanol over MgZn mixed metal oxide catalysts. *Energy*, 12-18.
- Lund, J. (2007). Characteristics, development and utilization of geothermal resources. *Geo-Heat Center. Q. Bull.* 28, 1–9.
- Marchand, M., Blanc, I., Marquand, A., Beylot, A., Bezelgues-Courtade, S., & Traineau, H. (2015). *Life cycle assessment of high temperature geothermal energy systems*. Melbourne, Australia: Proc. World Geothermal. Congress.
- Nanaki, E. A., & Koroneos, C. J. (2012). Comparative LCA of the use of biodiesel, diesel and gasoline for transportation. *Journal of Cleaner Production*, 14-19.
- Özener, O., Yüksek, L., Tekin, E. A., & Özkan, M. (2014). Effects of soybean biodiesel on a DI diesel engine performance, emission and combustion characteristics. *Fuel*, 875-883.
- Palash, S., Kalam, M., Masjuki, H., Masum, B., Rizwanul, F. I., & Mofijur, M. (2013). Impacts of biodiesel combustion on NOx emissions and their

- reduction approaches. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 473-90.
- Richter, A. (2018). *Geothermal Energy in Europe and the rest of the World*. Think Geoenergy.
- Romero Sergio, H., Romero Omar, H., & Wood, D. (2011). *Energías Renovables: Impulso político y tecnológico para un México sustentable*. México.
- Roy, M. M., Wang, W., & Bujold., J. (2013). Biodiesel production and comparison of emissions of a DI diesel engine fueled by biodiesel–diesel and canola oil–diesel blends at high idling operations. *Applied Energy*, 198-208.
- Rule, B., Worth, Z., & Boyle, C. (2009). Comparison of life cycle carbon dioxide emissions and embodied energy in four renewable electricity generation technologies in New Zealand. *Environmental Science & Technology*, 6406–6413.
- Santoyo, E., Almirudis, E., & Wong, J. (2012). *Geotermia: Energía de la Tierra*. México: Editorial Terracota.
- Santoyo, E., Tomasini, C., Castelazo, E. S., Gujba, H., & Romero, R. (2017). Life cycle assessment of geothermal power generation technologies: An updated review. *Applied Thermal Engineering*, 1119–1136.
- Sebastian, J., & Fidel, A. (2017). *Resultados en Laboratorio*. México: IER.
- SEMARNAT, & CFE. (2014). *Proyecto Geotermoeléctrico Los Humeros II, Puebla*. México.
- SENER. (2014). *Estrategia Nacional de Energía 2014-2028*. México.
- SENER. (2016). *Balance Nacional de Energía 2016*. México.

- SENER. (2016). *Reporte de Avances de Energías Limpias. Primer Semestre 2016*. México.
- SENER. (2017). *Reporte de Avances de Energías Limpias. Primer Semestre 2017*. México.
- Sharma, Y., & Singh, B. (2009). Development of biodiesel: Current scenario. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1646–1651.
- Silalertruksa, T., & Gheewala, S. H. (2012). Environmental sustainability assessment of palm biodiesel production in Thailand. *Energy*, 306-314.
- Song, J., Cheenkachorn, K., Wang, J., Perez, J., Boehman, A., & Young, P. (2002). Effect of oxygenated fuel on combustion and emissions in a light-duty turbo diesel engine. *Energy Fuel*, 294-301.
- Sullivan, J. L., & Wang, M. Q. (2013). Impact of Well Field Exploration on the Life Cycle Analysis of Geothermal Power Production. *GRC Transactions*, 817-822.
- Sullivan, J., & Wang, M. (2013). Life cycle greenhouse gas emissions from geothermal electricity production. *J. Renew. Sustain. Energy*.
- Sullivan, J., Clark, C., Han, J., & Wang, M. (2010). *Life cycle analysis of geothermal systems in comparison to other power systems*. Argonne USA: Argonne National Laboratory.
- Thinkstep. (01 de Marzo de 2018). *What does it do?* Obtenido de GaBi Software: Life Cycle Assessment: <http://www.gabi-software.com/mexico/overview/what-does-it-do/>

- Thinkstep. (01 de Marzo de 2018). *What is GaBi Software?* Obtenido de GaBi Software: Life Cycle Assessment: <http://www.gabi-software.com/mexico/overview/what-is-gabi-software/>
- Torres, R. D., Romero, I. I., Ibarra, I. A., & Heriberto, P. (2016). Biodiesel production from soybean and Jatropha oils using cesium impregnated sodium zirconate as a heterogeneous base catalyst. *Renewable Energy*, 323-331.
- Valdimarsson, P. (2011). Geothermal Power Plant Cycles and Main Components. *Short Course Geotherm. Drilling, Resour. Dev. Power Plants* (págs. 1–24). El Salvador: UNU-GTP and LaGeo.
- Wang, X., Bierwirth, A., Christ, A., Whittaker, P., Regenauer-Lieb, K., & Chua, H. T. (2013). Application of geothermal absorption air-conditioning system: A case study. *Applied Thermal Engineering*, 71-80.
- Xue, X., Collinge, W. O., Shrake, S. O., Bilec, .., & Landis, A. E. (2012). Regional life cycle assessment of soybean derived biodiesel for transportation fleets. *Energy Policy*, 295-303.
- Yürüsoy, M., & Keçebas, A. (2017). Advanced exergo-environmental analyses and assessments of a real district heating system with geothermal energy. *Applied Thermal Engineering*, 449-459.