

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS



**METODOLOGIA DE HUELLA ECOLOGICA: CALCULO DE
FACTORES DE PRODUCTIVIDAD ENERGETICA PARA LA
GENERACION DE ELECTRICIDAD A PARTIR DE
GEOTERMIA EN EL SALVADOR.**

PRESENTADO POR:

MANUEL ALEJANDRO PACHECO ACOSTA

MERCEDES DEL ROSARIO PÉREZ PARADA

LORENA SARAI VIERA REVELO

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, ABRIL 2016

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR INTERINO :

LIC. JOSE LUIS ARGUETA ANTILLÓN

SECRETARIA GENERAL :

DRA. ANA LETICIA ZAVALETA DE AMAYA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO :

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

DIRECTOR :

ING. TANIA TORRES RIVERA

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO QUÍMICO

Título :

METODOLOGIA DE HUELLA ECOLOGICA: CALCULO DE FACTORES DE PRODUCTIVIDAD ENERGETICA PARA LA GENERACION DE ELECTRICIDAD A PARTIR DE GEOTERMIA EN EL SALVADOR.

Presentado por :

MANUEL ALEJANDRO PACHECO ACOSTA

MERCEDES DEL ROSARIO PÉREZ PARADA

LORENA SARAI VIERA REVELO

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

M. en I. ALBA MARISELA SARAVIA CORTEZ

San Salvador, Abril 2016

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

M. en I. ALBA MARISELA SARAVIA CORTEZ

AGRADECIMIENTOS

A Dios

Por concedernos la oportunidad de culminar nuestra formación universitaria exitosamente y poder realizar nuestro trabajo de graduación el cual nos otorgó excelentes experiencias de vida que nos han llenado de satisfacciones en muchas áreas ya que llevamos a la práctica competencias que adquirimos a lo largo de nuestro estudio.

A nuestros Padres y Familiares

Por ser nuestro sostén económico, espiritual y moral a lo largo de la carrera, estando cada día para nosotros en cada alegría, tristeza, triunfo, desvelo y demás experiencias que juntos vivimos.

A Nuestros amigos y compañeros

Por cada momento que juntos vivimos en toda la trayectoria de la carrera siendo su convivencia apoyo en todos los sentidos, y su amistad un regalo que permitió vivir a plenitud esta etapa de nuestras vidas.

Al Personal Docente de la escuela de Ingeniería Química

Por proporcionarnos toda nuestra formación académica y brindarnos las herramientas necesarias para enfrentarnos al mundo laboral, por ser nuestros profesores y amigos referidos a las circunstancias que la vida presenta a cada instante. Agradecemos a nuestra asesora de trabajo de graduación M. en I. Alba Marisela Saravia Cortez por su asesoría. Agradecemos especialmente a nuestras amigas ingenieras Eugenia Gamero, Tania Torres y Delmy Rico por su inigualable calidad humana.

Y finalmente agradecemos a todas las personas e instituciones que de alguna u otra forma nos ayudaron e hicieron posible el cumplimiento de nuestra tan ansiada meta de convertirnos en Ingenieros Químicos.

A todos ustedes, Gracias.

Manuel Pacheco, Sarai Viera, Mercedes Parada.

DEDICATORIA

Es complicado intentar plasmar en este espacio la gratitud que invade mi ser al hacer memoria y recordar a tantos amigos que han influenciado de forma positiva esta etapa que ahora finalizo, todavía tengo presente las jornadas que soñé despierto tendido sobre un colchón delgado y viejo que recibí como regalo para dejar de dormir en el suelo, aquella pequeña mesa de madera en la que vi el nombre de mis hermanos para darme fuerzas cuando caí sumergido en el mar de la soledad, esa sonrisa sincera y sencilla de los pepenadores que buscaban comida en los basureros de la ciudad que me permitió recordar siempre que soy el hombre más afortunado y permitirme dar gracias al **Ser Supremo** por cada lección de vida que otorga a través de las personas que me rodean.

Con mucho amor agradezco a mi madre **Plácida** por ser excelente y más, nunca necesité de elementos materiales extraordinarios, un abrazo o un beso para saber que me ama, siempre estaré feliz de cada gesto de cariño, ternura, humildad, disciplina y respeto que recibí, no existen palabras para describir cada prueba de todo tipo que juntos enfrentamos con paciencia y fe en Dios en las que cada día con una sonrisa sincera fui feliz.

Con cariño profundo agradecer a mi padre **Adalberto** por cada expresión de amor que tuvo conmigo, soy testigo de cada sacrificio que realizó y no me alcanzaría toda la vida para devolverle su favor. Por cada amanecer que me brindaron una palabra de aliento, una corrección, y un buen saludo agradezco a mis hermanos **Mario, Melissa y Carlos** que son de los tesoros invaluable que poseo y amo.

A todos los docentes que han formado parte de mi proceso de formación, y también extraordinarios jefes cuando trabajé como auxiliar en algunas asignaturas en especial a mis estimadas **Tania Torres, Eugenia Gamero, y Delmy Rico.**

Gracias **Mercedes** y **Sarai** por ser las compañeras idóneas, recordaré siempre todo el trabajo que juntos realizamos, cada momento inigualable que vivimos fue genial y estaré siempre agradecido por haberlas encontrado en mi camino.

Gracias a todos y a los que no menciono textualmente pero que formaron parte de esta etapa y le dieron la esencia a cada día, estoy agradecido.

Manuel Alejandro Pacheco Acosta

DEDICATORIA

Dios no va a permitir que tengas una prueba, más allá de tus fuerzas, pero sí va a aprovechar que las pruebas te demuestren cuanta fuerza hay en ti que no sabías hasta pasarlas. (1 Corintios 10,13)

A Dios y la Virgencita por permitirme culminar mi carrera de Ingeniería Química y colmarme de sus gracias y bendiciones siempre.

A mí querida madre **Abelina** por su apoyo incondicional todos estos años en mi formación académica sin ella este logro no hubiera sido posible; por ser mi mayor ejemplo de superación y enseñarme que cuando se quiere lograr algo en la vida todo es posible confiando cada proyecto en las manos de Dios, con esfuerzo y dedicación. Te agradezco que siempre has sido una luz en el camino, mil gracias por tu amor todos estos años.

A mis **hermanos y mi padre** por bríndame siempre sus consejos y enseñanzas. A **William Ayala**, una persona muy especial en mi vida por darme su amor incondicional y su paciencia; pero sobre todo por haber llenado mis días de felicidad, gracias por estar siempre para mí apoyándome en cada momento de mi vida he impulsarme a ser mejor persona cada día.

A mis **abuelos y mi tía** gracias por apoyarme, aconsejarme, regañarme, corregirme y sobre todo por brindarme las herramientas necesarias durante toda la carrera y toda mi vida.

A todos los **docentes** de la escuela de Ingeniería Química que compartieron sus conocimientos y experiencias.

A mis **Amigos** que siempre me apoyaron y me acompañaron en este proceso; por animarme a nunca darme por vencida. En especial a **Claudio** que me brindo su amistad y apoyo incondicional en los últimos años; pero sobre todo gracias por creer siempre en mí y finalmente a mis compañeros de tesis **Manuel y Sarai** por su paciencia, cariño y por hacer de esta investigación una experiencia única y exitosa.

Mercedes del Rosario Pérez Parada

DEDICATORIA

Finalmente puedo ver cumplido uno de mis grandes objetivos al concluir esta etapa de mi vida la cual ha sido increíble desde el inicio hasta el final por tantos momentos alegres y difíciles. Doy gracias infinitas a **Dios** por su respaldo en todo momento, en cada decisión tomada, por darme la sabiduría e inteligencia necesaria para vencer cada dificultad presentada en mi vida y por llevarme siempre por el camino correcto dándome la fe necesaria para llegar hasta donde Él quiere que llegue.

A mis padres **Jorge y Lorena** por todo el apoyo en los buenos y malos momentos, ustedes han sido siempre el ejemplo más grande de superación que tengo, gracias por todo su amor, esfuerzos, enseñanzas, cuidados y paciencia para conmigo, por creer en mí aun en los momentos más complicados, esto es el fruto de su esfuerzo y dedicación a mi vida. Todo mi amor y admiración para ustedes.

A **Patty**, más que mi hermana eres mi mejor amiga gracias por compartir a mi lado tantas experiencias buenas y malas y hacer mi vida especial, gracias por brindarme tu apoyo, tus consejos y por ser mi luz, a papá **Ricardo**, mamá **Mila**, a mis primos y tíos gracias por ser esa familia que me ha acompañado en cada paso que doy y apoyarme en cada uno de mis sueños animándome a cumplirlos. A **Roberto** gracias por todo tu amor y comprensión, por ser el apoyo idóneo en cada momento, por compartir mis tristezas y alegrías y por siempre ser quien llena mi mundo de alegría y optimismo.

A **Manuel y a Mercedes**, mis compañeros de tesis, solo ustedes saben lo divertido que ha sido superar esta etapa de nuestras vidas, hemos compartido enojos, angustias, alegrías, cansancios, desvelos pero a pesar de todo y con ayuda de Dios logramos superar todos los obstáculos y podemos ver finalizado este sueño.

A mis amigas, gracias por el apoyo incondicional al pasar de los años las conozco desde siempre y no me han dejado sola en las buenas, malas y peores, gracias por ayudarme a continuar con cada meta propuesta y creer en mí, y finalmente gracias a todos los compañeros y maestros de la carrera de Ingeniería Química con los que tuve el privilegio de cursar materias, recordaré cada uno de los momentos vividos a su lado durante toda esta experiencia.

Lorena Sarai Viera Revelo

RESUMEN

De las herramientas de evaluación de sostenibilidad ambiental la huella ecológica mide los impactos que produce una población expresados en cantidad de terreno productivo relacionando consumos y productividades, en este sentido, permite planificar acciones encaminadas a la planeación de estrategias orientadas a lograr la sostenibilidad ambiental. Las energías generadas a partir de combustibles de origen no fósil se encuentran siendo potenciadas en El Salvador, la geotermia es una de ellas esta representó el 13% de la capacidad instalada en el año 2013 con proyecciones que ascienden al 20% al año 2018, sobre la base anterior, se presenta una metodología de cálculo de factores de productividad energética para geotermia regida por los lineamientos de huella ecológica la cual se construyó tomando como base investigaciones sobre ese mismo tema en otras energías de origen no fósil como hidráulica, fotovoltaica y otras. La metodología de cálculo sugiere realizar un inventario de generación de electricidad y superficie bioproductiva para cuantificar el valor de los factores de productividad.

Se realizó el cálculo de factores de productividad energética para las Centrales Geotérmicas de Ahuachapán y Berlín usando la metodología propuesta en este trabajo de investigación, los resultados reportados indican que los factores de productividad para Ahuachapán se encuentran en el intervalo de $3214.34 \text{ GJ/ha.año} - 5033.41 \text{ GJ/ha.año}$ vinculados a tecnología de generación flasheo simple y doble en turbinas de condensación en cuyo proceso de generación se encuentran involucradas y contabilizadas las plataformas de perforación, planta de producción, líneas de acarreo, y líneas de reinyección, para la central de Berlín, se encuentran en el intervalo de $4289.63 \text{ GJ/ha.año} - 9297.38 \text{ GJ/ha.año}$ generando con tecnología de planta híbrida con flasheo simple en turbinas de condensación y ciclo binario en cuyo proceso de generación se encuentran involucradas y contabilizadas las plataformas de perforación, plantas de producción, líneas de acarreo, y líneas de reinyección, se propone además factores para El Salvador, ellos se encuentran en el intervalo de $3829.01 \text{ GJ/ha.año} - 7756.62 \text{ GJ/ha.año}$, todos los factores se asocian a tierras bioproductivas de cultivo. Adicionalmente se efectuó un análisis comparativo entre factores de productividad energética calculados en este trabajo y los reportados por MIT evidenciando claras diferencias en términos de metodología, finalmente se desarrolló un análisis comparativo de huella ecológica retomando datos de inventario que reportan autores diferentes variando parámetros como factores de productividad energética y factor de equivalencia.

CONTENIDO

CAPITULO 1 DISEÑO DEL PROYECTO	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Planteamiento del problema	2
1.3 Justificación	7
1.4 Objetivos	8
1.4.1 Objetivo General	8
1.4.2 Objetivos Específicos	8
1.5 Alcances	9
1.6 Limitaciones	9
CAPITULO 2 SOSTENIBILIDAD	11
2.1 Generalidades de la sostenibilidad	11
2.1.1 Sostenibilidad social	12
2.1.2 Sostenibilidad Económica	13
2.1.3 Sostenibilidad ambiental	13
2.2 Diferentes enfoques de sostenibilidad	14
2.2.1 Sostenibilidad Fuerte y Sostenibilidad Débil	14
2.3 Herramientas de evaluación de sostenibilidad.	15
2.3.1 Indicadores económicos	17
2.3.2 Indicadores sociales	17
2.3.3 Indicadores ambientales	17
2.3.4 Indicadores específicos	18
2.4 Biocapacidad, Déficit Ecológico y Capacidad de Carga	20
2.5 Huella Ecológica	21
2.5.1 Generalidades	23
2.5.2 Metodología de Cálculo de Huella Ecológica	24
2.5.2.1 Corrientes materiales	27
2.5.2.2 Corrientes energéticas y residuos	28

2.5.3	Metodología de Huella Ecológica para diversas fuentes energéticas	29
CAPITULO 3 FACTORES DE PRODUCTIVIDAD ENERGÉTICA		33
3.1	Factores de productividad energética para energía fósiles	33
3.1.1	Generalidades	34
3.1.2	Factores de productividad energética para energía de origen fósil.	36
3.2	Factores de productividad energética para energía no fósiles	37
3.2.1	Metodologías de cálculo de factores de productividad	39
CAPITULO 4 ENERGIA GEOTÉRMICA		40
4.1	Generalidades	40
4.1.1	Antecedentes Históricos	47
4.2	Generación de energía geotérmica en El Salvador	50
4.3	Generación de energía eléctrica a partir de geotermia en el Salvador	51
4.4	Proceso de producción de energía geotérmica en la Planta de Ahuachapán.	55
4.4.1	Ciclo de generación.	56
4.4.2	Tipo de terreno involucrado en el proceso de generación.	57
4.5	Proceso de producción de energía geotérmica en la planta de Berlín.	58
4.5.1	Ciclo de generación.	59
4.5.2	Tipo de terreno involucrado en el proceso de generación.	61
CAPITULO 5 DESARROLLO DE LA PROPUESTA METODOLÓGICA		63
5.1	Fundamentos de la metodología para el cálculo de factores de productividad para geotermia.	63
5.2	Metodología de cálculo de factores de productividad energética para geotermia.	69
5.3	Aplicación de la metodología propuesta	71
5.3.1	Elaboración de inventario	71
5.3.2	Elaboración de inventario para planta generadora de Ahuachapán.	72
5.3.3	Elaboración de inventario para planta generadora de Berlín.	76
5.4	Análisis de inventario	79
5.4.1	Análisis de inventario para planta generadora de Ahuachapán.	79
5.4.2	Análisis de inventario para planta generadora de Berlín.	82

5.5 Resultados	86
CAPITULO 6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	90
6.1 Factores de productividad energética para la generación de energía geotérmica en El Salvador.	90
6.2 Análisis comparativo de factores de productividad energética en geotermia	96
6.3 Cálculo de HE asociada a geotermia.	98
6.4 Análisis comparativo de huella energética asociada a geotermia.	102
CONCLUSIONES	105
RECOMENDACIONES	109
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110
ANEXO 1	115
Tendencias del mercado eléctrico y potencial geotérmico nacional.	115
ANEXO 2	117
Factores de Conversión para energía eléctrica utilizados	117
ANEXO 3	118
Inventario de energía y superficie para cálculo de factores de productividad energética de geotermia	118
ANEXO 4	119
Inventario de energía para centrales de Ahuachapán y Berlín	119
ANEXO 5	123
Estimación de Superficie Bioproductiva para Plantas geotérmicas de Ahuachapán y Berlín	123
ANEXO 6	11928
Nomenclatura utilizada	11928

Listado de figuras

Figura 1-1	Relación entre el uso de Energía (Ktep) y el PIB a precios corrientes (millones de US\$).....	3
Figura 1-2	Promedio suministro histórico de energía primaria en El Salvador, 1993-2008.....	4
Figura 1-3	Conformación de la Matriz energética de El Salvador en el año 2013.....	5
Figura 1-4	Pronóstico de la composición de la matriz energética de El Salvador para el año 2018.	6
Figura 1-5	Precios Internacionales del combustible Fuel Oil N° 6	7
Figura 2-1	Países con Crédito y Déficit Ecológico.....	21
Figura 2-2	Composición de la Huella Ecológica (HE)	22
Figura 4-1	La corteza, manto y núcleo de la tierra	41
Figura 4-2	Límites de Placas tectónicas.....	43
Figura 4-3	Zonas abarcadas por el Cinturón de Fuego del Pacífico.	44
Figura 4-4	Componentes de un sistema geotérmico	45
Figura 4-5	Colector de las aguas calientes boratadas para extraer el ácido bórico. ...	48
Figura 4-6	Máquina usada en Larderello en 1904	49
Figura 4-7	Ubicación de los recursos geotérmicos de alta entalpía en El Salvador	51
Figura 4-8	Diagrama de esquema de generación de una planta geotérmica.....	52
Figura 4-9	Vista de la planta geotérmica de Ahuachapán.	56
Figura 4-10	Mapa Pedológico, Tipos de suelo para el departamento de Ahuachapán, El Salvador.....	58
Figura 4-11	Planta geotérmica de Berlín	59
Figura 4-12	Planta de ciclo binario Berlín.....	60
Figura 4-13	Esquema de funcionamiento dell ciclo binario en Berlín.....	61
Figura 4-14	Mapa Pedológico, Tipos de suelo para el departamento de Usulután, El Salvador.....	62
Figura 5-1	Superficies bioproductivas consideradas de la HE.....	64
Figura 5-2	Tecnología y ciclos de generación en geotermia.....	65
Figura 5-3	Motivos que pueden modificar las variables de un factor de productividad energética en geotermia.....	66
Figura 5-4	Diagrama de relación entre huella ecológica y factores de productividad energética.	67

Listado de figuras

Figura 5-5	Superficie bioproductiva relacionada al cálculo de factores de productividad energética para diferentes tipos de energías.....	68
Figura 5-6	Evolución histórica de la producción de energía bruta en central de Ahuachapán.....	79
Figura 5-7	Evolución anual de la capacidad instalada y producción bruta en la central de Ahuachapán.....	80
Figura 5-8	Tendencia en la producción bruta, neta y consumo interno en la central de Ahuachapán.....	80
Figura 5-9	Evolución histórica de la superficie bioproductiva en la central de Ahuachapán.....	81
Figura 5-10	Tendencia histórica de la producción bruta y la superficie bioproductiva en la central de Ahuachapán.....	82
Figura 5-11	Evolución histórica de la producción de energía bruta en central de Berlín.....	83
Figura 5-12	Evolución anual de la capacidad instalada y producción bruta de la central de Berlín.....	84
Figura 5-13	Tendencia en la producción bruta, neta y consumo interno de la central de Berlín.....	85
Figura 5-14	Evolución histórica de la superficie bioproductiva en la central de Berlín.....	85
Figura 5-15	Evolución histórica de la producción bruta y la superficie bioproductiva en la central de Berlín.....	86
Figura 5-16	Factores de productividad energética en la central de Ahuachapán.....	88
Figura 5-17	Factores de productividad energética en la central de Berlín.....	88
Figura 5-18	Factores de productividad energética Nacionales.....	89
Figura 6-1	Evolución histórica de factores de productividad energética.....	90
Figura 6-2	Contribución de cada central al factor de productividad energética nacional.....	90
Figura 6-3	Evolución histórica de producción bruta y factores de productividad energética en la central de Ahuachapán.....	92
Figura 6-4	Evolución histórica de producción bruta y factores de productividad energética en la central de Berlín.....	90
Figura 6-5	Evolución histórica de superficie bioproductiva y factores de productividad energética en la central de Ahuachapán.....	93

Listado de figuras

Figura 6-6	Evolución histórica de superficie bioproductiva y factores de productividad energética en la central de Berlín.	94
Figura 6-7	Elementos que afectan la generación de electricidad en geotermia.	95
Figura 6-8	Huella energética asociada a geotermia en el año 2013 para diferentes rubros	103

Listado de tablas

Tabla 1-1	Relación entre PIB per cápita, IDH, y uso de energía primaria per cápita.....	3
Tabla 1-2	Plan de proyectos nuevos, expansión y modificación de LaGeo.....	4
Tabla 2-1	Indicadores de Sostenibilidad	19
Tabla 2-2	Factores de Equivalencia utilizados para el cálculo de la HE.....	25
Tabla 2-3	HE de varias fuentes energéticas no fósiles	32
Tabla 3-1	Productividad energética de algunos combustibles fósiles	33
Tabla 3-2	Nuevos índices de conversión de combustibles fósiles.....	34
Tabla 3-3	Productividad de algunas fuentes energéticas no fósiles.....	38
Tabla 3-4	Parámetros a considerar para el cálculo de la productividad energética.....	39
Tabla 4-1	Clasificación de los sistemas geotérmicos.....	46
Tabla 4-2	Descripción de los equipos utilizados en el proceso de generación.....	53
Tabla 5-1	Inventario de producción de energía eléctrica en planta geotérmica de Ahuachapán.	72
Tabla 5-2	Inventario de Superficie Bioproductiva de planta geotérmica de Ahuachapán.	75
Tabla 5-3	Inventario de producción de energía eléctrica en planta geotérmica de Berlín.....	76
Tabla 5-4	Inventario de superficie bioproductiva de planta geotérmica de Berlín.....	78
Tabla 5-5	Factores de productividad energética en geotermia calculados.....	87
Tabla 6-1	Factores de productividad energética reportados.	96
Tabla 6-2	Factores de productividad energética.	97
Tabla 6-3	Valores asociados al cálculo de la HE de la producción de BE y BD.....	99
Tabla 6-4	Valores asociados al cálculo de la HE de la FIA.....	100
Tabla 6-5	Valores asociados al cálculo de la segunda aproximación de HE.....	100
Tabla 6-6	Valores reportados de huella ecológica variando factores de productividad energética y factores de equivalencia.	102
Tabla 6-7	Proporciones de cambio entre HE reportadas.	102

CAPITULO 1 DISEÑO DEL PROYECTO

1.1 Antecedentes

En la evaluación de sostenibilidad ambiental, existen indicadores que permiten realizar diagnósticos sobre la situación actual de un determinado proceso, uno de ellos es la huella ecológica, definido según Doménech (2007) como un indicador de sostenibilidad de índice único, desarrollado por Wackernagel y Rees en 1996 que mide todos los impactos que produce una población expresados en hectáreas de terreno productivo, brindando una idea clara y precisa del impacto de las actividades humanas sobre el ecosistema.

La huella ecológica es una herramienta que permite planificar acciones encaminadas a la planeación de estrategias orientadas a lograr la sostenibilidad ambiental. Además, Vázquez (2009) discute preocupaciones globales, como el deterioro ecológico y la desigualdad material también vincula estas mismas preocupaciones a la toma de decisión individual e institucional. Se define por la siguiente ecuación (Wackernagel y Rees, 2001):

$$Huella\ Ecológica = \frac{Consumo}{Factor\ de\ Productividad} \times Factor\ de\ Equivalencia \quad (\text{Ecuación 1})$$

En la ecuación 1 se observa que son necesarios valores de consumo y de productividad para calcular la huella ecológica, Alvarenga, Ayala y Portillo (2015) definen la productividad como “la cantidad de recursos renovables extraíbles de la naturaleza mediante un modelo de producción dado. Esta variable se representa habitualmente en unidades de recurso producido (puede ser masa, volumen etc.) entre la cantidad de terreno y tiempo utilizados para su producción”. El valor numérico de la productividad depende principalmente de la tecnología disponible en una región, por cuanto, es necesario conocer el valor de esta para cuantificar el valor de la huella ecológica (Wackernagel y Rees, 2001).

Los factores de productividad pueden estar relacionados a consumos materiales o energéticos, donde los factores de productividad energética reflejan la cantidad de energía necesaria por hectárea de terreno –con una base de tiempo generalmente un año- ligado a la fuente de donde es generada la electricidad, esta puede ser energía de combustibles de origen fósil o no fósil.

Coto-Millán, Doménech y Mateo (2008) presentan tres metodologías para estimar los valores de productividad energética para combustibles de origen fósil, todos basados en capacidad de absorción de CO₂:

- Estimaciones del IPCC.
- Factores de emisión extraídos del Análisis de Ciclo de Vida (ACV).
- Método de estimación por Cuentas Nacionales.

Para energías no fósiles (geotérmica, hidráulica, solar fotovoltaica, y otras) generalmente se asocia directamente a terreno construido (Wackernagel y Monfreda, 2004).

1.2 Planteamiento del problema

En la “Política Nacional de Energía” impulsada por el Consejo Nacional de Energía de El Salvador (CNE) se pretende diversificar la matriz energética fomentando el uso de energías no fósiles bajo el enfoque de desarrollo sostenible (CNE, 2010). En este informe, se muestran futuros escenarios sobre la demanda energética a nivel mundial por fuente de generación (ver Tabla A1-1, Anexo1) donde las tecnologías no hidráulicas modernas (incluyendo eólica, solar, geotérmica, de mareas, y energía de las olas) presentan mayor tasa de aumento.

Con una población superior a 5.7 millones de habitantes, según los censos de 2007 y con una extensión territorial de 20742 Km², El Salvador tiene la más alta densidad poblacional de todo el continente americano, Según el CNE (2010) con el crecimiento económico, la urbanización, el crecimiento demográfico y el acceso de servicios básicos de más sectores de la población salvadoreña aumentó la demanda de energía eléctrica; por otra parte, existe una relación entre el uso de la energía y el producto interno bruto (PIB), en este mismo sentido se afirma que si se compara el PIB el consumo per cápita de energía primaria y los índices de desarrollo humano (IDH) se encuentra que hay una correlación entre ellos, estando ampliamente reconocido que la energía es un elemento vital para la calidad de vida del ser humano y que tiene un papel central en los proceso de desarrollo de las naciones. Las afirmaciones anteriores se pueden observar en forma de números en la figura 1-1 y tabla 1-1 que se muestran a continuación.

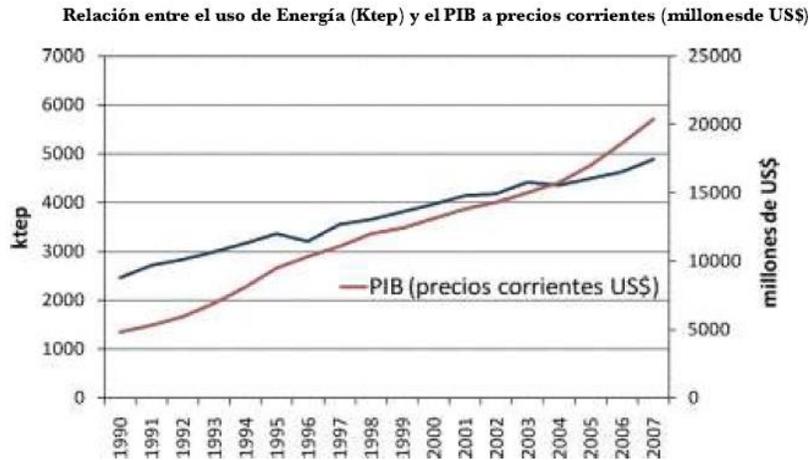


Figura 1-1 Relación entre el uso de Energía (Ktep) y el PIB a precios corrientes (millones de US\$).

Fuente: CNE, 2010, Política Nacional de Energía.

Tabla 1-1 Relación entre PIB per cápita, IDH, y uso de energía primaria per cápita

País	Índice de Desarrollo Humano (IDH)	PIB Per Cápita (US\$)	Consumo de Energía Primaria Per Cápita (MBTU)
Argentina	0.869	8236	81.4
Chile	0.867	10167	73.9
Costa Rica	0.846	6565	47.2
México	0.829	10249	66.5
Brasil	0.8	8536	54.1
El Salvador	0.735	3605	19.3
Nicaragua	0.71	1123	13.1
Honduras	0.7	1919	17.3
Guatemala	0.689	2848	15.9

Fuente: Adaptado de CNE, 2010, Política Nacional de Energía.

En cuanto al suministro histórico de electricidad por tipo de generación, se observa que la energía geotérmica pondera un aproximado del 27 % en el récord, como se muestra en la siguiente figura:

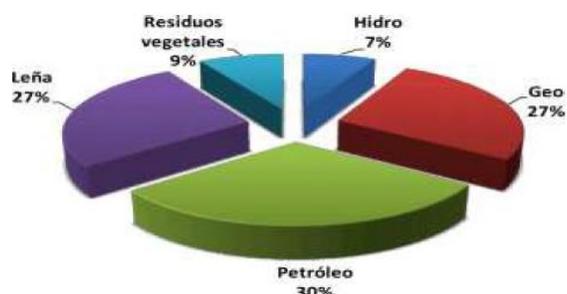


Figura 1-2 Promedio suministro histórico de energía primaria en El Salvador, 1993-2008.

Fuente: CNE, 2010, Política Nacional de Energía.

Dentro de las líneas estratégicas de la política energética de El Salvador, se encuentra la diversificación de la matriz energética y fomento a las fuentes no fósiles de energía, dentro de la cual se encuentra contemplada la geotérmica y la presenta como una alternativa que contribuirá al desarrollo sostenible y en un futuro a la no dependencia de generación de electricidad usando combustibles fósiles. Un dato importante que este estudio muestra es que estima el potencial de generación de energía en El Salvador a partir de geotermia entre 300 MW y 400 MW. (CNE, 2012)

A continuación se presenta una tabla donde se muestran los campos geotérmicos actualmente explotados y los posibles campos que podrían explotarse en un futuro.

Tabla 1-2 Plan de proyectos nuevos, expansión y modificación de LaGeo.

(Factibilidad) A: Probada (Definitiva), B: Probable, C: Posible

Ubicación	Plan	Adición (MW)	Factibilidad	Programación (año)
Ahuachapán	Modificación de la unidad-2.	5 a 9	A	2015
Berlín	Extensión de la unidad-5	25 a 30	A	2017
Chinameca	Nuevo desarrollo	30 a 50	B	2017
San Vicente	Nuevo desarrollo	10	C	N/A
-	Total (todos)	70 a 99	-	-
-	Total (para el 2017)	60 a 89	-	-

Fuente: Adaptado de CNE, 2012, Resumen del Plan Maestro para el Desarrollo de la Energía Renovable en El Salvador.

El Plan Maestro para el Desarrollo de la Energía Renovable en El Salvador, presenta una clasificación de los recursos de alta y baja entalpía con una estimación del potencial de dichos recursos tomando en cuenta que para los recursos de baja entalpía se supuso que el proceso para generación de electricidad es por tecnología de ciclo binario esto se muestra en el Anexo 1.

Por cuanto, existe la necesidad de establecer factores de productividad energética para la energía eléctrica a partir de geotermia en El Salvador, pues estos valores son diferentes para cada región, en El Salvador se carece de estos datos; además, esto permitirá evaluar por medio de un indicador como huella ecológica, el nivel de sostenibilidad ambiental de distintos sectores económicos, en términos de su huella ecológica asociada al consumo de energía proveniente de una fuente de energía no fósil.

Durante el año 2013 la energía geotérmica representó el 13% de la capacidad instalada (Ver tabla A1-4, anexo 1) con proyecciones que ascienden al 20% para el año 2018 (CNE, 2014).

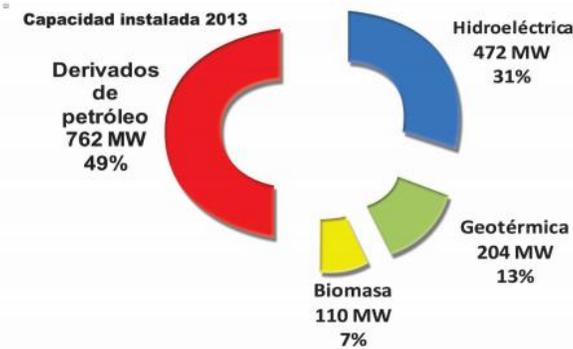


Figura 1-3 Conformación de la Matriz energética de El Salvador en el año 2013.

Fuente: CNE, 2014.

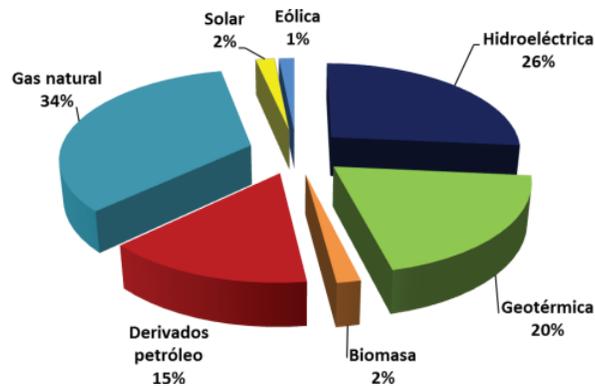


Figura 1-4 Pronóstico de la composición de la matriz energética de El Salvador para el año 2018.

Fuente: CNE, 2014

Por lo tanto, debido al crecimiento que está experimentando la geotermia en El Salvador, es necesario analizar la sostenibilidad ambiental de este recurso a partir de herramientas de evaluación de sostenibilidad ambiental como la huella ecológica y conocer los factores de productividad relacionados a esta fuente de energía renovable.

Los factores de productividad tienen dos enfoques local y global, y la metodología para realizar el cálculo de la huella ecológica puede ser compuesta y por componentes; por lo que el enfoque de factores de productividad que se maneja dependerá de la metodología de cálculo a utilizar para calcular la huella ecológica, ya que mientras autores como Doménech (2007), Wackernagel y Rees (2001) recomiendan el uso de factores de productividad globales al utilizar la metodología compuesta ya que así se hace posible la comparación de valores de huella ecológica a escala global. Otros como Hoekstra (2009) recomiendan que cuando se decida trabajar con la metodología por componentes utilizar factores de productividad específicos a la región obteniendo productividades más precisas, recalcando que, al calcular la huella ecológica total de un país con datos locales se debería obtener resultados similares que con datos globales.

Los factores de productividad energética que se desean calcular, como se mencionó anteriormente para la geotermia, son factores de productividad local, aclarando que hasta el momento de iniciar la investigación, el estudio de una metodología específica para el cálculo numérico de estos factores presenta poco proceso de desarrollo en El Salvador.

1.3 Justificación

El Consejo Nacional de Energía en 2014 a través del informe El camino del cambio de la matriz energética de El Salvador presenta a El Salvador como un país dependiente de los combustibles fósiles para la generación de energía, pues la generación a partir de estos representa el 49% de la capacidad instalada.

Al observar la figura 1-5, el mercado de la energía fósil es altamente inestable debido a las fluctuaciones en los precios internacionales, por cuanto, se buscan fuentes de energía no fósiles que puedan ser capaces de satisfacer la demanda energética nacional.

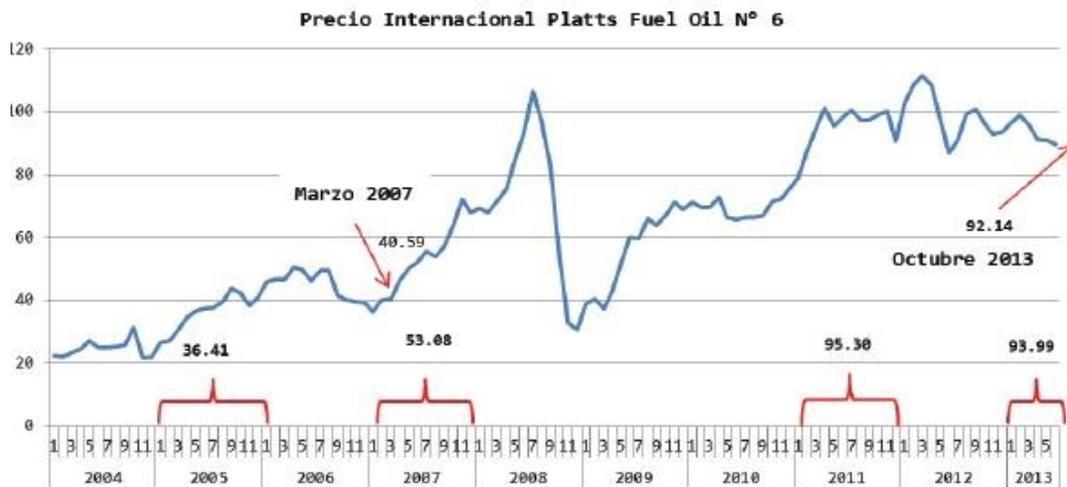


Figura 1-5 Precios Internacionales del combustible Fuel Oil N° 6 (US\$).

Fuente: CNE, 2014

Entre las numerosas fuentes de energía no fósiles existentes, la energía geotérmica y la energía hidroeléctrica son las que poseen un mayor desarrollo en El Salvador, pues representaron el 13% y 31% respectivamente de la capacidad instalada hasta el 2013 (CNE, 2014) por lo que deben ser consideradas como objeto de estudio para obtener un mayor aprovechamiento de estos recursos y disminuir la dependencia de los combustibles fósiles para la generación de energía.

Por el porcentaje que la energía geotérmica representó en la matriz energética a nivel nacional en el año 2013 y sabiendo que se espera aumentar este porcentaje en los próximos años (CNE 2014), es útil evaluar el grado de sostenibilidad ambiental en el

proceso de generación de electricidad proveniente de la geotermia en El Salvador a través de un indicador global como la huella ecológica.

Para Wackernagel y Rees (2001), la huella ecológica es una herramienta para la toma de conciencia que nos puede ayudar a desarrollar una comprensión común del problema y explorar las implicancias de soluciones alternativas. Como tal, puede ayudar a traducir la sostenibilidad a la planificación de acciones. Se determina la huella ecológica relacionada a la energía no fósil a partir del consumo directo de las fuentes de energía empleada y de la energía indirecta asociada a los distintos bienes de consumo.

Para calcular los factores de productividad energética (unidades de área superficial por energía) relacionados al cálculo de la huella ecológica es necesario desarrollar una metodología adaptada a las condiciones locales con respecto a la tecnología utilizada en el proceso de generación, ello permitirá calcular valores numéricos de factores productivos más exactos y precisos -para El Salvador- que los valores encontrados en bibliografía que no han sido desarrollados en el contexto de huella ecológica y que son convencionalmente usados para cálculos de esta índole.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Calcular Factores de productividad energética para la generación de electricidad a partir de geotermia en El Salvador para ser usados en la metodología de Huella Ecológica.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar la tecnología utilizada en las plantas de generación de electricidad a partir de los recursos geotérmicos en El Salvador.
- Diseñar una metodología que permita cuantificar valores numéricos de factores de productividad de energía eléctrica, a partir de los recursos geotérmicos en El Salvador.
- Realizar un análisis comparativo de los factores de productividad energética en geotermia, obtenidos como resultado en esta investigación y los obtenidos en bibliografía relacionada.

- Realizar un análisis comparativo de Huella Ecológica, utilizando, factores de productividad energética publicados en bibliografía especializada versus factores de productividad energética calculados en el trabajo de graduación.
- Elaborar una propuesta de asignación de tipos de terreno como metodología para el cálculo de factores de productividad energética en geotermia.

1.5 Alcances

Se caracterizará el proceso de producción de energía eléctrica en plantas geotérmicas que actualmente operan en El Salvador, posteriormente se diseñará una metodología para el cálculo de factores de intensidad energética ligado a la generación de electricidad a partir de geotermia, cuyas plantas, según LaGeo (2015) son 204.4 MW de potencia máxima instalada y una generación neta de 185 MW.

Los factores de productividad al ser dependientes de la tecnología disponible en una región, su valor, refleja mejor la situación actual de un lugar, por lo tanto, se estaría proporcionando valores de productividad para El Salvador bajo las condiciones tecnológicas actuales con las que se efectúa la generación de energía geotérmica, permitiendo realizar cálculos más fiables para el país sobre diagnósticos ambientales.

1.6 Limitaciones

Hasta el momento de realizada la investigación, no se tiene evidencia de investigaciones aplicadas al cálculo de factores de productividad de generación de energía eléctrica a partir de recursos geotérmicos, solamente se cuenta con datos tabulados en bibliografía relacionada de factores de productividad en el proceso de generación de energía eléctrica a partir de geotermia, donde relacionan el volumen de producción con el área que ocupan las plantas (MIT, 2006).

Estos datos pueden ser usados en una primera aproximación para el cálculo de huella ecológica, pero no están enfocados a esta metodología debido a que han sido desarrollados en otro contexto, y no han sido calculados con la tecnología de generación utilizada en El Salvador.

El cálculo de los valores de factores de intensidad energética, está sujeto a la adquisición de datos que el equipo obtenga de parte de la empresa generadora de energía geotérmica en El Salvador, por otra parte, la accesibilidad al lugar puede verse limitada por factores como vías de acceso en buen estado y delincuencia. Además, existe la limitante de recursos disponibles en términos monetarios y temporales, estos últimos, referidos a clima y disponibilidad de tiempo para realizar visitas de campo a las centrales generadoras.

CAPITULO 2 SOSTENIBILIDAD

A partir del informe Brundtland, el mundo es concebido como un sistema global cuyas partes están interrelacionadas considerándose el concepto de desarrollo sostenible como un proceso multidimensional que afecta al sistema económico, ecológico y social, pasando a ser una variable a tener en cuenta en las decisiones de política económica. Sin embargo, en los últimos años, una de las cuestiones más preocupantes ha sido el conocer si realmente se siguen pautas de sostenibilidad, es decir, si existen indicadores que alerten sobre la evolución positiva o negativa de este proceso. Aunque la ambigüedad del propio concepto dificulta esta tarea, se han ido elaborando algunos indicadores que muestran aspectos de las tres dimensiones mencionadas anteriormente (Fernández, Magaña y Pineda, 2015).

2.1 Generalidades de la sostenibilidad

La sostenibilidad surge como resultado del análisis de la situación mundial, que puede describirse como crítico debido a las actividades humanas, que amenazan gravemente el futuro de la misma humanidad. Se habla incluso de una etapa geológica nueva, el antropoceno, término propuesto por el premio Nobel Paul Crutzen para destacar la responsabilidad de la especie humana en los profundos cambios que está sufriendo el planeta (OEI, 2010).

Los conceptos de sostenibilidad, desarrollo sostenible, perdurable, o sustentable, se atribuyen al desarrollo socioeconómico. Su definición se formalizó por primera vez en el Informe Brundtland (1987), fruto de la Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo de Naciones Unidas, creada en Asamblea de las Naciones Unidas en 1983.

Según la ONU (1987) el desarrollo sostenible se define como, “el desarrollo que satisface las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades”.

No obstante, a pesar de la ambigüedad del concepto, si es posible aceptar un cierto consenso en torno al mismo. Por ejemplo, hay unanimidad respecto a su interpretación en cuanto que se entiende la sostenibilidad como la capacidad para continuar en el futuro realizándose, además, este proceso como la interacción entre tres sistemas: el ecológico (biológico), el económico y el social (Durán, 2013).

Por tanto, se puede argumentar que si el sistema natural y sus recursos constituyen la infraestructura física que posibilita el desarrollo de la sociedad, esta base física establece límites definidos por la disponibilidad de recursos naturales así como la disposición de los residuos generados. Es decir, la capacidad de una economía de mantener su flujo de ingresos a lo largo del tiempo depende de la sostenibilidad del medio físico donde se encuentra insertada. A partir de lo anterior, desde un punto de vista tanto económico como ecológico, el objetivo fundamental es el de la sostenibilidad de los sistemas tanto a medio como a largo plazo siendo igual de importante la consideración de los aspectos sociales lo que implicaría estudiar este concepto desde estos tres diferentes puntos de vista -económico, ecológico y social- (Durán, 2013).

2.1.1 Sostenibilidad social

La sostenibilidad social es una condición que mejora la vida dentro de las comunidades, marcada por un sentido fuerte de la cohesión social y la igualdad de acceso a los servicios esenciales (incluyendo salud, educación, transporte, vivienda y recreación). Se produce cuando los procesos formales e informales, sistemas, estructuras y relaciones apoyan activamente la capacidad de las generaciones actuales y futuras para crear comunidades sanas y habitables con el fin de proporcionar una buena calidad de vida (McKenzie, 2014; Fernández et al., 2015).

McKenzie (2014) menciona que las siguientes características son indicadores de la condición, y los pasos hacia su establecimiento y la aplicación son algunos aspectos del proceso para una sostenibilidad social:

- La igualdad de acceso a los servicios básicos (incluidos los de salud, educación, transporte, vivienda y recreación).
- Equidad entre generaciones, lo que significa que las generaciones futuras no serán perjudicados por las actividades de la actual generación.
- Un sistema de relaciones culturales en los que los aspectos positivos de dispares culturas son valorados y protegidos, y en el que la integración cultural es apoyado y promovido cuando se desea por individuos y grupos.
- Un sentido de propiedad de la comunidad.
- Un sistema para la transmisión de la conciencia de la sostenibilidad social de un generación a la siguiente.

- Un sentido de responsabilidad comunitaria para el mantenimiento de ese sistema de transmisión.
- Mecanismos para una comunidad para identificar colectivamente sus puntos fuertes y necesidades.
- Mecanismos para una comunidad para cumplir con sus propias necesidades cuando sea posible a través de la acción comunitaria.
- Mecanismos para la incidencia política para satisfacer necesidades que no pueden ser satisfechas por la acción comunitaria.

2.1.2 Sostenibilidad Económica

Se da cuando la actividad que se mueve hacia la sostenibilidad ambiental y social es financieramente posible y rentable. Promueve un uso inteligente de los recursos económicos en busca, no sólo de ahorrar sino de conseguir que el valor de la intervención sea mucho mayor que su precio (Fernández et al., 2015).

Se argumenta en el informe Brundtland que dice lo siguiente:

“Vemos la posibilidad de una nueva era de crecimiento económico que ha de fundarse en políticas que sostengan y amplíen la base de recursos del medio ambiente; y creemos que ese crecimiento es absolutamente indispensable para aliviar la gran pobreza que sigue acentuándose en buena parte del mundo en desarrollo (ONU, 1987).”

2.1.3 Sostenibilidad ambiental

El planeta como ecosistema global es fuente de los recursos necesarios para la sociedad y al mismo tiempo vertedero de todos los residuos originados por la actividad económica. Como el planeta es finito, el ecosistema global tiene límites tanto en cuanto a fuente de recursos y capacidad regenerativa, como en capacidad de asimilación (OIE, 2010).

La sostenibilidad ambiental busca preservar el capital natural esperando que el consumo de recursos materiales, hídricos y energéticos renovables no supere la capacidad de los sistemas naturales para renovarlos, y que la velocidad a la que se

consumen los recursos no renovables no supere el ritmo de sustitución de los recursos renovables duraderos. También sostiene que la cantidad de contaminantes que se emiten no superen la capacidad del aire, agua y suelo de absorberlos y procesarlos; implicando el mantenimiento de la diversidad biológica, la salud pública y la calidad de aire, suelo y agua a niveles suficientes para preservar la vida y el bienestar humano así como la flora y la fauna a lo largo del tiempo (MARM, 2008).

Para poder tener un panorama del impacto ambiental de un territorio asociado al consumo de bienes y energía, se podría realizar un análisis de la relación entre las actividades humanas que provocan el consumo de bienes y la superficie biológica necesaria para satisfacer dichas actividades, sin embargo para tener una idea de la sostenibilidad ambiental del territorio no es suficiente establecer la superficie necesaria para satisfacer las necesidades humanas, sino que además es necesario incluir conceptos como biocapacidad, déficit ecológico y capacidad de carga que se presentan en el apartado 2.3 para una mejor comprensión.

2.2 Diferentes enfoques de sostenibilidad

Partiendo de la definición Brundtland, Wackernagel y Rees (2001) argumentan que conceptualmente, la sostenibilidad es un concepto sencillo: implica vivir en forma cómoda en términos materiales y en paz unos con los otros dentro de los límites de la naturaleza. Se han desarrollado dos versiones del concepto de sostenibilidad mismo: sostenibilidad débil y sostenibilidad fuerte. La primera se ubica, al igual que el concepto de desarrollo sostenible, dentro del paradigma de la economía estándar, mientras que la segunda ha sido formulada por economistas heterodoxos, vinculados a la termodinámica y a la ecología (Luffiego y Rabadán, 2000).

2.2.1 Sostenibilidad Fuerte y Sostenibilidad Débil

La sostenibilidad débil considera que el capital natural y artificial puede ser plenamente sustituido por capital humano en un lapso de tiempo, fruto del desarrollo tecnocientífico, con tal de que el nivel total permanezca constante; el criterio de sostenibilidad fuerte, en cambio, toma en consideración la existencia de un capital natural crítico que no puede sustituirse por el humano. El capital natural crítico puede definirse

como capital natural que es responsable de funciones medioambientales esenciales y que no puede sustituirse por capital humano (Fernández et al., 2015).

Enfoques de la sostenibilidad débil (Fernández et al., 2015):

- Son acciones dirigidas a paliar o mitigar los efectos negativos del cambio ambiental sobre el desarrollo económico y social; así como también no pone en cuestión el modelo de sociedad en que vivimos, el origen de los conflictos en la interacción entre sociedad y entorno natural.

Enfoques de la sostenibilidad fuerte (Fernández et al., 2015):

- Implica la reflexión amplia sobre el origen de los conflictos resultantes de la interacción entre los ámbitos del desarrollo económico y la evolución del entorno ambiental, así como el social (vincular el ámbito económico, el ambiental y el social).

- Relaciona las problemáticas locales con las mundiales.

- Visión amplia e integral de los nuevos retos sociales. La cuestión de la sostenibilidad como problemática y reto a afrontar, se presenta al mismo tiempo como una oportunidad de transformación social, para afrontar conflictos existentes en otros ámbitos de la organización y vida social característicos de nuestro siglo. Iniciativa arriba/abajo.

- Acciones y políticas a medio y largo plazo, si bien la sostenibilidad se considera una meta permanente.

- Los gobiernos definen sus políticas ambientales a través de la regulación directa aunque, en algunos casos, se emplean otros mecanismos tales como los instrumentos económicos y fiscales como alternativas y/o complemento a la regulación.

Alternativamente, y con el fin de medir la realidad medioambiental y las pautas de sostenibilidad, algunos países han desarrollado indicadores económicos, ecológicos y sociales, así como nuevos instrumentos de medición que se presenta en el apartado 2.4. (Fernández et al., 2015).

2.3 Herramientas de evaluación de sostenibilidad.

Las evaluaciones de sostenibilidad emergieron como una de las herramientas más útiles para hacer operativo el concepto de desarrollo sostenible. El propósito de una evaluación ambiental es asegurar que las opciones de desarrollo sean ambientalmente

adecuadas y sostenibles; agregando que toda consecuencia ambiental, sea reconocida pronto para ejecutar las medidas preventivas y correctivas necesarias (Banco Mundial, 1991).

Masera, Astier y Galván-Miyoshi (2008) dicen que es posible encontrar tres grandes grupos de evaluaciones de sostenibilidad: aquellas que diseñan una lista bastante amplia de indicadores, aquellas que determinan índices agregados de sostenibilidad presentando como resultado un único valor, y aquellas que proponen marcos metodológicos más flexibles ya que parten de supuestos muy generales para luego ir adaptándose al contexto específico.

Las metodologías de cálculo se basan en la construcción de modelos de evaluación diseñados en tres etapas: formulación, implementación y evaluación, en donde, estas interactúan dinámicamente entre ellas (Masera et al., 2008).

Para conocer el nivel de sostenibilidad se deben generar parámetros que permitan cuantificar de manera objetiva el valor de cada uno de los tres pilares fundamentales de la sostenibilidad -económico, ecológico y social-. Estos parámetros se llaman indicadores y pueden definirse como medidas en el tiempo de un sistema que nos dan información sobre las tendencias de este, aspectos concretos que se requiere analizar, además sirven para la identificación y el mejoramiento de las condiciones en las que se encuentra el sistema fijando metas para acciones futuras (Bolívar, 2011).

Los indicadores permiten conocer de manera particular las necesidades de manejo de cada sistema, con miras a mantener o mejorar la productividad, reducir riesgos e incertidumbre, aumentar los servicios ecológicos y socioeconómicos, proteger la base de recursos, previniendo la degradación de suelos, agua y biodiversidad sin disminuir la viabilidad económica del sistema (Bolívar, 2011).

Hay diversas clasificaciones de los indicadores según Bolívar (2011) se han desarrollado dos tipos de indicadores: los indicadores de contenido que son aquellos que muestran el estado de un sistema y los indicadores de desempeño que son los que miden el comportamiento de un sistema, además establece tres grupos de indicadores en función de los siguientes aspectos:

- Económicos, ecológicos y sociológicos.
- Socio-económicos, ecoeficiencia y socio-ecológicos.

- Indicadores de desarrollo sostenible o sostenibilidad.

Los indicadores de sostenibilidad deben resumir extensos datos en una cantidad limitada de información clave significativa. Así mismo estos indicadores deben cuantificar la evolución en el tiempo de la situación medioambiental de cada región, determinando tendencias y permitiendo la corrección inmediata si fuera necesario (Bolívar, 2011).

Según Fernández et al. (2015), los indicadores de desarrollo sostenible se pueden clasificar de la siguiente manera:

2.3.1 Indicadores económicos

Su función es evaluar el nivel económico y la prosperidad de una región por medio de cálculos, estadísticas y estándares establecidos. La mayoría de los indicadores económicos utilizados tradicionalmente, no reflejan la sostenibilidad de una región, pero sí lo hacen si se combina su resultado con otro tipo de indicadores (ambientales y/o sociales).

Algunos ejemplos de indicadores económicos son:

- Número de compañías y empresas.
- Ingresos medios.
- Diversificación económica.

2.3.2 Indicadores sociales

Al igual que los indicadores económicos, los indicadores sociales, por si solos no miden la sostenibilidad de una región, lo hacen en conjunto con el resto de indicadores de un sistema. Estos indicadores son utilizados para evaluar el nivel de bienestar de una sociedad -calidad de vida-, como parte integrante de un desarrollo plenamente sostenible.

2.3.3 Indicadores ambientales

Los indicadores ambientales son aquellos que evalúan el estado y la evolución de determinados factores medioambientales como pueden ser el agua, el aire, el suelo, etc. Muchos indicadores ambientales expresan simplemente parámetros puntuales, otros

pueden obtenerse a partir de un conjunto de parámetros relacionados por cálculos complejos.

Estos indicadores independientemente de los otros tipos que componen un sistema, tampoco pueden medir la sostenibilidad de un municipio.

Algunos ejemplos de indicadores ambientales:

- Niveles de contaminación acústica.
- Niveles de contaminación atmosférica.
- Porcentaje de agua que recibe un tratamiento adecuado.
- Porcentaje de residuos recogidos selectivamente.
- Utilización del transporte público municipal.

Dentro de los indicadores ambientales se encuentran los denominados bioindicadores. Estos se basan en la utilización de organismos, proporcionando información sobre el estado medioambiental de un sistema.

2.3.4 Indicadores específicos

Los indicadores específicos son aquellos indicadores que aun pudiendo ser de carácter ambiental, económico o social, hacen referencia a aspectos específicos y concretos de cada región, tienen como objetivo prioritario la evaluación, cuantificación y adecuación de las actuaciones previstas para la consecución de los objetivos.

En la tabla 2-1 se describen algunos indicadores utilizados para evaluar la sostenibilidad ambiental:

Tabla 2-1 Indicadores de Sostenibilidad

Indicador	Descripción
Análisis Ciclo de Vida (ACV)	Es una herramienta de diseño que investiga y evalúa los impactos ambientales de un producto o servicio durante todas las etapas de su existencia (extracción, producción, distribución, uso y desecho) (ISO 14040, 2006). Por eso se suele llamar también análisis de la cuna a la tumba. La idea de este análisis es que un producto no impacta en el ambiente sólo cuando se usa, sino también cuando se fabrica o se desecha.
Auditoría medioambiental (AMA)	También llamada ecoauditoría, es un proceso de verificación, sistemático y documentado, que consiste en obtener y evaluar objetivamente la evidencia de auditoría, con el fin de determinar si el sistema de gestión ambiental de una organización cumple con los criterios de auditoría de sistemas de gestión ambiental, y en comunicar los resultados de este proceso al cliente (ISO 14011, 2002).
Huella de carbono	Se conoce como la totalidad de GEI emitidos por efecto directo o indirecto de un individuo, organización, evento o producto, iniciando desde la adquisición de la materia prima hasta el tratamiento de los desechos del proceso (Fernández et al., 2015).
Índice de Rendimiento Ambiental o Índice de Desempeño Ambiental	Es un método para cuantificar y clasificar numéricamente el desempeño ambiental de las políticas de un país, desarrollado por el Centro de leyes y políticas ambientales de la Universidad de Yale en conjunto con la Red de Información del Centro Internacional de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Columbia en el año 2006, con el objetivo de tener un indicador enfocado a que se evalúe el funcionamiento actual medio ambiental de cada país dentro del contexto de sostenibilidad esperando una mejor comprensión de la situación ambiental por parte del gobierno, investigadores, y de la población en general de cada país evaluado (Centro de leyes y políticas ambientales, 2006).
Huella Ecológica	Es un indicador biofísico de sostenibilidad que integra el conjunto de impactos que ejerce una población sobre su entorno, considerando tanto los recursos necesarios como los residuos generados para el mantenimiento del modelo de consumo de dicha población (MARM, 2008).

Fuente: Elaboración Propia.

2.4 Biocapacidad, Déficit Ecológico y Capacidad de Carga

Se entiende por biocapacidad como la capacidad de los ecosistemas de producir materiales biológicos útiles así como también, de poder absorber los materiales de desecho generados por los seres humanos. Mide la producción biológica de un área como resultado de agregar la producción de diversos ecosistemas dentro de un área específica -pastos, cultivos, bosques, mar productivo- también mide la superficie degradada. Además depende de las condiciones naturales sino de las prácticas agrícolas y forestales (GFN 2014; MARM, 2008). Se calcula multiplicando el área física actual por un factor de rendimiento junto con el factor de equivalencia apropiado y su unidad de medida es expresada en hectáreas globales (GFN, 2014).

Para evaluar el déficit o crédito ecológico de una región se deben conocer su biocapacidad y huella ecológica. La huella ecológica es una herramienta que nos permite estimar los requerimientos en términos de consumo de recursos y asimilación de desechos de una determinada población o economía, expresados en áreas de terreno productivo (Doménech, 2007).

Si la huella ecológica es mayor en relación a su biocapacidad, indica que la población consume más recursos de los que dispone, por lo tanto, se están apropiando de superficies fuera del territorio o implica que están consumiendo las reservas disponibles, generando un déficit ecológico (MARM, 2008).

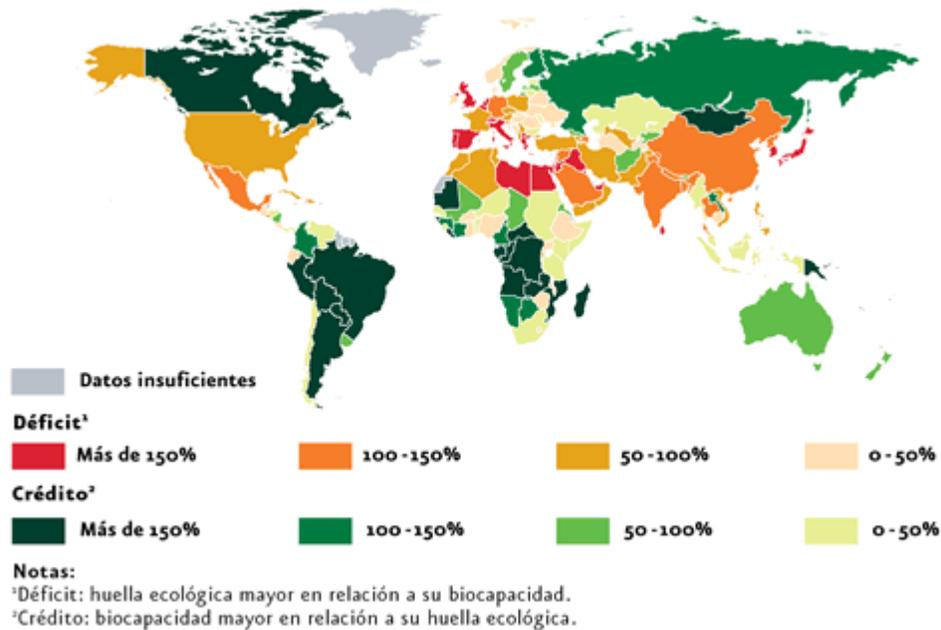


Figura 2-1 Países con Crédito y Déficit Ecológico

.Fuente: GFN, 2008.

Capacidad de Carga

Luffiego y Rabadán (2000), Wackernagel y Rees (2001) establecen que la capacidad de carga se basa en un principio clásico de la ciencia ecológica que sostiene que toda población alcanza un límite en su crecimiento de acuerdo con las características del medio donde se desarrolla. Esta capacidad puede definirse como: “El tamaño máximo de población que un territorio puede sostener en donde el consumo de recursos y la descarga de residuos no desequilibre de manera progresiva y permanente su integridad funcional y productiva”. Se puede extrapolar el concepto para el total de poblaciones que mantiene el ecosistema y, entonces, hablaríamos de capacidad de carga global del ecosistema. Es precisamente este concepto el que manejan los autores citados.

2.5 Huella Ecológica

Wackernagel y Rees (2001) definen Huella Ecológica (HE) como: “El área de territorio ecológicamente productiva -cultivos, pastos, bosques o ecosistema acuático (ver Figura 2-2) necesaria para producir los recursos utilizados y asimilar los residuos producidos por una población definida, con un nivel de vida específico, indefinidamente e

independientemente de la localización de esta área” asimismo, se tiene en cuenta el espacio ocupado por las infraestructuras, viviendas, equipamientos, etc. Es posible aplicar el indicador a varias escalas (individuos, vivienda familiar, ciudades, empresas, procesos, regiones, países y el mundo en conjunto).

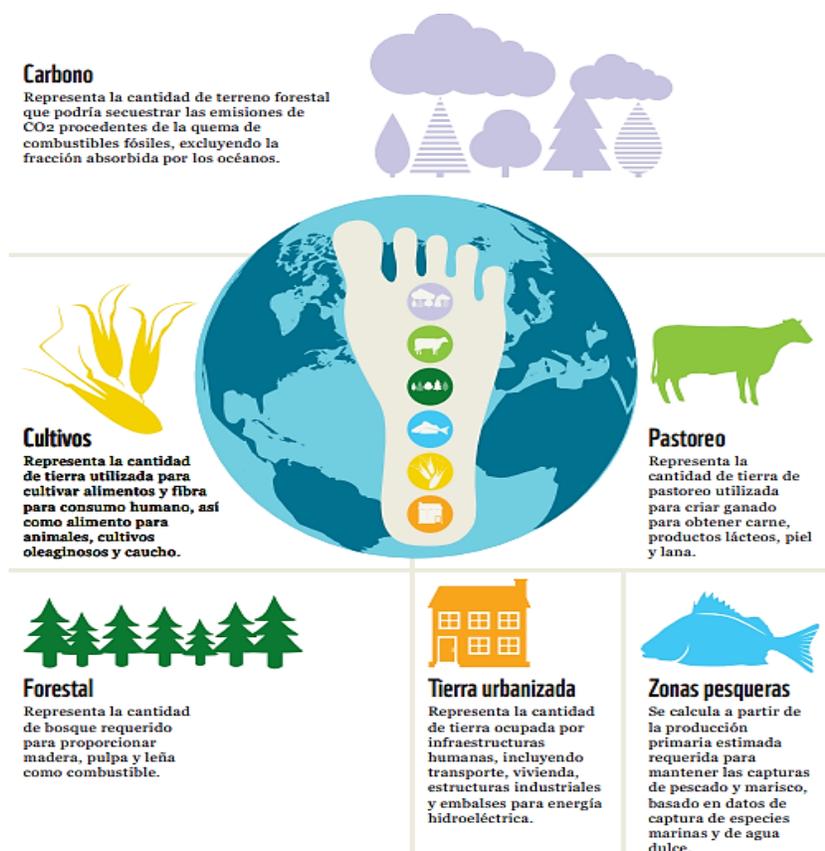


Figura 2-2 Composición de la Huella Ecológica (HE)

Fuente: GFN, 2014

Las unidades con las que se expresa este indicador dependen de la escala que se haya establecido para efectuar el cálculo, así puede ser: hectáreas por habitante por año (ha/hab/año) o hectáreas totales (ha) en un determinado período de tiempo.

Cada vez es más difícil para la población asociar su consumo de bienes y de energía a la producción de sus residuos con el impacto que estos provocan sobre el medio, debido a los progresivos procesos de concentración de la población en aglomeraciones urbanas y de globalización de los flujos materiales y de energía. Sin embargo la HE al agrupar en una variable numérica la intensidad del impacto que una determinada población ejerce sobre el ecosistema permite definir y visualizar la

dependencia de la sociedad humana respecto al funcionamiento de los ecosistemas del planeta a partir de las superficies necesarias para satisfacer un determinado nivel de consumo (MARM, 2008).

Puede decirse que la HE es un indicador de tendencia más que un valor numérico exacto por lo que permite hacer un seguimiento de sostenibilidad física de una población mediante la actualización del indicador a lo largo del tiempo, además de hacer posible la comparación de dicha sostenibilidad entre las diferentes escalas posibles.

2.5.1 Generalidades

La filosofía del cálculo de la HE parte de los siguientes aspectos (MARM, 2008):

- Para producir cualquier bien y servicio independientemente del tipo de energía utilizada se necesita un flujo de materiales y energía, provenientes de sistemas ecológicos o del flujo de energía directa del sol en sus diferentes manifestaciones.
- Se necesitan sistemas ecológicos para absorber los residuos generados durante el proceso de producción y el uso de los productos finales.
- El espacio es también ocupado con infraestructuras, viviendas, equipamientos, etc. Reduciendo así las superficies de consumo productivas.
- Aunque el indicador integra múltiples impactos hay que tener en cuenta los siguientes aspectos que subestiman el impacto ambiental real:
 - No quedan contabilizados algunos impactos especialmente de carácter cualitativo como la contaminación del suelo, la contaminación del agua, la erosión, la contaminación atmosférica (a excepción del CO₂), la pérdida de biodiversidad o la afectación del paisaje.
 - Se asume que las prácticas en los sectores agrícola, ganadero y forestal son sostenibles esto debido a que la productividad del suelo no disminuye con el tiempo. Obviamente dependiendo de las técnicas agrícolas la productividad puede disminuir a causa de erosión, contaminación, etc.
 - No se tiene en consideración el impacto asociado al agua más que la ocupación directa del suelo por embalses e infraestructuras hidráulicas y la energía asociada a la gestión del ciclo de agua.
 - Como criterio general se procura no contabilizar aquellos aspectos para los que existan dudas sobre la calidad del cálculo, eligiéndose también la opción menos amplia cuando se tiene que elegir entre dos o más posibles metodologías de cálculo.

2.5.2 Metodología de Cálculo de Huella Ecológica

La metodología de cálculo de la HE se basa en la estimación del terreno productivo necesario para satisfacer los consumos asociados a la alimentación, productos forestales, consumo energético y a la ocupación directa del suelo. Para calcular la HE se retoma la expresión definida anteriormente:

$$\text{Huella Ecológica} = \frac{\text{Consumo}}{\text{Factor de Productividad}} \times \text{Factor de Equivalencia} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Para el cálculo de la HE hay disponibles dos metodologías: Método Compuesto y Método por Componentes (Hoekstra, 2009). El primer método fue desarrollado para el cálculo de la HE de países, mientras que el segundo tiene mayor versatilidad y puede ser aplicado a menor escala, por ejemplo en instituciones, procedimientos etc (Alvarenga et al., 2015).

Método Compuesto

El método compuesto fue desarrollado por Mathis Wackernagel con objetivo de aplicarlo al cálculo de HE en países. En este método el enfoque comienza a partir de estimar los consumos a partir de estadísticas comerciales y datos energéticos nacionales y son utilizados factores de productividad globales (Alvarenga et al., 2015).

Hoekstra (2009) propone una metodología para calcular la HE total con este método (también llamado top-down) basada en la propuesta por Wackernagel y Rees, en la que se siguen los siguientes pasos:

1. Registrar los consumos totales de cada categoría siguiendo la siguiente fórmula:

$$\text{Consumo Neto} = \text{Producción Neta} + \text{Importaciones} - \text{Exportaciones} \quad (\text{Ecuación 2})$$

2. Convertir los datos de consumo en área bioproductiva utilizando los factores de productividad globales, el análisis se lleva a cabo por separado para cada una de las categorías según los tipos de terreno:

$$\text{Área Bioproductiva} = \frac{\text{Consumo}}{\text{Productividad}} \quad (\text{Ecuación 3})$$

3. Calcular la HE para cada tipo de terreno multiplicando las áreas bioproductivas por los factores de equivalencia (tabla 2-2), siguiendo la ecuación 1 antes mencionada.

Tabla 2-2 Factores de Equivalencia utilizados para el cálculo de la HE

Tipo de terreno	Factor de equivalencia
Absorción de CO ₂	2.64
Tierras de cultivo	2.51
Bosques	1.26
Pastoreo	0.46
Mar productivo	0.37
Tierra urbanizada	2.51

Fuente: Doménech, 2007

4. La HE total se obtiene por la sumatoria de las huellas calculadas para cada tipo de terreno.

Es importante mencionar que Los factores de equivalencia además de variar con cada tipo de terreno varían en el tiempo, es decir que sufren modificaciones de acuerdo a las productividades de los terrenos a través de los años (Fernández et al., 2015).

El mérito de este método es que se puede adaptar a partir de las bases de datos mundiales disponibles al público, además este método es más eficaz en la captura de los efectos indirectos, ya que capta los recursos que son utilizados por los habitantes de un país, independientemente de la actividad para los que son utilizados (Hoekstra, 2009).

Método por Componentes

Fue propuesto por la ONG inglesa BestFoot Forward, se considera un estudio más particular que el realizado en el método compuesto ya que se parte de datos específicos de consumo del área estudiada esto permite mayor versatilidad en su aplicación y exactitud en sus resultados (Alvarenga et al., 2015).

Según Hoekstra (2009) este método llamado también bottom-up, puede ser usado para calcular la HE de países, pero se considera más adecuado para evaluaciones más

específicas. En el método por componentes primero se deben identificar todos los componentes individuales (bienes y servicios) y las cantidades de los mismos que consume una población dada, como segundo paso se dividen los consumos entre la productividad local, luego se multiplica para cada componente el factor de equivalencia asociado, y posteriormente se calcula la HE total como la suma de las HE obtenidas en el punto anterior de todos los productos analizados.

Una ventaja de este método es que el enfoque es bastante flexible en el sentido que podemos elegir que tan detallado será el análisis, ajustando los componentes a evaluar en función de los consumos en consideración, otra ventaja es que por el desglose de los impactos de las actividades es más instructivo y puede convertirse en una herramienta educativa. Uno de los inconvenientes al querer utilizar este método para evaluar la HE de países es que este cálculo requiere una búsqueda más intensiva de datos siendo además vulnerable a la variabilidad y la fiabilidad de los datos, además no es suficiente tener datos concretos de productividades locales, sino que el consumo se debe especificar no solo por componente sino que también por su origen (Hoekstra, 2009).

Haberl et al. (2001), y Wackernagel et al. (2004), llevaron a cabo estudios en el que compararon los resultados al utilizar productividades locales con productividades globales llegando a la conclusión de que los dos enfoques pueden aplicarse para hacer frente a diferentes interrogantes de la investigación. El método compuesto que utiliza la productividad global puede ser utilizado para responder a la pregunta de cuánto del espacio bioproductivo disponible a nivel mundial es utilizado por una población dada, el método por componentes que utiliza productividades locales se puede utilizar para conocer la cantidad del área local que es utilizada por una población, además concluyen de que el enfoque por componentes depende de la calidad de los datos de consumo mientras que el enfoque compuesto se basa en la calidad de los datos económicos mundiales (Hoekstra, 2009).

En lo relativo al consumo energético, la HE se obtiene de manera diferente dependiendo de la fuente de energía considerada.

2.5.2.1 Corrientes materiales

La metodología para el cálculo de la HE se basa en la siguiente premisa:

“Todos los consumos, materiales y energéticos, y la absorción de residuos tienen su expresión correspondiente en territorio productivo pues requieren de éste para su producción o eliminación” (Wackernagel y Rees, 2001).

Según Wackernagel y Rees (2001) los diferentes tipos de territorio productivo que se consideran son:

- **Territorio para la absorción de CO₂:**

Es el territorio que se debería reservar para albergar bosques creados expresamente para secuestrar CO₂ que está continuamente liberándose a la atmósfera, a causa de la quema de combustibles fósiles.

- **Territorio para Cultivos:**

Es, ecológicamente hablando, la tierra más productiva pues en ella es donde se concentra la mayor producción neta de biomasa utilizable por el hombre.

- **Superficie de pastoreo:**

Es el área utilizada para el pastoreo de ganado. En su inmensa mayoría, es significativamente menos productiva que la agrícola.

- **Bosques:**

Se refiere a la superficie ocupada por bosques ya sean naturales o repoblados, pero siempre que se encuentran en explotación para la producción de productos forestales.

- **Áreas utilizadas directamente:**

Incluye las áreas ocupadas por superficies degradadas, embalses y áreas construidas u ocupadas por infraestructuras.

- **Mar productivo:**

Incluye las zonas marinas de las que es posible detectar una producción biológica razonable que pueda ser aprovechada por el hombre. Se incluye la extensión de mar u océano como la necesaria para proveer a la población de su consumo de proteínas marinas, es decir, sólo se tiene en cuenta aquella porción de mar cuya producción biológica es aprovechada por el ser humano en la actualidad.

- **Territorio reservado para la biodiversidad:**

Uno de los aspectos más polémicos del cálculo de la HE es el territorio productivo intocado que es necesario para reservar para la conservación de la biodiversidad y, en general, para mantener los servicios básicos que reporta la naturaleza y que son difícilmente cuantificables. Se supone una reserva del 12 % de cada tipo de territorio ya que esta cifra fue propuesta por la comisión redactora del informe “Nuestro Futuro Común”, pese a que, según diversas estimaciones, éste no resulta lo suficientemente elevado (Wackernagel y Rees, 2001).

Así, para determinar el total de la superficie de tierra requerida para sostener un cierto patrón de consumo, se estiman las implicancias del uso de suelo de cada categoría significativa de consumo. Como no es posible evaluar las demandas de suelo para el suministro, mantenimiento y disposición de cada uno de los miles de bienes de consumo, los cálculos se limitan a las principales categorías y artículos individuales.

2.5.2.2 Corrientes energéticas y residuos

Según Wackernagel y Rees (2001) si bien la descripción de la metodología de cálculo de HE se refiere al consumo de recursos, se puede aplicar la misma lógica a muchas categorías de producción y asimilación de desechos.

Se puede calcular el componente tierra para «fines energéticos» de la HE de varias maneras. Algunos métodos estiman el área requerida para cultivar combustibles biológicos sustitutos, que reemplacen las menguantes reservas de energía fósil. Si bien esta noción parece rebuscada, es importante recordar que los combustibles fósiles son los productos de un proceso de fotosíntesis muy antiguo y de la acumulación de biomasa

en los bosques y pantanos que surgieron sobre parte importante de la superficie de la tierra hace millones de años.

Por ese motivo, William Catton se refiere a esas tierras como tierras fantasmas (Wackernagel y Rees, 2001). Los ecosistemas desaparecieron hace mucho tiempo, pero se siguen usando o al menos su productividad, hasta hoy día. Catton señala que la humanidad está usando esta productividad pasada miles de veces más rápidamente de lo que se acumuló y que la naturaleza no es capaz de reemplazarla. En ausencia de reservas de sumideros de carbono con un buen manejo en la actualidad, se impone una carga a las generaciones futuras: menos recursos basados en el carbón y niveles elevados de CO₂ atmosférico. No todas las categorías de tierra ecológicamente productiva son igualmente accesibles o directamente cosechables por los humanos.

Al observar el cociente energía/tierra se describe cuánta energía utilizada por el comercio anual podría ser proporcionada por una hectárea de suelos ecológicamente productivos. Las unidades que se usan son Gigajoules por hectárea por año (GJ/há/año). Un Gigajoule representa mil millones de joules; 1,000 GigaJoules por segundo equivalen a un TeraWatt (Wackernagel y Rees, 2001).

2.5.3 Metodología de Huella Ecológica para diversas fuentes energéticas

Wackernagel y Rees (2001) recomiendan tres métodos para realizar el cálculo de la huella energética de huellas fósiles.

- El primer método calcula la tierra requerida para producir un sustituto del combustible fósil líquido, producido biológicamente. En efecto, ésta es el área de tierra necesaria para que se regenere la «tierra fantasma» de Catton. Este enfoque se basa en el principio de que una economía sustentable requiere una fuente de energía sostenible y, por lo tanto, no debe depender de un capital fósil agotable.

Aún, si el combustible se basa en el carbono, es preferible usar el carbono que ya está participando activamente de los ciclos de la ecósfera en lugar del carbono que ha sido almacenado por milenios en una reserva inerte. Este enfoque evita más acumulación de CO₂ en la atmósfera.

El etanol es uno de los potenciales soportes de energía renovable, es técnica y cualitativamente igual al combustible fósil. Es un combustible homogéneo y concentrado, que se almacena y transporta fácilmente, y que puede potenciar los procesos humanos en la misma forma que los hidrocarburos fósiles. Por estas razones ya se usa en algunos lugares como suplemento a la gasolina. Por lo tanto, el área de suelos que corresponde al consumo de combustibles fósiles puede ser representada como la tierra productiva necesaria para producir la cantidad equivalente de etanol. Esta área incluye la tierra necesaria para hacer crecer la materia vegetal (biomasa), tanto para el combustible mismo como la energía necesaria para procesarlo. Las estimaciones más optimistas de la productividad del etanol sugieren una productividad neta de 80 Gigajoules por año por hectárea de tierra ecológicamente productiva.

El metanol es otro posible sustituto para el combustible fósil. Algunos cálculos sugieren que cada kilogramo de madera destilada tendría un rendimiento de 10.5 a 13.5 Megajoules de metanol. Las plantaciones de árboles en Nueva Zelanda, con 12 toneladas de madera por hectárea por año, están entre los «bosques» más productivos a nivel mundial y tendrían una productividad del orden de un cociente tierra/energía de 120 a 150 Gigajoules por hectárea por año. Sin embargo, las productividades promedio de los bosques rusos, canadienses o escandinavos tendrían un rendimiento de solamente 17 a 30 Gigajoules por hectárea por año (aproximadamente 55 a 68 en EE.UU.).

- El segundo método estima el área de suelos necesaria hoy día para secuestrar el CO₂ emitido mediante la quema de combustibles fósiles. El argumento a favor de este enfoque es que no se debe permitir que el carbono fósil (en la forma de CO₂) se acumule en la atmósfera si se busca evitar un posible cambio climático. Si se sigue consumiendo cantidades excesivas de combustibles fósiles, se tiene la responsabilidad de manejar y asumir sus emisiones. Este enfoque requiere el cálculo de la cantidad de tierra que serviría de sumidero de carbono, para asimilar el CO₂ fósil que se está inyectando en la atmósfera.

Los ecosistemas boscosos y las turberas son sistemas naturales que son asimiladores netos muy significativos de CO₂. Bosques juveniles y en duración acumulan CO₂ a una tasa muy elevada, a lo largo de períodos que van desde 50 hasta 80 años. Los datos sobre las productividades boscosas promedio de los bosques templados,

boreales y tropicales, muestran que los bosques promedio pueden acumular aproximadamente 1.8 toneladas de carbono por hectárea por año. Esto significa que una hectárea de un bosque promedio puede secuestrar anualmente la emisión de CO₂ generada por el consumo de 100 Gigajoules de combustibles fósiles.

- El tercer método consiste en convertir el uso de energía fósil en el área de suelos correspondiente; estima por lo tanto el área de suelos requerida para reconstruir el capital natural a la misma tasa que el combustible fósil que está siendo consumido. Este método se basa en un argumento propuesto por el economista, Salah El Serafy del Banco Mundial, que establece que se acepta que una sociedad no es sustentable si su economía depende del agotamiento de su riqueza real (capital natural), entonces cualquier sociedad que utiliza sus recursos no renovables debe invertir una porción de las ganancias así generadas en construir valores renovables. Este enfoque –reemplazando lo que se está consumiendo– se relaciona directamente con el criterio de sostenibilidad que identifica la necesidad de mantener stocks constantes de capital, ya que la equidad intergeneracional es una precondition para la sustentabilidad.

Los cálculos muestran que una hectárea de un bosque regular podría acumular aproximadamente 80 Gigajoules de energía recuperable de biomasa por hectárea por año. (Una vez que las reservas de combustibles fósiles están agotadas y que empecemos a cosechar la tierra con fines energéticos, este método converge con el primero).

Las fuentes de energía no fósil (hidroeléctrica, eólica y solar) proporcionan productividades más altas, obteniendo huella ecológicas más pequeñas en comparación a las fuentes fósiles (Wackernagel y Rees, 2001), aunque las diferencias entre ellos a veces no son tan importantes. Su huella ecológica incluye tanto la superficie ocupada por las instalaciones destinadas a la producción de electricidad (área inundada por el embalse creado por la presas, molinos de viento y paneles fotovoltaicos, respectivamente), la energía incorporada en esta infraestructura, y la pérdida de la productividad debido a la utilización de la superficie para la producción de energía (Penela, 2008).

Como Wackernagel y Monfreda (2004), indican la importancia de la energía incorporada a la infraestructura necesaria para producir energía no fósil, es la componente más importante para el cálculo de la huella ecológica correspondiente a las energías no fósiles, al contrario que en el caso de las energías provenientes de combustibles fósiles en los que la energía necesaria para la extracción, el transporte, y la combustión es el componente más importante (Penela, 2008).

Sin embargo las metodologías de cálculo de HE energética actuales únicamente incluyen a la energía hidroeléctrica mientras que otras fuentes como la energía solar, geotérmica, eólica, y biomasa están descontinuados en gran parte porque HE energéticas son más pequeñas en comparación a la de las fuentes primarias de energía y porque se quiere evitar un doble cálculo de la huella (Cheng, 2008).

La HE para la energía hidroeléctrica está basada en estimaciones del área sumergida para la construcción de la presa más el área ocupada por las líneas de transporte de alto voltaje. Wackernagel y Rees (2001), dan valores de 160-180 GJ/ ha/año para presas pequeñas, 1500-5000 GJ/ha/año para presas de tamaño intermedio y 15,000 GJ/ ha/año para presas grandes (Cheng, 2008).

Tabla 2-3 HE de varias fuentes energéticas no fósiles

Fuente Energética	Huella ecológica por 100 GJ por año (en hectáreas)
Etanol	1.25
Absorción de CO₂	1
Reemplazo de biomasa	1.25
Hidroeléctrica (promedio)	0.1
Agua caliente, energía solar	0.0025
Energía fotovoltaica	0.1

Fuente: Adaptado de Wackernagel y Rees, (2001)

CAPITULO 3 FACTORES DE PRODUCTIVIDAD ENERGÉTICA

Los valores de productividad energética pueden referirse a la energía incorporada por unidad de bien o servicio a su vez relaciona la productividad de un determinado tipo de terreno (GFN, 2015; Wackernagel y Rees, 2001). La productividad energética es definida como la cantidad de energía que puede producir o asimilar una hectárea de terreno bioproductivo, para cada país es un valor diferente pues depende de factores como el tipo de terreno y la tecnología (Doménech, 2006).

Para calcular la razón de energía por hectárea esta varía según la fuente de combustible utilizada ya sea carbón, petróleo, madera, gas, etc. Wackernagel y Rees (2001) utilizan una aproximación para estimar la productividad energética de la tierra esta se basa en la estimación de la tierra necesaria para producir un sustituto del combustible fósil. Así por ejemplo, se estima la tierra necesaria para la producción de etanol (materia prima o biomasa y energía para el proceso) (Doménech, 2006).

3.1 Factores de productividad energética para energía fósiles

En el artículo *The ecological footprint of Santiago de Chile* Wackernagel (1998) presenta valores de factores de productividad energética para algunas energías de origen fósil y no fósil los cuales utilizó para calcular la huella energética de Santiago de Chile, éstos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3-1 Productividad energética de algunos combustibles fósiles

Huella Específica de Energía	[GJ/ha/año]
Carbón	55
Combustible Fósil Líquido	71
Gas de Origen Fósil	93
Energía Nuclear (Térmica)	71
Asumido para Ser Fósil	71
Energía Hidráulica	1000

Fuente: Adaptado de *The Ecological Footprint of Santiago Chile*, Wackernagel, 1998.

Tabla 3-2 Nuevos índices de conversión de combustibles fósiles

Para el cálculo de los factores de productividad energética para combustibles de origen fósil, esta se obtiene dividiendo el factor de absorción de carbono por el factor de emisión de carbono del combustible considerado (Coto-Millán et al., 2008).

3.1.1 Generalidades

El factor de productividad energética en los combustibles fósiles para cada tipo de combustible es diferente pues depende del estado físico y del tipo de elementos fósiles de estos. Coto-Millán et al., (2008) proponen utilizar un valor de productividad energética para combustibles fósiles como el gas-oil, gasolina y fuel oil un valor de 71 GJ / ha / año, pero actualmente puede usarse 51 GJ / ha / año y para el carbón un valor de 55 GJ / ha / año y se ha actualizado a 37 GJ / ha / año y para los combustibles gaseosos un valor de 93 GJ/ha/ año ahora es 65.5 GJ/ha/ año.

Tabla 3-2 Nuevos índices de conversión de combustibles fósiles

Combustible	Tasa de Absorción Bosque (tCO₂/ha/año)	Factor de Emisión con Factor de Oxidación (tCO₂/GJ)	Factores de Productividad Energética asociado a terreno bioproductivo: Bosque (GJ/ha/año)
Sólidos			
Antracita	3.6666	0.0973	37.7
Lignito	3.6666	0.1002	36.6
Carbón para Coque	3.6666	0.0937	39.1
Otro Carbón Bituminoso	3.6666	0.0937	39.1
Neumáticos (Fábricas de Cemento)	3.6666	0.0820	44.7

Continúa...

Tabla 3-2 Nuevos índices de conversión de combustibles fósiles

Combustible	Tasa de Absorción Bosque (tCO₂/ha/año)	Factor de Emisión con Factor de Oxidación (tCO₂/GJ)	Factores de Productividad Energética asociado a terreno bioproductivo: Bosque (GJ/ha/año)
Líquidos			
Gas-Oil	3.6666	0.0737	49.8
Gasolina	3.6666	0.0690	53.1
Fuel Oil	3.6666	0.0760	48.2
General LPC	3.6666	0.0650	56.4
Keroseno (No para Aviones)	3.6666	0.0715	51.3
Coque de Petróleo	3.6666	0.0983	37.3
Aceite y Lubricantes	3.6666	0.0729	50.3
Solventes (Fábricas de Cemento)	3.6666	0.0830	44.2
Aceite Usado (Fábricas de Cemento)	3.6666	0.0730	50.2
Gas			
Gas Natural (Seco)	3.6666	0.0560	65.5
Butano	3.6666	0.0662	55.4
Metano	3.6666	0.0546	67.2
Propano	3.6666	0.0636	57.7
CO	3.6666	0.0154	23.8
Hidrógeno	3.6666	0.0000	0.0

Fuente: Adaptado de Coto-Millán et al., 2008.

En la Tabla 3-2 se muestra una lista de los combustibles con los factores de emisión actualizados y el factor de emisión con Factor de Oxidación lo cual permite obtener un nuevo factor de productividad energética para cada combustible. Esto implica que en el momento de hacer el cálculo de la huella ecológica con estos factores actualizados presentan un resultado más real, pues tanto como la metodología de huella ecológica va evolucionando con el tiempo, las condiciones de la tierra, la tecnología van cambiando por lo que es necesario una actualización y una mejora en los factores de productividad.

3.1.2 Factores de productividad energética para energía de origen fósil.

1. Estimaciones del IPCC.

La "productividad energética" puede calcularse en base a dos factores de absorción de carbono diferentes: la más reciente del IPCC en 2001 (1 tC / ha / año o 3,66 tCO₂ / ha / año) y la que han estado utilizando hasta la fecha (1.42 tC / ha / año o 5,2 tCO₂ / ha / año).

2. Factores de emisión extraídos del Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

Esta metodología está basada en la estimación de emisiones de CO₂ de las diferentes tecnologías de producción de electricidad y quema de combustibles, ponderadas a través de sus factores de emisión específicos extraídos de Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

Para el CO₂, los factores de emisión dependen principalmente del contenido de carbono en el combustible. Condiciones de combustión (eficiencia de combustión, carbono retenido en escoria y cenizas, etc.) son relativamente poco importante. Por lo tanto, las emisiones de CO₂ pueden estimarse con bastante precisión basado en el total de la cantidad de combustibles quemados y el contenido de carbono promediado de los combustibles.

3. Método de estimación por Cuentas Nacionales.

Se basa en inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero documentados para cada país.

3.2 Factores de productividad energética para energía no fósiles

Wackernagel y Rees (2001) mencionan que las fuentes de energía no fósiles proporcionan productividades más altas que el combustible fósil, esto se debe a que en los combustibles no fósiles las emisiones del CO₂ se consideran cero (Cheng, 2008).

- Hidroeléctrica: El factor de productividad energética se calcula estimando la superficie ocupada por los embalses y las líneas de alto voltaje necesarias para la producción anual de electricidad, estimándose en una media de 1000 GJ/ha/año. Dicho factor depende también de la ubicación geográfica de la planta hidroeléctrica, para las presas ubicadas en altitudes altas sería de unas 15.000 GJ/ha/año, mientras que para las de altitudes bajas sería de 160 a 480 GJ/ha/año. Doménech, (2007), Wackernagel y Rees, (2001) proponen que en la energía hidroeléctrica, los requisitos de suelos se pueden estimar dividiendo la tierra inundada por las represas, más el área de tierra ocupada por los corredores de líneas eléctricas de alto voltaje, por su producción anual de electricidad.
- Fotovoltaica: Otras formas de energía no fósil alcanzan altas productividades, Wackernagel y Rees (2001) muestran una serie de análisis preliminares, la electricidad fotovoltaica a gran escala podría producir entre 100 y 1,000 GJ/hectárea por año. Estas estimaciones fueron confirmadas por la experiencia de una planta fotovoltaica de 2 hectáreas en los Alpes Suizos, que entregó en su primer año de operación aproximadamente 1,000 GJ de electricidad por hectárea a la red eléctrica. Teniendo en cuenta que la tecnología va mejorando la eficiencia de las placas, con una productividad mayor: 9 m² de superficie de panel por kW pico; 1100 kWh/m² de insolación (clima templado, no extremo, como el del norte de España); producción: 398 kWh/año por cada kW pico; producción por hectárea: 442,222 kWh/año (1,592 GJ/h).

Los recolectores solares de baja temperatura (para aplicaciones domésticas de agua caliente) bien diseñados pueden alcanzar entre 10,000 y 40,000 GJ por hectárea por año. (Doménech, 2006)

- Eólica: Otros ejemplos de energía no fósil incluyen la generación eólica en los lugares más ventosos de Norteamérica, la cual puede alcanzar entre 250 y 500 GJ por hectárea por año. El espacio físico ocupado por los molinos es solamente dos por ciento del área de una granja eólica, permitiendo así otros usos asociadas a la tierra, la productividad del molino puede variar en un rango entre 12,500 a 25,000 GJ por hectárea por año.

Para la energía eólica, Wackernagel y Rees estiman una productividad de 12,500 GJ/ha/año, si bien, debido a la mejora tecnológica, esta ha aumentado considerablemente (aerogeneradores de alrededor de 2 MW y auge de las tecnologías off-shore). Algunos parques presentan rendimientos óptimos como, por ejemplo, el proyectado para el Puerto de Bilbao (BOPV nº 240, de 17 de diciembre de 2004), el cual ocupa, para una potencia de 10 MW (5 torres de 2 MW cada una), una superficie de 7.350 m² (aerogeneradores + transporte de la energía fundamentalmente). Al régimen de vientos medio de una zona templada, como el norte de España (2000 a 3000 horas al año y vientos de 3,5 a 12 m/s) se estima una producción de 23.385 MWh/año.

Un resumen de las productividades energéticas de algunas fuentes no fósiles se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3-3 Productividad de algunas fuentes energéticas no fósiles

Fuente Energética	Productividad (GJ por hectárea por año.)
Etanol	80
Absorción de CO ₂	100
Reemplazo de biomasa	100
Hidroeléctrica (promedio)	1,000
Agua caliente, energía solar	Hasta 40,000
Energía fotovoltaica	1,000
Energía eólica	12,500

Fuente: Adaptado de Wackernagel y Rees, 2001.

3.2.1 Metodologías de cálculo de factores de productividad

En el desarrollo del cálculo de factores de productividad energética para las energías no fósiles hay publicaciones muy limitadas que muestren una metodología desarrollada en donde exista un algoritmo a seguir, solo se mencionan ciertos parámetros y factores que los autores toman en cuenta para cada tipo de energía. Es importante mencionar que estos factores de productividad dependen de factores como la tecnología y de la región geográfica de la planta.

La siguiente tabla muestra un resumen de algunos parámetros que se toman en cuenta para el cálculo de factores de productividad para algunos tipos de energía no fósiles.

Tabla 3-4 Parámetros a considerar para el cálculo de la productividad energética

Fuente energética	Parámetros
Hidráulica	<ul style="list-style-type: none">• Superficies ocupadas por los embalses.• Área de tierra ocupada por las líneas de alto voltaje.• Ubicación geográfica de la planta.• La producción anual de electricidad.
Fotovoltaica	<ul style="list-style-type: none">• Superficies del panel.• Eficiencia de las placas.• La producción de energía durante el año.
Eólica	<ul style="list-style-type: none">• Área ocupada por los molinos.• La producción anual de electricidad que depende mucho de la tecnología.
Solar térmica.	<ul style="list-style-type: none">• La tecnología.

Fuente: Elaboración propia.

Es importante recalcar que para la energía geotérmica no se cuenta con el cálculo de factores de productividad con el fin de poder ser utilizados en la metodología del cálculo de la huella ecológica.

CAPITULO 4 ENERGIA GEOTÉRMICA

4.1 Generalidades

La geotermia o calor de la tierra, es un fenómeno natural asociado a sistemas volcánicos activos. Dickson y Fanelli (2003) definen energía geotérmica como el calor contenido en el interior de la Tierra que genera fenómenos geológicos a escala planetaria; Sin embargo, también puede usarse para referir a la parte del calor de la tierra que se puede ser explotada por el hombre.

Otro concepto de energía geotérmica es el presentado por Arenívar, Martínez y Rivera (2013) que la definen como la energía almacenada en forma de calor por debajo de la superficie de la tierra, que engloba el calor almacenado en rocas, suelos y aguas subterráneas, cualquiera que sea su temperatura, profundidad y procedencia.

Según publicaciones presentadas por el CNE (2015) en El Salvador, este fenómeno lo encontramos al pie de la cadena volcánica que atraviesa el país, desde la zona de Ahuachapán hasta el volcán de San Miguel y Conchagua.

La energía geotérmica es utilizada en muchos países del mundo para distintas actividades productivas y económicas como: áreas destinadas para centros turísticos, calefacción de viviendas y edificios, secado de frutas y especialmente para la producción de energía eléctrica.

Los recursos geotérmicos se encuentran en todo el mundo, pero los sistemas geotérmicos que pueden ser explotados, se encuentran principalmente en las regiones con gradientes geotérmicos altos (aproximadamente $30^{\circ}\text{C}/\text{Km}$), presentan una interacción entre los estratos rocosos del subsuelo cercanos a un volcán activo y el calor emitido por la cámara magmática de dicho volcán, aunque actualmente también pueden encontrarse zonas con potencial geotérmico, en las que no la actividad superficial no es tan evidente como: formaciones sedimentarias con agua subterránea caliente, en la profundidad de los océanos, bajo las capas de hielo de los glaciares, entre otros. (Saemundsson, Axelson y Steingrímsson, 2009).

Para entender el origen de los recursos geotérmicos se estudia la tectónica de placas, que define a las placas tectónicas o continentales que forman la superficie de la tierra y a los desplazamientos, direcciones e interacciones que se observan entre ellas. La tectónica de placas está fundamentada en la teoría de la deriva continental, propuesta por Alfred Wegener a principios del siglo XX que pretendía explicar hecho de que los contornos de los continentes ensamblan entre sí como un rompecabezas y que estos tienen historias geológicas comunes.

Tarback y Lutgens (2005) mencionan que la tierra está formada por diferentes estratos rocosos y su núcleo es una masa líquida e incandescente compuesta de minerales, gases, rocas fundidas, comúnmente llamada magma, que es el material que expulsan los volcanes al hacer erupción.

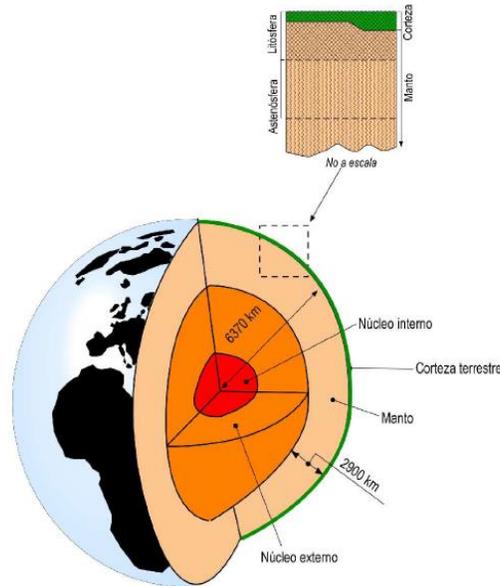


Figura 4-1 La corteza, manto y núcleo de la tierra

Fuente: Dickson y Fanelli, 2003.

Dickson y Fanelli (2003) presentan valores del flujo calórico total de la tierra de aproximadamente 42×10^{12} W (conducción, convección y radiación). De este total, 8×10^{12} W provienen de la corteza, la cual representa sólo el 2% del volumen total de la Tierra, pero que es rica en isótopos radioactivos; 32.3×10^{12} W provienen del manto, el cual representa el 82% del volumen total de la Tierra y 1.7×10^{12} W provienen del núcleo, el cual corresponden al 16% del volumen total y no contiene isótopos radioactivos (figura 4.1).

Dickson y Fanelli (2003) también argumentan que el proceso de enfriamiento es aún muy lento, ya que estiman que la temperatura del manto ha disminuido en no más de 300 a 350°C en tres mil millones de años.

Según los altos valores de flujo de calor mencionados anteriormente, podría plantearse que la energía térmica de la tierra es inmensa pero solo una fracción de ella podría ser utilizada por la humanidad. Hasta ahora la utilización de esta energía ha estado limitada a áreas en las cuales las condiciones geológicas permiten un transporte para “transferir” el calor desde zonas calientes profundas hasta o cerca de la superficie.

El calor es transferido hacia la superficie, y el magma se caracteriza por tener una tendencia ascendente en donde, la presión que ejerce sobre los estratos rocosos desde el interior de la tierra y la distribución desigual de la temperatura, es la fuerza que originó la división de la tierra en continentes y a las placas tectónicas (Tarbuck y Lutgens, 2005).

Tarbuck y Lutgens (2005) establecen que dado que las placas tectónicas se desplazan sobre la superficie de la tierra unas con otras a lo largo de sus bordes o límites, mantienen una interacción entre ellas provocando intensas deformaciones en la corteza y litosfera de la tierra, dando lugar a la formación de grandes cadenas montañosas (cordilleras de Himalaya, Alpes, Pirineos, Apalaches, Andes, entre otros) y grandes sistemas de fallas asociadas con estas (sistema de fallas de San Andrés entre otros). El contacto por fricción entre los bordes de las placas es responsable de la mayor parte de los terremotos. Otro fenómeno asociado es la creación de volcanes (notorio en el Cinturón de Fuego del Pacífico) y las fosas oceánicas.

Hay tres tipos de límite que se diferencian por los movimientos que presentan dichas placas y que pueden observarse en la figura 4-2. Estos límites son definidos por Tarbuck y Letgens (2005) como:

- Límites divergentes: Son límites en donde las placas se separan y provocan el ascenso de material magmático o lava que al enfriarse crea suelo oceánico nuevo. Son llamadas dorsales oceánicas.
- Límites convergentes: Son límites en donde las placas tectónicas se aproximan chocando una con otra para dar origen a lo que conocemos como subducción, debido

a que una placa se sumerge por debajo de la otra. Esto es lo que sucede en el límite de las placas de Cocos y la placa del Caribe.

- Límites de falla transformante: Aquí es donde las placas se deslizan de forma vertical y horizontal, una respecto de la otra, pero sin producir ni destruir litósfera.

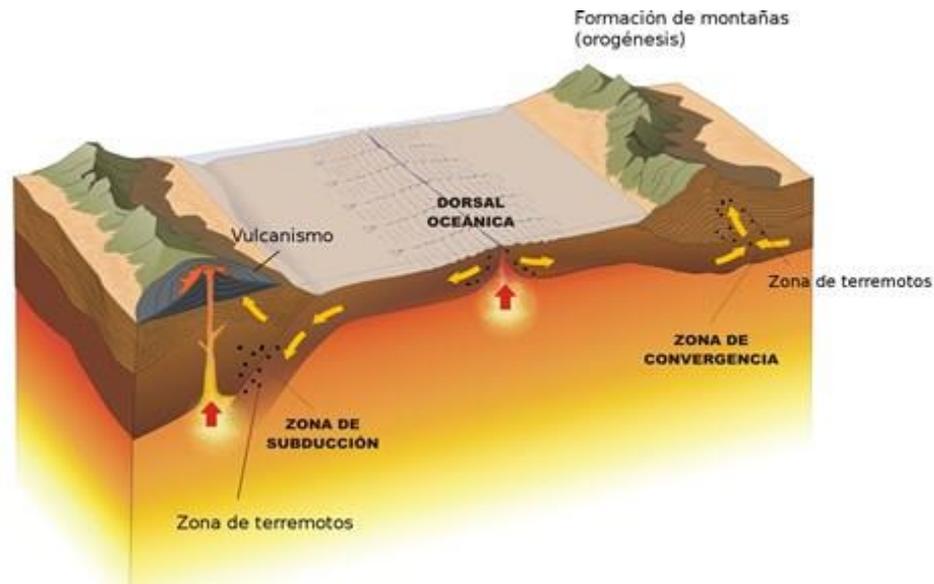


Figura 4-2 Límites de Placas tectónicas

Fuente: Tarbuck y Lutgens, 2005.

El Cinturón o Anillo de Fuego del Pacífico es un fenómeno geológico producto de la actividad en la zona de convergencia de las placas tectónicas, presenta una forma de herradura alrededor del océano Pacífico y se caracteriza por concentrar algunas de las zonas de subducción más importantes del mundo, lo que ocasiona una intensa actividad sísmica y volcánica en las zonas que abarca (LaGeo, 2015), que como puede observarse en la figura 4-3 incluye a países de Norte, Sur y Centro América, Rusia, Japón, Taiwán, Filipinas, Indonesia, Nueva Zelanda, entre otros.

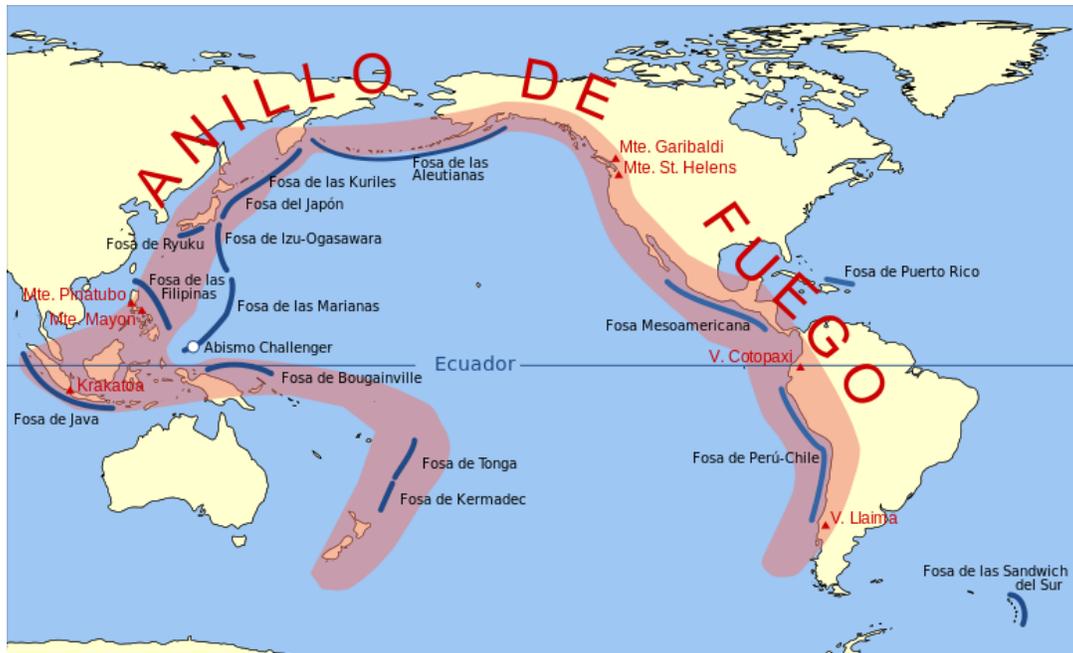


Figura 4-3 Zonas abarcadas por el Cinturón de Fuego del Pacífico.

Fuente: LaGeo, 2015.

Entre los conceptos que tienen alta importancia para explicar y fundamentar el desarrollo geotérmico se tienen:

- **Campo geotérmico:** Por lo general indica el área de actividad geotérmica en la superficie de la tierra. En casos en los que no se perciba una actividad superficial, este término es usado para indicar el área en la superficie bajo la cual se encuentra el reservorio geotérmico. En esta área se da la perforación de los pozos para extraer el fluido geotérmico que luego en la superficie es separado y transportado.
- **Planta geotérmica:** Es el área en donde la energía geotérmica es convertida a energía eléctrica.
- **Pozo geotérmico:** Los pozos geotérmicos de explotación que se encuentran en un campo geotérmico se clasifican en productores y reinyectores. Los primeros son utilizados para extraer el vapor del reservorio, el cual es conducido hasta la turbina para generar electricidad. En cambio los reinyectores son los que conducen el agua residual del campo geotérmico para ser de vuelta al reservorio a través de ellos. También se pueden encontrar pozos exploratorios que se utilizan para corroborar,

ampliar y eventualmente modificar los conocimientos obtenidos en la fase de exploración superficial.

- Sistema geotérmico: Está constituido por tres elementos principales: Una fuente de calor, un reservorio y un fluido el cual es el medio que transfiere el calor, como puede observarse en la figura 4-4, los sistemas geotérmicos se clasifican comúnmente según la temperatura, entalpia y el estado físico.

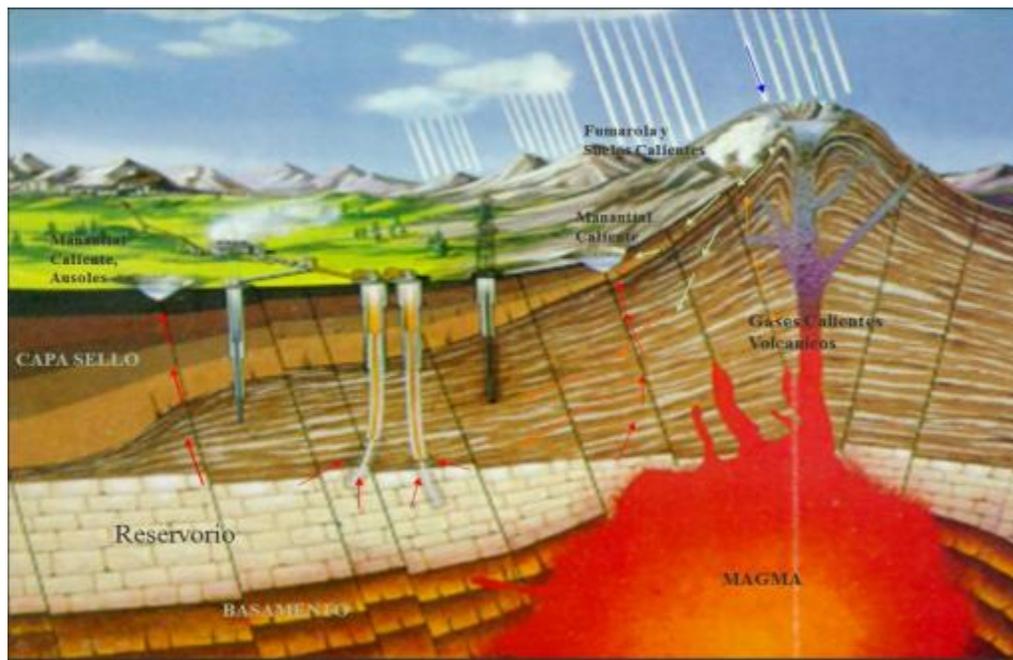


Figura 4-4 Componentes de un sistema geotérmico

Fuente: Arenívar et al, 2013.

Arenívar et al (2013) definen a los componentes de un sistema geotérmico como:

- Capa sello: Representa el estrato más superficial del sistema, compuesto por formaciones prácticamente impermeables, que actúan como un aislante que impide el escape, hacia la superficie, tanto del calor como de los fluidos almacenados por debajo de ella.
- Reservorio geotérmico: Este estrato está generalmente formado por rocas calientes y permeables con un volumen suficientemente grande que permiten el almacenamiento y circulación de fluidos (agua y/o gases), a alta temperatura y

presión. El reservorio es la parte más importante del campo pues es el estrato que almacena el fluido de trabajo (vapor) utilizado para la generación de energía eléctrica.

- **Zona de recarga:** La existencia de una formación que tenga capacidad de almacenamiento de fluidos geotérmicos requiere, necesariamente, de una alimentación, la cual es generalmente el agua de lluvia, que se infiltra tanto en el campo como en las zonas aledañas al mismo a través de fallas geológicas, chimeneas de volcanes y cualquier otro tipo de permeabilidad que exista en el área.
- **Basamento:** Es la base del reservorio y está formado por rocas impermeables, por lo cual la transmisión de calor se produce principalmente, por mecanismo de conducción desde la fuente de calor.
- **Fuente de calor:** Dentro de un sistema geotérmico, la transferencia de calor necesaria para la existencia de las características de alta presión y temperaturas en reservorio generalmente se produce a través de intrusiones magmáticas situadas a niveles relativamente profundos de la corteza terrestre (5-15 km) cuya temperatura puede oscilar entre los 600 y 900 °C.

La clasificación de los sistemas geotérmicos puede observarse en la tabla 4-1

Tabla 4-1 Clasificación de los sistemas geotérmicos

Según su Temperatura	Según su Estado Físico	Otros tipos de Sistemas
<p>Baja temperatura (LT): La temperatura de reservorio a 1 km de profundidad, está por debajo de 150°C. A menudo caracterizado por manantiales calientes o ebullición</p>	<p>Líquido dominante: Con agua a temperaturas en o por debajo del punto de ebullición a la presión prevaleciente, la fase líquida controla de presión en el reservorio. Algo de vapor puede estar presente</p>	<p>Roca seca caliente: Están constituidos por rocas impermeables, temperatura entre 150 °C y 300 °C, y carecen de un fluido que lo recorra, lo que hace difícil su explotación, a pesar de representar un porcentaje muy elevado de los recursos geotérmicos mundiales, aún están en investigación.</p>

Continúa...

Tabla 4-1 Clasificación de los sistemas geotérmicos

Según su Temperatura	Según su Estado Físico	Otros tipos de Sistemas
<p>Media-temperatura (MT): La temperatura de reservorio a 1 km de profundidad, es entre 150 y 200 °C</p>	<p>Reservorios geotérmicos en dos fases: Es en donde coexisten vapor y agua. La temperatura y presión siguen la curva del punto de ebullición</p>	<p>Geopresurizados: Contienen agua y gas disuelto a alta presión y temperaturas moderadas. Comprende tres tipos de energía (térmica, química y mecánica).</p>
<p>Alta temperatura (HT): La temperatura a 1 km de profundidad, está por encima de 200°C. Está Caracterizado por fumarolas, respiraderos de vapor, lodos hirvientes y suelo altamente alterado</p>	<p>Vapor dominante: Donde la temperatura está en, o por encima de la ebullición a la presión correspondiente y la fase de vapor controla la presión en el reservorio. Algo de agua líquida puede estar presente.</p>	<p>Submarinos y Magmáticos: Los submarinos son sistemas de alta entalpía existentes en el fondo del mar. Los sistemas magmáticos son aquellos que tienen roca fundida existente en volcanes activos y tienen una temperatura $\geq 800^{\circ}\text{C}$, ambos sistemas no se explotan comercialmente en la actualidad y han sido poco estudiados.</p>

Fuente: Adaptado de Arenívar et al, 2013

4.1.1 Antecedentes Históricos

Describiendo en términos generales la historia de la energía geotérmica, Dickson y Fanelli (2003) mencionan que es a inicios del siglo XIX que los fluidos geotermales fueron explotados por su contenido energético. En ese período se instaló en Italia una industria química (en la zona actualmente conocida como Larderello), para extraer el ácido bórico de las aguas calientes boratadas que emergían naturalmente de los pozos perforados. El ácido bórico se obtenía mediante evaporación de las aguas boratadas en bateas de hierro, usando como combustible la madera de los bosques de los alrededores. En 1827

Francisco Larderel, desarrolló un sistema para utilizar el calor de los fluidos en el proceso de evaporación, sustituyendo la práctica de quemar la madera de los bosques provocando un rápido agotamiento de este recurso (figura 4-5).

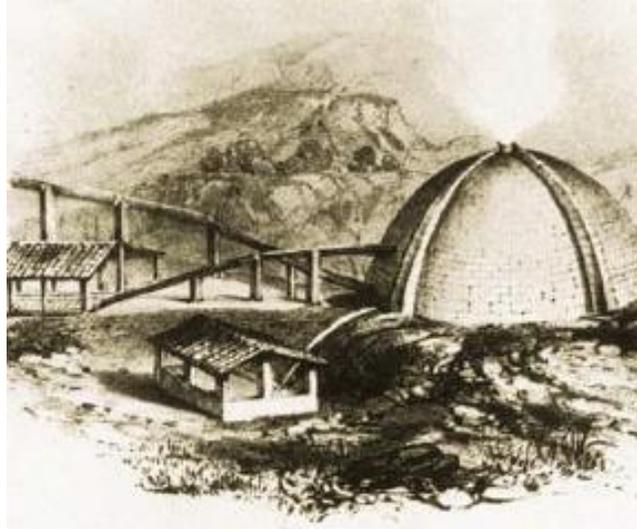


Figura 4-5 Colector de las aguas calientes boratadas para extraer el ácido bórico.

Fuente: Dickson y Fanelli, 2003.

La explotación del vapor natural por su energía mecánica empezó ese mismo tiempo. El vapor geotérmico se utilizó para elevar líquidos en primitivos elevadores por presión de gas y más tarde en bombas recíprocas y centrífugas y en poleas, todo lo cual fue utilizado en las perforaciones o en la industria local de ácido bórico. Entre 1850 y 1875 la planta de Larderello mantuvo en Europa el monopolio de la producción de ácido bórico. Entre 1910 y 1940 el vapor de baja presión fue utilizado para calefaccionar invernaderos, edificios industriales y residenciales.

En 1904 se llevó a cabo el primer intento de generar electricidad a partir de vapor geotérmico en Larderello, mediante una máquina inventada por el Príncipe Piero Ginori Conti (Figura 4-6), este experimento dio lugar a que en 1913 fuera puesta en operación la primera unidad comercial la cual produjo 250 KW.

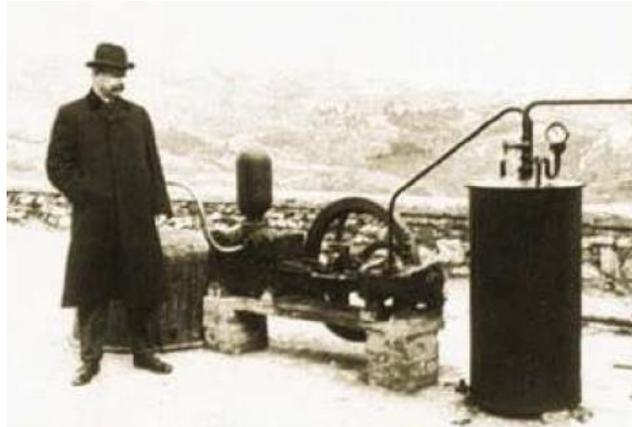


Figura 4-6 Máquina usada en Larderello en 1904

Fuente: Dickson y Fanelli, 2003.

El éxito de la primera unidad comercial mencionada anteriormente fue una clara demostración del valor industrial de la energía geotérmica y marcó el comienzo de una forma de explotación que se ha desarrollado significativamente desde entonces. La generación de electricidad en Larderello fue un suceso comercial, en donde la capacidad geotermoelectrica instalada (la capacidad obtenida al utilizar vapor natural producido en la tierra para alimentar las turbinas que mueven a los generadores eléctricos), alcanzaba los 127, 650 KW por lo que pronto, varios países siguieron el ejemplo de Italia, desarrollando sus recursos geotérmicos a escala industrial.

En 1892 entró en operaciones el primer sistema distrital de calefacción geotermal, en Boise, Idaho (USA). En 1928 Islandia, otro país pionero en la utilización de la energía geotérmica, también inicio la explotación de sus fluidos geotermales (principalmente agua caliente) para calefacción doméstica.

En 1919 los primeros pozos geotermales de Japón fueron perforados en Beppu, seguidos en 1921 por pozos perforados en la zona del Tatio ubicada en los montes andinos del norte de Chile. En 1958 entra en operación una pequeña planta geotermoeléctrica en Nueva Zelandia en el reservorio de Wairakei, en 1959 se inicia la exploración en la zona de Pathe en México y en 1960 comienza a operar otra planta en la zona de los Geyser en California, USA.

A partir de la década de los 60 se inicia, en diversas partes del mundo, una intensa actividad de investigación y exploración de los recursos geotérmicos, con el objeto de utilizarlos ya sea como energía calórica o bien para la generación de electricidad, en El Salvador la exploración geotérmica inicia en el año 1972 en el departamento de Ahuachapán y la explotación del recurso en 1975, en el resto de países Centroamericanos la utilización de los recursos geotérmicos se da en Nicaragua (1985), Costa Rica (1995) y Guatemala (2000) (IGME, 2015).

4.2 Generación de energía geotérmica en El Salvador

El desarrollo geotérmico en El Salvador se inició en el año de 1972 con la construcción de la Central Geotérmica en los Ausoles de Ahuachapán, en la zona occidental del país. Las operaciones de producción se comenzaron en 1975. Debido a los acontecimientos sociales (guerra civil armada) ocurridos en la década de 1980 esta central geotérmica suministró el 41% del consumo eléctrico nacional generando impactos negativos en el recurso disponible por sobreexplotación. Entre 1983 y 1984 se establece e implanta un programa que permitió un equilibrio entre la extracción-generación para mantener las características apropiadas del recurso geotérmico (físicas, químicas y termodinámicas) (Galicía y Sánchez, 2013).

La exploración geotérmica en otras zonas de El Salvador fue producto del desarrollo geotérmico que se tuvo en la primera central construida, entre 1976 y 1981 se desarrolló un proyecto geotérmico en la zona centro-oriental, con los resultados de este proyecto se elaboró el proyecto “Bocapozo Berlín I”, el cual permitió la inauguración en 1992 de una pequeña central comercial conocida como “Central El Tronador” en Berlín, Usulután la cual marca el inicio de una nueva planta de generación eléctrica en El Salvador (Galicía y Sánchez, 2013).

En la actualidad El Salvador se encuentra en un proceso de nuevos desarrollos geotérmicos tales como Chinameca y San Vicente, que se encuentran en la fase de exploración y evaluación del recurso para su potencial desarrollo en ambos campos (CNE, 2015). En la figura 4-7 se puede observar la ubicación y estimación de los recursos geotérmicos en El Salvador.

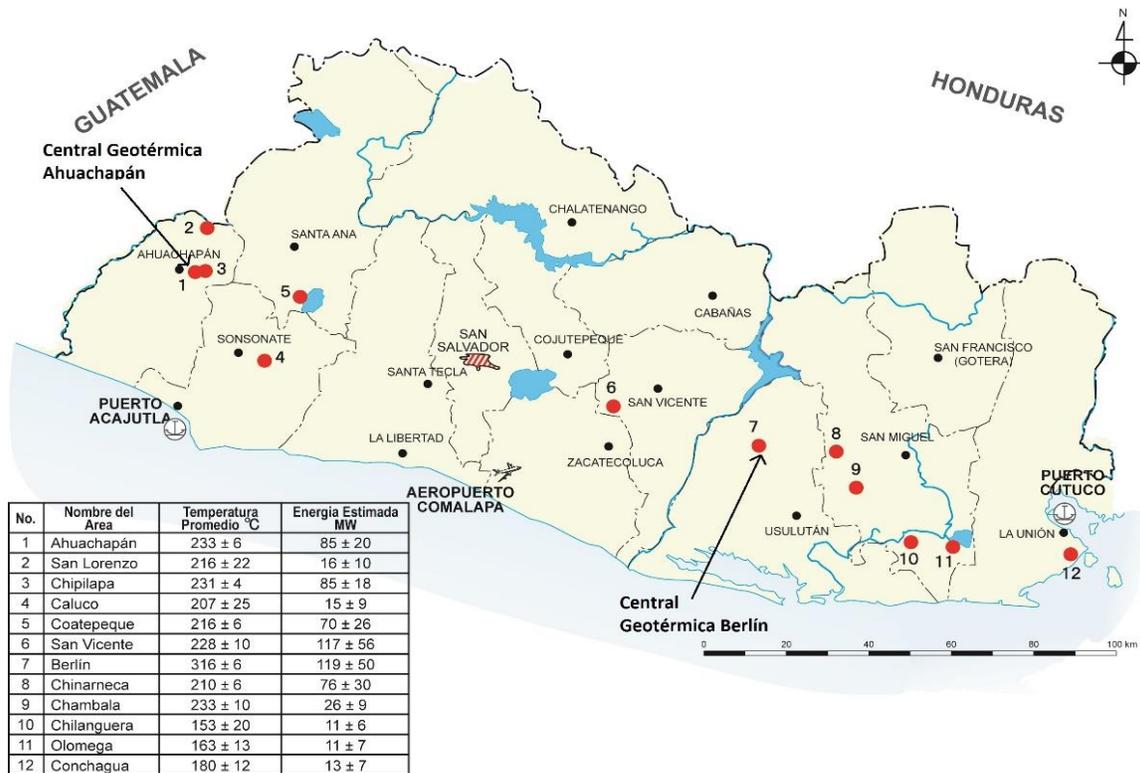


Figura 4-7 Ubicación de los recursos geotérmicos de alta entalpía en El Salvador

Fuente: CNE, 2015.

4.3 Generación de energía eléctrica a partir de geotermia en el Salvador

Todo proyecto de generación de energía eléctrica con base a geotermia se ejecuta generalmente en cinco fases: Reconocimiento, prefactibilidad, factibilidad, desarrollo y explotación sostenible del recurso. Dependiendo de las características del recurso geotérmico, la generación de electricidad se realiza principalmente mediante turbinas de vapor convencionales y plantas de ciclo binario (Galicia y Sánchez, 2013).

La energía eléctrica generada a partir de la geotermia, representa una fracción importante de la producción eléctrica total nacional, teniendo una capacidad instalada (para el año 2014) de 204.4 MW. En El Salvador el desarrollo geotérmico se obtiene por medio de LaGeo que hasta el momento es la única institución establecida.

Galicia y Sánchez (2013), mencionan que el aprovechamiento de la energía geotérmica está constituido por tres procesos principales, estos son: la extracción del fluido geotérmico del reservorio, la separación y transporte de fluidos en superficie y la

conversión de la energía geotérmica a energía eléctrica. El diagrama de generación de energía eléctrica a partir de geotermia puede observarse en la figura 4-8.

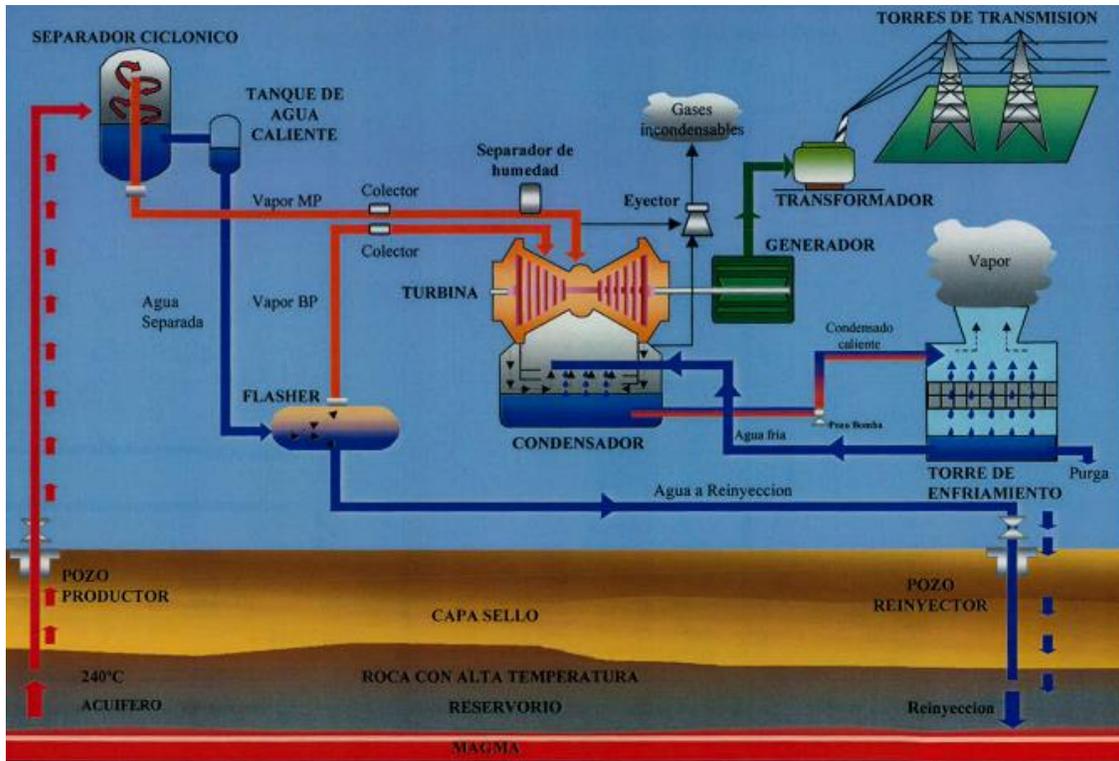


Figura 4-8 Diagrama de esquema de generación de una planta geotérmica.

Fuente: LaGeo, 2000b.

La infraestructura necesaria para el manejo en superficie del fluido geotérmico dentro del campo está constituida por plataformas, separadores ciclónicos, silenciadores atmosféricos y el sistema de acarreo de fluidos (tuberías) tanto para agua como para vapor, asimismo los equipos ubicados dentro de la planta como evaporadores, colectores, separadores de humedad y la red de tuberías. La descripción de los equipos utilizados puede observarse en la tabla 4-2:

Tabla 4-2 Descripción de los equipos utilizados en el proceso de generación

Equipo	Descripción
Separador ciclónico	Está compuesto de un cilindro vertical de acero al carbón cerrado con una capacidad de manejo de fluidos de 97.2 m ³ , en el interior tiene un tubo central con un diámetro entre 51-66 cm. El funcionamiento consiste en separar el vapor de la mezcla líquido-vapor que entra al equipo por efecto centrífugo, el vapor asciende e ingresa al tubo central por la parte superior saliendo hacia la línea de vapor. El agua desciende y se aloja en la parte inferior del separador saliendo hacia un tanque conectado a la línea de acarreo de agua separada.
Silenciador atmosférico	Es un equipo auxiliar utilizado durante la ejecución de programas de monitoreo de la producción de un pozo o de limpieza de los mismos para lo cual hay necesidad de abrir el pozo y descargar el fluido hacia la atmósfera reduciendo el ruido de la descarga geotérmica a la vez sirve para separar una porción de vapor (aproximada 10-20%) de la fase líquida que ingresa al equipo. Está compuesto por dos cilindros metálicos o de concreto unidos y abiertos en su parte superior.
Tuberías de conducción de agua separada	La fase líquida separada es transportada hacia el evaporador por medio de tuberías de metal de acero al carbono diseñadas para soportar elevadas condiciones de presión y temperatura. La longitud de estas tuberías oscila entre 500 y 3000 m dependiendo de la distancia entre el pozo y la planta. En la línea de acarreo de agua se han instalado drenajes (3-6) que son accesorios utilizados para evacuar el aire y agua fría residual.
Evaporador Flasher	El funcionamiento consiste en aprovechar las características del agua separada y provocar el flasheo o evaporación por la diferencia de presión del agua a la entrada del equipo y la presión de trabajo del mismo. El agua resultante se deriva directamente a la línea de reinyección, los flasher están constituidos por cilindros metálicos de 145.2 m ³ , están colocados en posición horizontal e insulados con cubiertas de fibra de vidrio con cemento refractario y lámina de aluminio

Continúa...

Tabla 4-2 Descripción de los equipos utilizados en el proceso de generación

Equipo	Descripción
Tubería de conducción de vapor	El vapor obtenido en el separador ciclónico es transportado hasta los colectores por medio de tuberías de acero de carbono de 15-28". Las longitudes de estas tuberías son similares a la del agua separada. Aunque las tuberías están revestidas con aislamiento térmico es posible que ocurra un enfriamiento que produce condensado que debe ser drenado porque puede dañar las turbinas, para evacuar este condensado se instalan trampas en la línea de vapor
Colectores de vapor	Están diseñados para recolectar el vapor proveniente de las líneas de acarreo de cada pozo. Se encuentran instalados dos colectores de vapor en el campo de Berlín y tres colectores de vapor en el campo de Ahuachapán. Para ambos campos se han instalado trampas de vapor que están constituidos por cilindros horizontales cerrados cuya función es recibir vapor denominado de media y baja presión, removiendo un condensado que es transportado y bombeado a las torres de enfriamiento.
Separador de humedad	De los colectores el fluido se conduce por una tubería de acero al carbono de 28-36" a los separadores de humedad. La función de este equipo es separar la humedad que aún se encuentra presente en el vapor para que a la turbina entre vapor seco. El diseño de los separadores de humedad está conformado por cilindros horizontales cerrados.
Reinyección en caliente	El agua residual proveniente de los separadores ciclónicos es conducida por tuberías térmicas aisladas hacia los pozos en donde es reinyectada a temperaturas entre 140-150 °C.
Reinyección en frío	La operación consiste en que una parte del agua residual a la salida de los separadores ciclónicos es derivada hacia los silenciadores y luego a través de tuberías y canaletas internas de concreto armado, que llegan hacia estanques.
Unidad generadora	Está constituida por las turbinas y los generadores, la turbina es una maquina térmica sobre la cual actúa el vapor geotérmico para disponer de energía mecánica. El generador es el equipo donde la energía mecánica producida en la turbina es aprovechada dentro de un campo magnético y transformado en energía eléctrica, la capacidad nominal del generador es de 35-40 KVA a un factor de potencia de 0.85-0.9 dependiendo si la turbina es de simple o doble flasheo.

Tabla 4-2 Descripción de los equipos utilizados en el proceso de generación

Equipo	Descripción
Condensador	<p>El vapor que sale de la turbina es derivado en un solo paso hacia el condensador, en donde se rocía agua líquida proveniente de una torre de enfriamiento y hay un cambio de fase de vapor a líquido.</p> <p>En el condensador se encuentra un sistema de extracción de gases del tipo “eyector” que posee un sistema de enfriamiento que enfría 0.2% en peso de los gases no condensables que entran junto con el vapor geotérmico.</p>
Torre de enfriamiento	<p>Las aguas provenientes de las bombas se conducen hacia la torre de enfriamiento por medio de una tubería metálica, en la torre el agua cae desde una altura de aproximadamente 15 m hacia un sistema de cascada y es enfriada con ventiladores. El agua es enfriada hasta 20-30°C y es enviada por gravedad de nuevo al condensador.</p>

Fuente: Adaptado de LaGeo (2000a) y LaGeo (2000b)

4.4 Proceso de producción de energía geotérmica en la Planta de Ahuachapán.

El campo y planta geotérmica de Ahuachapán (Figura 4-9), opera desde 1975 y está ubicada en el cantón Santa Rosa Acacalco del municipio de Ahuachapán. Posee tres unidades de generación de energía eléctrica, con una capacidad instalada total de 95 MW y una producción bruta de 83 MW. El área del campo geotérmico en la que se encuentran los pozos productores es de aproximadamente 2.5 Km², la profundidad de los pozos varía entre 600 y 2,750 metros. En la actualidad, la central geotérmica de Ahuachapán cuenta con 57 pozos perforados entre productores, reinyectores y de monitoreo (LaGeo, 2015).



Figura 4-9 Vista de la planta geotérmica de Ahuachapán.

Fuente: LaGeo, 2015.

4.4.1 Ciclo de generación.

El proceso consiste en la extracción desde el reservorio de una mezcla líquido-vapor que para el campo geotérmico de Ahuachapán, se ha estimado que se extrae desde el reservorio profundo a una presión de 20 Kg/cm^2 y a una temperatura promedio de 225°C , una mezcla bifásica de 423 Kg/s . Dado que la mayor parte del fluido es agua este campo geotérmico es considerado líquido dominante (LaGeo, 2000a).

Las plataformas es el área física donde se realiza la perforación de pozos geotérmicos, en el campo de Ahuachapán hay aproximadamente 40 plataformas en un área de 4 Km^2 que constituye el campo, las dimensiones son 0.54 hectáreas por plataforma ($60 \times 90 \text{ m}$). Al contorno de las plataformas también se construye un sistema de canalización de aguas lluvias para proteger el suelo de la misma, a un costado de la plataforma se construyen estanques con volúmenes de 800 a 2000 m^3 . También dentro de cada plataforma se instalan los equipos de separador ciclónico, silenciador atmosférico y un sistema de tuberías de acarreo de fluidos geotérmicos (LaGeo, 2000a).

La energía producida de esta planta es producto de la operación de dos unidades a condensación de una entrada de presión (single flash) de 30 MW cada una y de una tercera unidad de doble presión (doble flasheo) con una capacidad de 35 MW. (Bonilla, Meléndez, Reyes y Rivera, 2013).

Bonilla, Et al., 2013, mencionan que para una carga completa se requiere 144 Kg/s de vapor saturado a una presión de entrada de 4.6 bar-g que proviene de dos tanques a presión que son los colectores del vapor producido por una serie de pozos productores.

4.4.2 Tipo de terreno involucrado en el proceso de generación.

El campo geotérmico está ubicado en la microcuenca río los ausoles, el relieve del terreno se puede considerar casi $\frac{3}{4}$ partes es montañosa y el resto es valle. Los suelos de la microcuenca son utilizados en su mayor para el cultivo de café y una pequeña porción para maíz y otros cultivos estacionarios. En la parte alta de la microcuenca se ubican una serie de manantiales de agua fría que son captados para el abastecimiento de la población y los beneficios de café, además existen zonas de alteración hidrotermal (fumarolas y suelos alterados) y manantiales de agua caliente. La presencia de este tipo de manifestaciones geotérmicas tiene incidencia en la calidad del agua superficial del río los ausoles (LaGeo, 2000a).

Según la figura 4-10, el tipo de suelo en el campo geotérmico puede clasificarse como Andisoles y Latosoles arcillo rojizos. El Ministerio de Agricultura y Ganadería de El Salvador (MAG), 2012 define Antisoles como aquellos suelos originados de cenizas volcánicas, de distintas épocas y en distintas partes del país, tienen por lo general un horizonte superficial entre 20 y 40 centímetros de espesor, de color oscuro, textura franca y estructura granular. Su capacidad de producción es de alta a muy alta productividad, según la topografía son aptos para una agricultura intensiva mecanizada para toda clase de cultivos.

De la misma manera definen a los suelos tipo Latosoles arcillo – rojizos como aquellos suelos arcillosos de color rojizo en lomas y montañas. Son bien desarrollados con estructura en forma de bloques con un color generalmente rojo aunque algunas veces

se encuentran amarillentos o cafés. Esta coloración se debe principalmente a la presencia de minerales de hierro de distintos tipos y grados de oxidación. La textura superficial es franco arcillosa y el subsuelo arcilloso. La fertilidad puede ser alta en terrenos protegidos pudiéndose utilizar maquinaria agrícola cuando la pendiente es moderada. Son suelos aptos para casi todos los cultivos



Figura 4-10 Mapa Pedológico, Tipos de suelo para el departamento de Ahuachapán, El Salvador.

Fuente: MAG, 2012

4.5 Proceso de producción de energía geotérmica en la planta de Berlín.

El campo y planta geotérmica de Berlín (Figura 4-11) opera desde 1992 y se ubica en el cantón El Zapotillo, en el municipio de Alegría, Usulután. Cuenta con tres unidades de generación de energía eléctrica y una planta de Ciclo Binario que tienen una capacidad máxima instalada de 109.4 MW. La producción neta total de la planta es de 102 MW (LaGeo, 2015).

El área del campo geotérmico cuenta con una extensión aproximada de 8 Km², la profundidad de los pozos varía entre 500 y 3,455 metros. En la actualidad, cuenta con 39 pozos entre productores, reinyectores y de monitoreo (LaGeo, 2015).



Figura 4-11 Planta geotérmica de Berlín

Fuente: LaGeo, 2015

4.5.1 Ciclo de generación.

El proceso consiste de extracción desde el reservorio de una mezcla líquido-vapor y gases no condensables que para el campo geotérmico de Berlín, se ha estimado se extrae desde el reservorio profundo a una presión de 120 Kg/cm^2 y a una temperatura de 280°C , una mezcla bifásica de 380 Kg/s . Esta emerge en superficie a condiciones de $130\text{-}180^\circ\text{C}$ de temperatura y $10\text{-}12 \text{ Kg/cm}^2$ de presión (LaGeo, 2000b).

Las plataformas para el campo de Berlín son aproximadamente 12 en un área de 4 Km^2 que constituye el campo, las dimensiones son 0.4 hectáreas por plataforma ($60 \times 90 \text{ m}^2$). (LaGeo, 2000b).

Bonilla, Et al., 2013, mencionan que esta planta tiene dos unidades a condensación de 28.1 MW cada una, ambas de una sola entrada de presión (single flash) que proviene de dos colectores de vapor. La tercera unidad a condensación tiene una capacidad de 44 MW y la unidad de Ciclo Binario (Figura 4-12) tiene una capacidad de 9.2 MW operando con agua geotérmica y en el circuito de potencia con Isopentano.

Ciclo Binario:

Las plantas de ciclo binario son sistemas conformados básicamente por dos loops o lazos, en donde se intercambia energía calorífica entre los fluidos de trabajo. El primero de los loops es el del fluido geotérmico, este generalmente es denominado de mediana entalpía, ya que no sobrepasa los 180 °C y puede ser extraído desde el reservorio, o puede ser aprovechado del residuo que queda de un sistema de alta entalpía (fluido a la salida de la turbina). El segundo es un loop cerrado y pertenece al fluido de trabajo (Bonilla, Et al., 2013).



Figura 4-12 Planta de ciclo binario Berlín

Fuente: LaGeo,2015

Bonilla, et al., (2013) establecen que hay dos tipos de ciclos utilizados para las plantas binarias, el primero es el ciclo Kalina el cual usa como fluido de trabajo amoníaco, mientras que el segundo es el ciclo de Rankine Orgánicos (ORC) utiliza fluidos de trabajo orgánicos como el Isopentano o el n-pentano cuyo punto de ebullición es mucho menor que el del agua y permiten el aprovechamiento de temperaturas moderadas para la generación eléctrica debido a sus propiedades termodinámicas. El ORC es el ciclo utilizado en la planta de Berlín.

El ORC presenta las siguientes ventajas respecto a los otros ciclos convencionales:

- Pendiente positiva de la línea de vapor saturado en el diagrama T-S

- Entalpía de vaporización reducida
- Temperatura y presión crítica bajas
- Presión de condensación superior a la atmosférica

El funcionamiento del ciclo binario como puede verse en la figura 4-13, consiste en utilizar el agua o fluido geotérmico líquido haciéndola pasar por un intercambiador de calor y posteriormente enviarla a un pozo de reinyección. La energía térmica extraída del líquido es transferida a un segundo fluido orgánico de trabajo (isopentano), el cual se transforma en vapor que llega a impulsar una turbina que está acoplada a un generador de energía eléctrica; luego el fluido es condensado y después bombeado hacia el intercambiador de calor nuevamente.

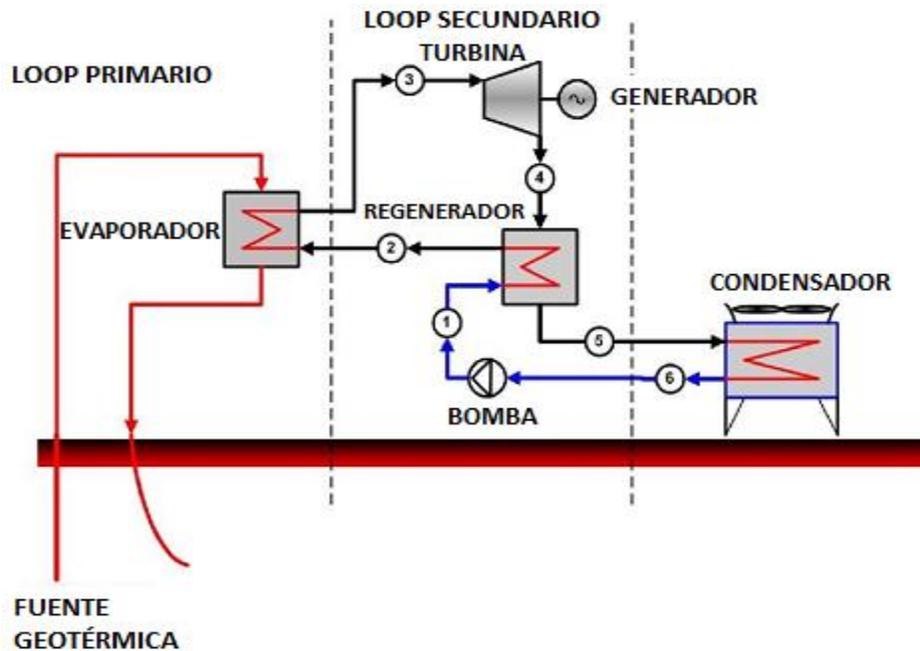


Figura 4-13 Esquema de funcionamiento del ciclo binario en Berlín.

Fuente: Adaptado de Bonilla, et al.,2013.

4.5.2 Tipo de terreno involucrado en el proceso de generación.

En LaGeo, (2000b) se describe la distribución de las plataformas y el tipo de terreno involucrado: En la zona alta del campo geotérmico la cobertura predominante de esta zona es cafetal con árboles de sombra, bosque plantado de cacao, árboles forestales nativos de la zona así como árboles frutales.

En la zona intermedia solamente hay cafetales en el área del TR-14 en las demás plataformas el área encontrada es para cultivos anuales como maíz, frijol, maicillo, árboles nativos de la zona y árboles frutales. En la zona se identificaron 36 especies de árboles nativos.

Según el MAG (2012) el tipo de suelo del campo geotérmico de Berlín puede clasificarse como Andisoles, Latosoles arcillo-rojizos y en ciertas zonas Litosoles, definiendo a este último tipo de suelo como suelos de muy poca profundidad sobre roca pura y muy complejos. La mayoría de este tipo de suelo son suelos cuyos horizontes superficiales han sido truncados a causa de una severa erosión laminar o sea que la erosión ocurre en láminas y no en forma de cárcavas, son suelos arcillosos como los latosoles pero muy superficiales. Las texturas varían de gruesa, arenas y gravas hasta muy pedregosos sobre la roca dura. El uso potencial es muy pobre de bajo rendimiento. Previamente se definió la clasificación Andisoles y Latosoles arcillo-rojizos.

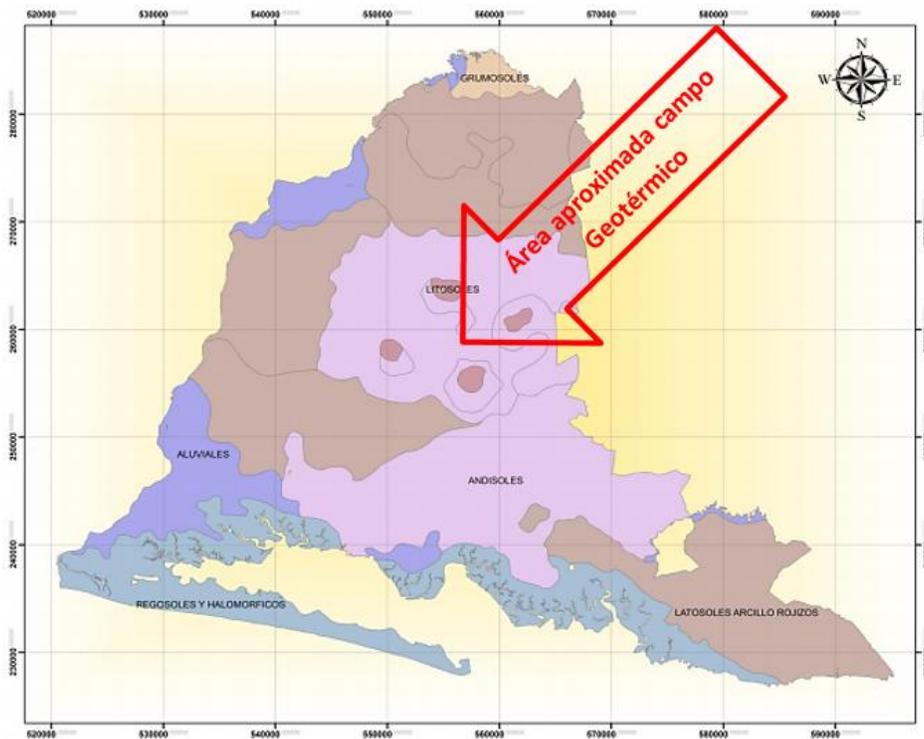


Figura 4-14 Mapa Pedológico, Tipos de suelo para el departamento de Usulután, El Salvador.

Fuente: MAG, 2012

CAPITULO 5 DESARROLLO DE LA PROPUESTA METODOLÓGICA

5.1 Fundamentos de la metodología para el cálculo de factores de productividad para geotermia.

En este capítulo se desarrolla la propuesta de una metodología para el cálculo de factores de productividad energética en geotermia dentro de los lineamientos que dicta la huella ecológica, se diseñó el proceso de cálculo de los factores de productividad y se calcularon factores de productividad energética para producción de electricidad a partir de geotermia en El Salvador.

A lo largo del desarrollo de la propuesta se definen conceptos básicos y metodológicos para la búsqueda de información en función de los objetivos, alcances y precisión del valor que se desee calcular dados los objetivos de cada persona o grupo interesado en calcular un factor o factores de productividad energética para geotermia, pues como se describió en el desarrollo de los capítulos anteriores, los factores de productividad energética para energías de origen no fósil son dependientes de valores de generación y superficie construida que varían sobre la dimensión temporal .

La metodología propuesta se fundamenta en los lineamientos que estipula el indicador “Huella Ecológica (HE)”, el cual relaciona la demanda de terreno bioproductivo necesario para producir bienes y servicios y absorber los desechos generados por una población con un nivel de vida determinado.

Como se definió en la sección 2.4, por territorio bioproductivo se entiende la cantidad de superficie biológicamente útil que permite producir bienes y servicios y/o absorber desechos generados. Esta se encuentra constituida según la metodología de HE por: construida o urbanizada, de absorción de CO₂, cultivo, pastoreo, bosques y mar productivo como se muestra en la figura 5-1.

Sobre la base anterior es necesario conocer la superficie territorial a partir de la cual se genera electricidad conocida como “Campo Geotérmico” de esta forma se conoce la totalidad y tipo de tierras impactadas, es decir el cambio en el uso de la tierra. Al conocer los tipos de terreno bioproductivo que cambian su uso en el campo geotérmico como producto de la generación de electricidad, se plantea un inventario de cantidad de

superficie usada clasificada por el carácter bioproductivo que presenta para asociar el factor de productividad energética a un tipo de terreno bioproductivo.

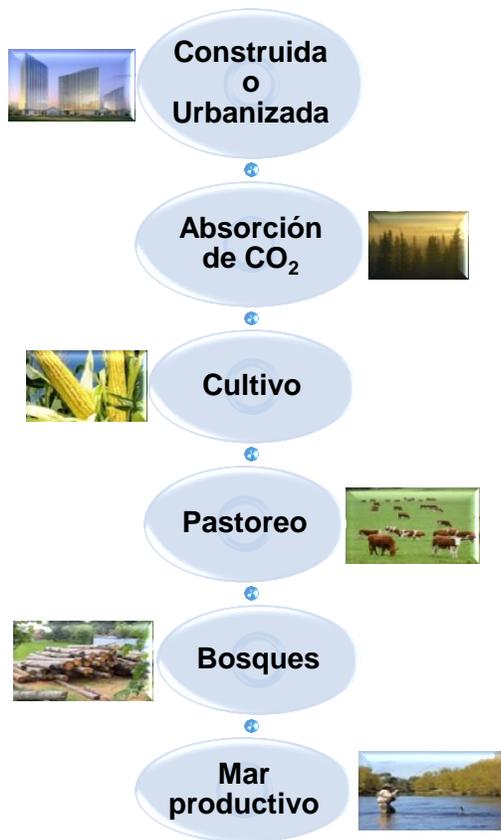


Figura 5-1 Superficies bioproductivas consideradas de la HE

Fuente: Elaboración Propia.

Al referirse a generación de electricidad se debe entender que esta se encuentra sujeta al tipo de tecnología usada en el proceso de generación, la cual fue descrita en el capítulo 4 y en términos generales se describe a través de la siguiente figura:

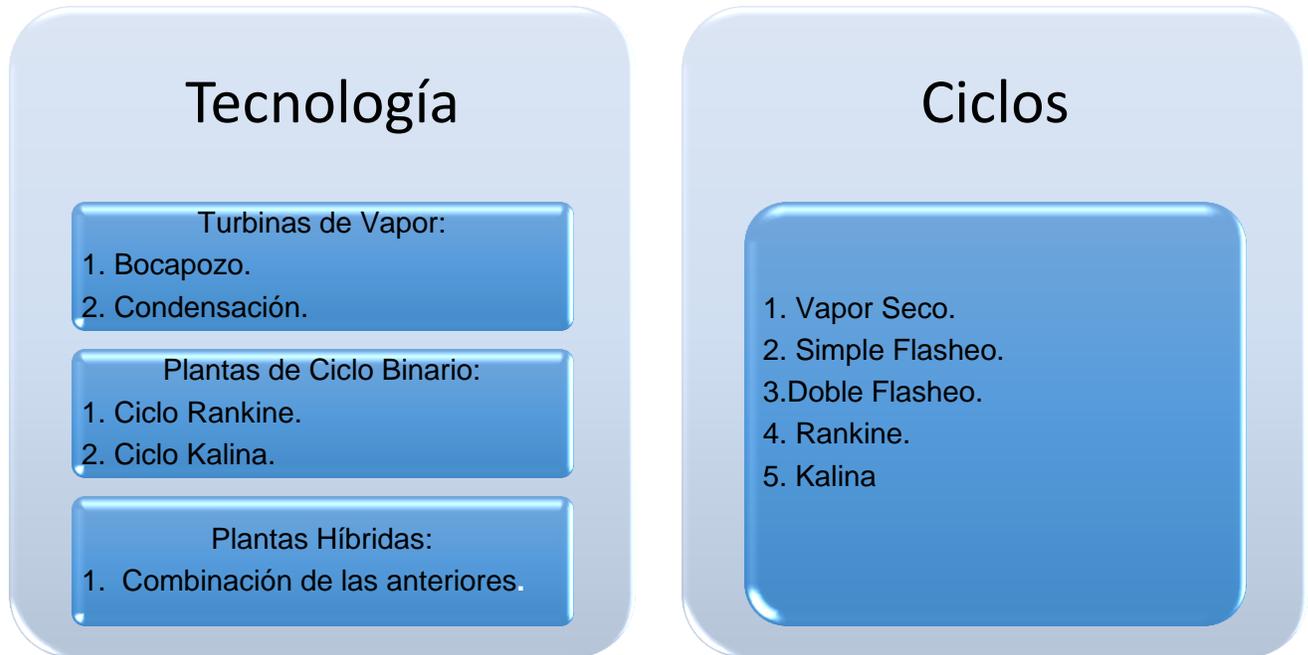


Figura 5-2 Tecnología y ciclos de generación en geotermia.

Fuente: Elaboración Propia.

El valor numérico de la generación de electricidad a partir de geotermia se encuentra sujeto al tipo de tecnología utilizada para producción de energía, el cual, es diferente para cada país y cada planta geotérmica.

A su vez la producción de energía se encuentra sujeta a la generación bruta y generación neta, se hace hincapié en ello, ya que, al consultar sobre la cantidad de energía producida en el tiempo a una empresa generadora, a un inventario de datos elaborado por entidades gubernamentales, no gubernamentales, y otras instituciones autorizadas, es importante verificar si los datos obtenidos son de producción bruta, producción neta, u otra relacionada, ya que, las centrales geotérmicas utilizan un porcentaje de electricidad bruta para colocar en marcha algunos equipos –conocido como consumo interno de planta-, al nuevo valor que surge como resultado de la resta entre la producción bruta y la energía consumida en la central se le conoce como producción neta.

Para realizar el cálculo de factores de productividad energética para la generación de electricidad en geotermia se debe utilizar valores numéricos referidos a generación bruta, esta a su vez difiere de la capacidad instalada de la central geotérmica –producción teórica máxima que se podría producir-, pues, la producción bruta se encuentra sujeta a los factores de planta, estos representan la relación entre producción real y capacidad

instalada. La capacidad instalada y la producción real difieren debido a múltiples factores, en geotermia se encuentran principalmente a: variación en los caudales de alimentación de vapor a las turbinas, reparación de equipos, mantenimiento de equipos, otros.

Amaya (2009) hace referencia a tres indicadores que en geotermia son necesarios para describir el rendimiento técnico de una planta, a continuación se mencionan los siguientes:

$$\text{Factor de Capacidad (\%)} = \frac{\text{Total generado (MWh) en el periodo}}{\text{Capacidad Instalada (MWe) x Periodo (h)}} \times 100 \quad (\text{Ecuación 4})$$

$$\text{Factor de Carga (\%)} = \frac{\text{Total generado (MWh) en el periodo}}{\text{Carga Máxima (MWe) x Periodo (h)}} \times 100 \quad (\text{Ecuación 5})$$

$$\text{Factor de Disponibilidad (\%)} = \frac{\text{Total de horas en funcionamiento de la planta durante el periodo}}{\text{Longitud total del periodo (h)}} \times 100 \quad (\text{Ecuación 6})$$

Finalmente se debe tomar en cuenta el hecho que las variables que definen un factor de productividad energética en geotermia –superficie bioproductiva y generación de electricidad- son cambiantes con el tiempo, algunas razones de estas variaciones se muestran en la figura 5-3:

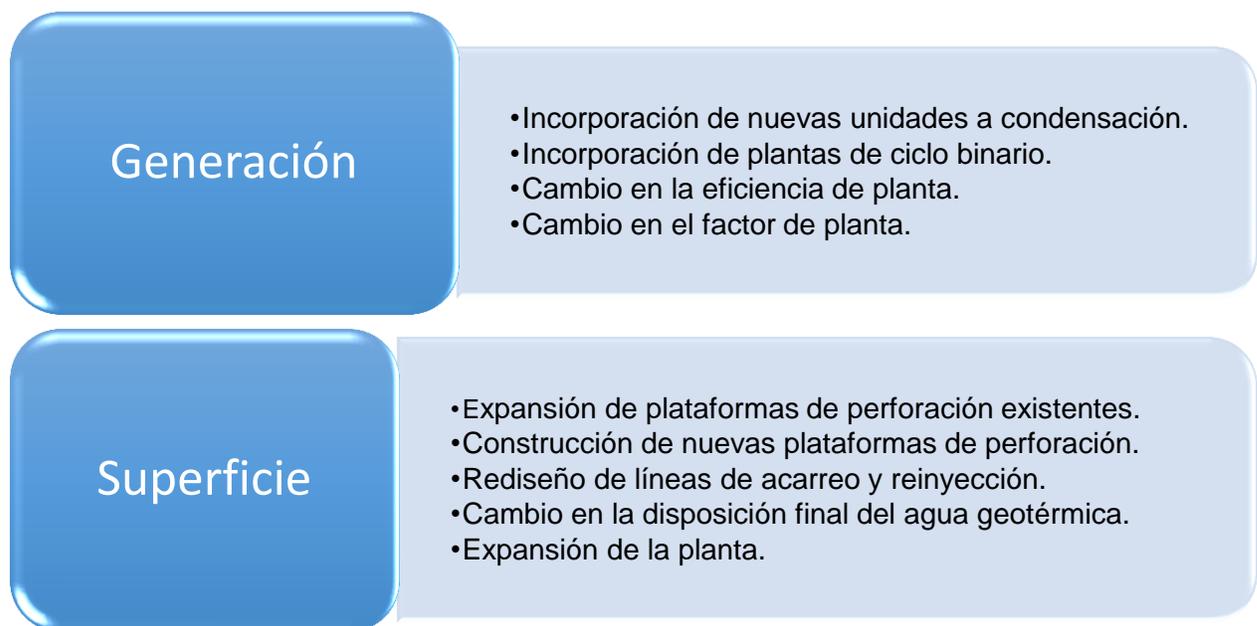


Figura 5-3 Motivos que pueden modificar las variables de un factor de productividad energética en geotermia.

Fuente: Elaboración propia.

La metodología propuesta se plantea como instrumento para realizar el cálculo de factores de productividad energética en apoyo a evaluar la huella energética de la energía geotérmica en el marco de la evaluación del indicador de sostenibilidad ambiental conocido como huella ecológica, dicha metodología es afín a las metodologías empleadas para el cálculo de factores de productividad energética para huellas ecológica específicamente para energías de origen no fósil como factores de productividad para la energía hidráulica, energía solar fotovoltaica, energía eólica, y otras que toman como base el valor numérico de la producción de electricidad en una central generadora relacionado a la superficie bioproductiva implicada en el proceso de generación. A manera de ilustración de las aseveraciones anteriores se muestran las figuras 5-4 y 5-5 que muestran la relación existente entre metodologías para cálculo de factores de productividad energética para energías de origen no fósil y cuya información se muestra desarrollada en los capítulos 2 y 3.

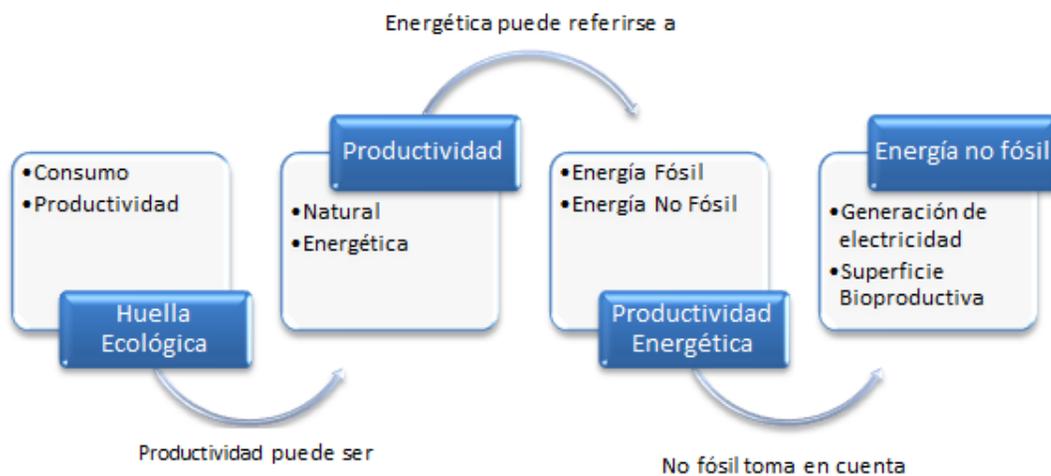


Figura 5-4 Diagrama de relación entre huella ecológica y factores de productividad energética.

Fuente: Elaboración Propia.

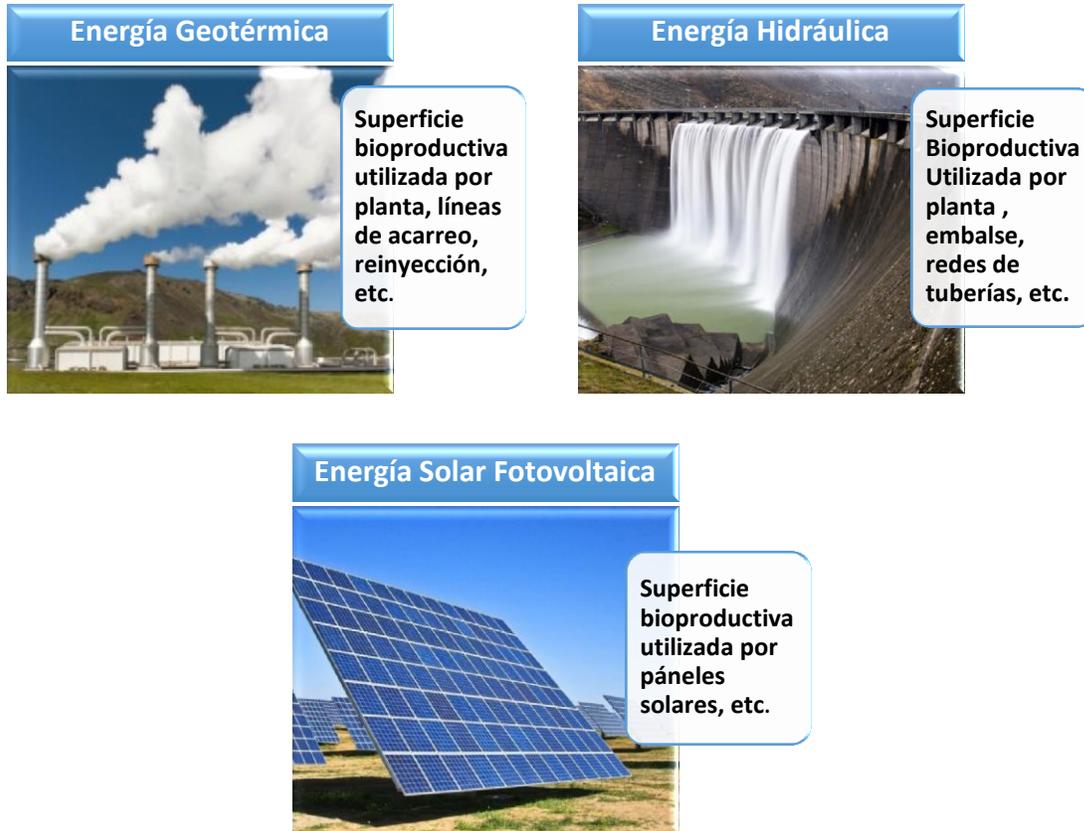


Figura 5-5 Superficie bioproductiva relacionada al cálculo de factores de productividad energética para diferentes tipos de energías.

Fuente: Elaboración Propia.

Para iniciar el procedimiento operativo que lleva al cálculo de factores de productividad energética, se sugiere elaborar un diseño de investigación teórica que se detalla a continuación:

Elaborar el diseño de la investigación teórica: Para elaborar el diseño de la investigación teórica se debe tomar en cuenta la consulta en fuentes de tipo primaria y secundaria, con la concepción de una idea madura que proporcione una visión clara de la estrategia a seguir para hacer efectivo el cálculo de los factores de productividad energética, por cuanto se recomienda elaborar un documento el cual puede tener como base los siguientes puntos:

- Antecedentes sobre cálculo de factores de productividad energética para producción de electricidad en geotermia: Como guía y base para elaborar futuras comparaciones.

- Precisión de cálculo: referido al alcance en términos de aproximaciones a ser tomadas en cuenta para el cálculo de factores de productividad energética en geotermia.
- Marco Conceptual: este debe incluir términos técnicos utilizados en geotermia tales como campo geotérmico, plataformas de perforación, generación de electricidad a partir de geotermia, etc.

En las siguientes páginas se muestra la descripción y desarrollo de los pasos operativos para realizar el cálculo de factores de productividad energética en geotermia.

5.2 Metodología de cálculo de factores de productividad energética para geotermia.

1. *Identificar y ubicar geográficamente el lugar donde se genera electricidad a partir de geotermia:* En primer lugar se debe seleccionar la central geotérmica para la que se realizará el cálculo de factores de productividad energética, es necesario documentar la localidad a la que pertenece dentro de la división política del lugar.
2. *Estudiar la geografía del campo geotérmico:* Es importante conocer la geografía del campo geotérmico pues permite tener un primer acercamiento con la cantidad y tipo de terreno bioproductivo usado para la generación de electricidad, para ello se sugiere utilizar las siguientes estrategias:
 - Utilizar sistemas de información geográfica.
 - Identificar zonas de alteración hidrotermal.
 - Documentar fotografías del campo geotérmico.
 - Consultar mapas.
3. *Identificar superficies bioproductivas que contribuyen al proceso de generación de electricidad a partir de geotermia:* este paso permite concebir un primer acercamiento para las categorías a tomar en cuenta en el posterior diseño del inventario de superficies bioproductivas utilizadas en el proceso de generación de electricidad a partir de geotermia, se sugieren las siguientes:
 - Plataformas.
 - Líneas de acarreo.

- Líneas de reinyección.
 - Planta generadora.
 - Otras que el investigador haya identificado con anterioridad que son tierras bioproductivas que intervienen en el proceso de generación.
4. *Identificar el número de plantas que generan electricidad a partir de geotermia que se encuentren dentro de la superficie de estudio:* en ocasiones, para un mismo campo geotérmico se tiene más de una planta en operación que contribuye al proceso de generación, estas deben ser identificadas.
5. *Identificar el/los tipo/s de planta/s que operan dentro de los límites de estudio.*
- Investigar el tipo de tecnología utilizada para la generación de electricidad a partir de geotermia, entre las cuales se encuentran:
 - Condensación.
 - Binaria.
 - Bocapozo.
 - Otras.
6. *Adecuar el formato de inventario:* el inventario está referido a una hoja de cálculo donde se documenta la información referida al cálculo de factores de productividad energética a partir de geotermia, este se encuentra referido a registrar datos numéricos de producción bruta de electricidad y superficie bioproductiva en una dimensión temporal. Se proporciona un formato de inventario de generación de electricidad y superficie bioproductiva en el Anexo 2.
- Producción bruta de electricidad.
 - Datos de generación.
 - Superficie.
 - Plataformas.
 - Líneas de acarreo.
 - Líneas de reinyección.
 - Superficie de la planta.
 - Disposición final de agua geotérmica.
 - Otras que el investigador haya identificado con anterioridad como tierras o terrenos bioproductivas que intervienen en el proceso de generación.

7. *Contabilizar datos de inventario:* Posterior a la elaboración del inventario que incluye datos de generación de electricidad y datos de superficie bioproductiva se procede a contabilizar los datos.
8. *Calcular los factores de productividad energética en una dimensión temporal que esté en congruencia con el registro temporal de los datos de generación y superficie (meses, años, décadas, etc.). Se sugiere la siguiente ecuación:*

$$\text{Factor de Productividad} = \frac{\text{Generación de Electricidad}}{\text{Superficie Bioproductiva}} \text{ (Ecuación 7)}$$

9. *Presentar los resultados:* Con el resultado de los valores numéricos del cálculo de factores productividad energética se debe especificar el tipo de tecnología usada, la superficie bioproductiva más impactada en el proceso de generación y otras que el investigador considere conveniente.

5.3 Aplicación de la metodología propuesta

5.3.1 Elaboración de inventario

Para elaborar el inventario de cada categoría, es decir, de producción eléctrica y superficie bioproductiva implicada en el proceso de generación eléctrica con geotermia, se rastreó información a través de fuentes bibliográficas desde el año 1975 hasta el 2014 para la primer categoría, por otra parte, debido a la disponibilidad de la información de la segunda categoría, el periodo de análisis fue desde el año 2000 hasta el 2014.

Los datos de producción de electricidad utilizados han sido publicados por la Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones conocida como SIGET y consultados también en los informes anuales emitidos por la Unidad de Transacciones S.A. de C.V. conocida como UT quien es una empresa administradora del mercado mayorista de energía eléctrica en El Salvador. Por otra parte para la estimación de cantidad de superficie bioproductiva se consultó documentos oficiales, entre ellos: artículos científicos, libros y otros documentos a los que se tuvo acceso de tal forma que ha sido posible realizar una reconstrucción cronológica de la evolución de la cantidad de superficie bioproductiva en el tiempo, además se utilizó como herramienta de cálculo de áreas específicamente de las plantas generadoras las herramientas informáticas “google earth”, y “cmap tools”. Las imágenes de satélite utilizadas para la estimación de áreas de

planta se presentan en el Anexo 4, para la estimación de Ahuachapán se usó una imagen tomada con fecha 21/07/2014 y para Berlín 06/04/2015 pues fueron las que el software otorgó al momento de realizar la estimación y las tablas resumen del inventario para cálculo de factores de productividad energética se muestran en el Anexo 3.

5.3.2 Elaboración de inventario para planta generadora de Ahuachapán.

- **Generación**

El inventario de generación correspondiente a la Central Ahuachapán se muestra en la tabla 5-1, se realizó usando datos publicados por la Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones (SIGET), adicionalmente se consultó en documentos que publica la Unidad de Transacciones (UT) que presenta desde el año 1998 un informe de carácter público con información referente a generación, comercialización y otros aspectos que son de relevancia en el mercado eléctrico nacional.

Tabla 5-1 Inventario de producción de energía eléctrica en planta geotérmica de Ahuachapán.

Años	Inventario de producción de energía eléctrica en planta geotérmica de Ahuachapán (GJ)		
	Generación		Consumo Interno
	Bruta	Neta	
1975	260390.16	241087.68	19302.48
1976	1007280	936222.48	71057.52
1977	1440183.6	1350452.52	89731.08
1978	1407690	1301921.64	105768.36
1979	1411858.8	1330301.88	81556.92
1980	1405807.2	1315080	90727.2
1981	2204215.2	2064390.12	139825.08
1982	1848214.8	1708404.12	139810.68
1983	1882771.2	1724343.48	158427.72
1984	1913911.2	1758348	155563.2
1985	1519164	1366719.12	152444.88
1986	1341900	1201327.2	140572.8
1987	1564257.6	1434557.16	129700.44
1988	1547863.2	1429594.56	118268.64
1989	1587121.2	1463632.92	123488.28
1990	1507330.8	1383360.84	123969.96
1991	1528335.36	1409863.68	118471.68

Continúa....

Tabla 5-1 Inventario de producción de energía eléctrica en planta geotérmica de Ahuachapán.

Años	Inventario de producción de energía eléctrica en planta geotérmica de Ahuachapán (GJ)		
	Generación		Consumo Interno
	Bruta	Neta	
1992	1323826.2	1210655.16	113171.04
1993	1303904.88	1199453.76	104451.12
1994	1334836.44	1214990.64	119845.8
1995	1390794.48	1275101.28	115693.2
1996	1332650.88	1223769.96	108880.92
1997	1513461.96	1397348.64	116113.32
1998	1414010.16	1297740.24	116269.92
1999	1561367.52	1447449.48	113918.04
2000	1368606.24	1267427.52	101178.72
2001	1885950	1758517.2	127432.8
2002	1856650.32	1739985.12	116665.2
2003	1944630	1815199.2	129430.8
2004	1989661.32	1850962.32	138699
2005	2154429	2006868.96	147560.04
2006	2433529.08	2266454.16	167074.92
2007	2359684.08	2188410.84	171273.24
2008	2583195.12	2406863.88	176331.24
2009	2586074.04	2395533.6	190540.44
2010	2498623.56	2339345.16	159278.4
2011	2509739.28	2324910.96	184828.32
2012	2502100.08	2301990.84	200109.24
2013	2427445.08	2226042.72	201402.36
2014	2447009.28	2241000	206009.28

Fuente: SIGET, 2014.

- **Superficie Bioproductiva**

El inventario de superficie bioproductiva correspondiente a Ahuachapán se muestra en la tabla 5-2, a continuación se explican las aproximaciones tomadas en cuenta para la estimación de esta y se tuvo en cuenta las siguientes superficies que forman parte del proceso de generación:

- Plataformas, líneas de acarreo, reinyección:
LaGeo (2000a) menciona que hasta el año 2000 se construyeron 40 plataformas de un área estándar de 0.54 hectáreas, no se encontró mayor información referente a plataformas en publicaciones de años posteriores.

LaGeo (2000a) menciona que hasta el año 2000 el área en que se encuentran los pozos productores, reinyectores, y líneas de acarreo y reinyección abarcaba 4 Km², Monterrosa y Zepeda (2009) apoyan los datos de superficie que proporciona LaGeo (2000a), adicionalmente Amaya (2009) apoya los datos que proporcionan los autores anteriores, además, agrega que la zona de producción la componen 2.5 Km² y la zona de reinyección 1.5 Km² ambos incluyen la superficie de tuberías. Por otra parte Jacobo (2003) menciona que al año 2003 el área de producción y reinyección se encuentra abarca una superficie aproximada de 5 Km², luego de ello no se encontró mayor información en bibliografía de años posteriores, por cuanto se usó la superficie de 5 Km² como área de tuberías y plataformas de los siguientes años hasta el 2014.

Monterrosa y Zepeda (2009) mencionan que el sistema de reinyección de Ahuachapán entró en operación desde el año 1999 aunque no se dispuso de la totalidad del volumen de agua residual hasta el año 2004, por cuanto, el área de reinyección y canaleta se toma en cuenta en el inventario desde el año 2000.

- Canaleta de aguas residuales:

La superficie de la canaleta de aguas residuales que se utilizó desde el año 1975 hasta el agosto del año 2004 (Amaya, 2009) no se modificó a lo largo del tiempo que se utilizó para evacuar los volúmenes de agua residual y según LaGeo (2000a) tuvo una longitud de 80 Km y se estimó su ancho en 1.5 m.

- Planta:

El área de la planta de Ahuachapán se estimó a partir de imágenes satelitales (se presentan en el Anexo 4) tomadas con la herramienta “google earth” con fecha cuatro de Junio del año 2015 y calculadas con el software “cmaps tools”, la premisa tomada para el área de la planta en el tiempo fue que dicha superficie no ha cambiado desde el año 2000 hasta el año 2014, debido a que no se tuvo acceso a datos numéricos que muestren el área de la planta en algún año comprendido en el periodo de estudio (2000-2014).

Tabla 5-2 Inventario de Superficie Bioproductiva de planta geotérmica de Ahuachapán.

Inventario de Superficie Bioproductiva para Ahuachapán (ha)								
Años	Número de Plataformas	Área por Plataforma	Área de Plataformas	Líneas de Acarreo	Líneas de Reinyección	Canaleta	Planta	Total
2000	40	0.54		400		12	13.782	425.78
2001	-	0.54		400		12	13.782	425.78
2002	-	0.54		400		12	13.782	425.78
2003	-	0.54		500		12	13.782	525.78
2004	-	0.54		500		12	13.782	525.78
2005	-	0.54		500		-	13.782	513.78
2006	-	0.54		500		-	13.782	513.78
2007	-	0.54		500		-	13.782	513.78
2008	-	0.54		500		-	13.782	513.78
2009	-	0.54		500		-	13.782	513.78
2010	-	0.54		500		-	13.782	513.78
2011	-	0.54		500		-	13.782	513.78
2012	-	0.54		500		-	13.782	513.78
2013	-	0.54		500		-	13.782	513.78
2014	-	0.54		500		-	13.782	513.78

Fuente: Elaboración Propia.

5.3.3 Elaboración de inventario para planta generadora de Berlín.

- **Generación**

La elaboración del inventario de generación se muestra en la tabla 5-3, se realizó usando datos publicados por la Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones (SIGET), adicionalmente se consultó en documentos que publica la Unidad de Transacciones (UT) que presenta desde el año 1998 un informe de carácter público con información referente a generación, comercialización y otros aspectos que son de relevancia en el mercado eléctrico nacional.

Tabla 5-3 Inventario de producción de energía eléctrica en planta geotérmica de Berlín.

Años	Inventario de producción de energía eléctrica en planta geotérmica de Berlín (GJ)		
	Generación		Consumo Interno
	Bruta	Neta	
1992	83283.12	82635.12	648
1993	62804.88	62390.52	414.36
1994	129243.24	128235.96	1007.28
1995	202857.12	201144.24	1712.88
1996	217392.48	215634.24	1758.24
1997	237017.88	235119.96	1897.92
1998	210262.68	208474.92	1787.76
1999	590181.12	560801.52	29379.6
2000	1461808.8	1392437.52	69371.28
2001	1593057.6	1506168	86889.6
2002	1718578.08	1630978.56	87599.52
2003	1749268.8	1663153.2	86115.6
2004	1650289.32	1562141.52	88147.8
2005	1627398.36	1539794.88	87603.48
2006	1672052.76	1584032.4	88020.36
2007	2614288.68	2466524.88	147763.8
2008	2885696.64	2708521.2	177175.44
2009	2900119.68	2719563.84	180555.84
2010	2991836.52	2799503.28	192333.24
2011	3014040.6	2822992.2	191048.4
2012	3025277.64	2811533.4	213744.24
2013	3187168.2	2966525.28	220642.92
2014	3160497.96	2956899.6	203598.36

Fuente: SIGET, 2014.

- **Superficie Bioproductiva**

El inventario de superficie bioproductiva correspondiente a Berlín se muestra en la tabla 5-4, a continuación se explican las aproximaciones tomadas en cuenta para la estimación de esta y se tuvo en cuenta las siguientes superficies que forman parte del proceso de generación:

- Plataformas, líneas de acarreo, reinyección:

LaGeo (2000b) menciona que hasta el año 2000 se construyeron 12 plataformas de un área estándar de 0.54 hectáreas. LaGeo (2000b) menciona que hasta el año 2000 el área en que se encuentran los pozos productores, reinyectores, y líneas de acarreo y reinyección se aprovechó mejor que el caso de Ahuachapán por motivos ambientales y económicos predominantemente, más no presenta un área aproximada de superficie.

Monterrosa y Montalvo (2006) presentan mapas de Ahuachapán y Berlín que involucran superficie de plataformas y se asume que ahí se cuenta con área de líneas de acarreo y reinyección debido a la naturaleza de los mapas, por cuanto se estimó un valor de 3.33 Km², no se encontró en las fuentes consultadas un dato actualizado sobre la evolución sobre la superficie de plataformas, líneas de acarreo y reinyección.

Hernández (2009) presenta un historial de perforación de pozos que al ser confrontado con el mapa que se presenta en el anexo 3-A se infiere el año de construcción de dos nuevas plataformas, una en el año 2003, otra en el año 2004 y otra en el año 2005.

Sin embargo, al no contarse con datos actualizados sobre la evolución de la superficie involucrada en estas nuevas tres plataformas hasta el año 2014 e infiriendo según los mapa que presentan Monterosa y Montalvo (2006) y Hernández (2012) del campo de pozos productores y reinyectores de la central geotérmica de Berlín donde no se observan cambios apreciables, se mantuvo los 3.3 Km² que abarcan plataformas, líneas de acarreo y reinyección del sistema en estudio.

- Planta:

El área de las plantas de Condensación y binaria de Berlín se estimó a partir de imágenes satelitales (se presentan en el Anexo 4) tomadas con la herramienta “google earth” con fecha cuatro de Junio del año 2015 y calculadas con el software “cmeps tools”, la premisa tomada para el área de la planta en el tiempo fue que dicha superficie no ha cambiado desde el año 2000 hasta el año 2014, debido a que no se tuvo acceso a datos numéricos que muestren el área de la planta en algún año comprendido en el periodo de estudio (2000-2014).

Tabla 5-4 Inventario de superficie bioproductiva de planta geotérmica de Berlín.

Inventario de Superficie Bioproductiva para Berlín (ha)								
Años	Número de Plataformas	Área por Plataforma	Total Plataformas	Líneas de Acarreo	Líneas de Reinyección	Planta Condensación	Planta Binaria	Total
2000	12	0.54		333.33		7.447	-	340.78
2001	12	0.54		333.33		7.447	-	340.78
2002	12	0.54		333.33		7.447	-	340.78
2003	13	0.54		333.33		7.447	-	340.78
2004	14	0.54		333.33		7.447	-	340.78
2005	15	0.54		333.33		7.447	-	340.78
2006	15	0.54		333.33		7.447	-	340.78
2007	15	0.54		333.33		7.447	2.026	342.80
2008	15	0.54		333.33		7.447	2.026	342.80
2009	15	0.54		333.33		7.447	2.026	342.80
2010	15	0.54		333.33		7.447	2.026	342.80
2011	15	0.54		333.33		7.447	2.026	342.80
2012	15	0.54		333.33		7.447	2.026	342.80
2013	15	0.54		333.33		7.447	2.026	342.80
2014	15	0.54		333.33		7.447	2.026	342.80

Fuente: Elaboración Propia.

5.4 Análisis de inventario

5.4.1 Análisis de inventario para planta generadora de Ahuachapán.

La generación bruta en la central de Ahuachapán inició en el año de 1975 y se caracteriza por presentar tendencia al alza, pues a través de los resultados que se muestran en la figura siguiente se observa que la producción de electricidad presenta incrementos que van acompañados de cortos períodos temporales menores a una década donde se vuelve relativamente constante a excepción de la década de los ochentas donde hay una caída en la producción, posiblemente puede encontrarse relacionada con el conflicto armado civil que la sociedad salvadoreña experimentó en ese periodo.

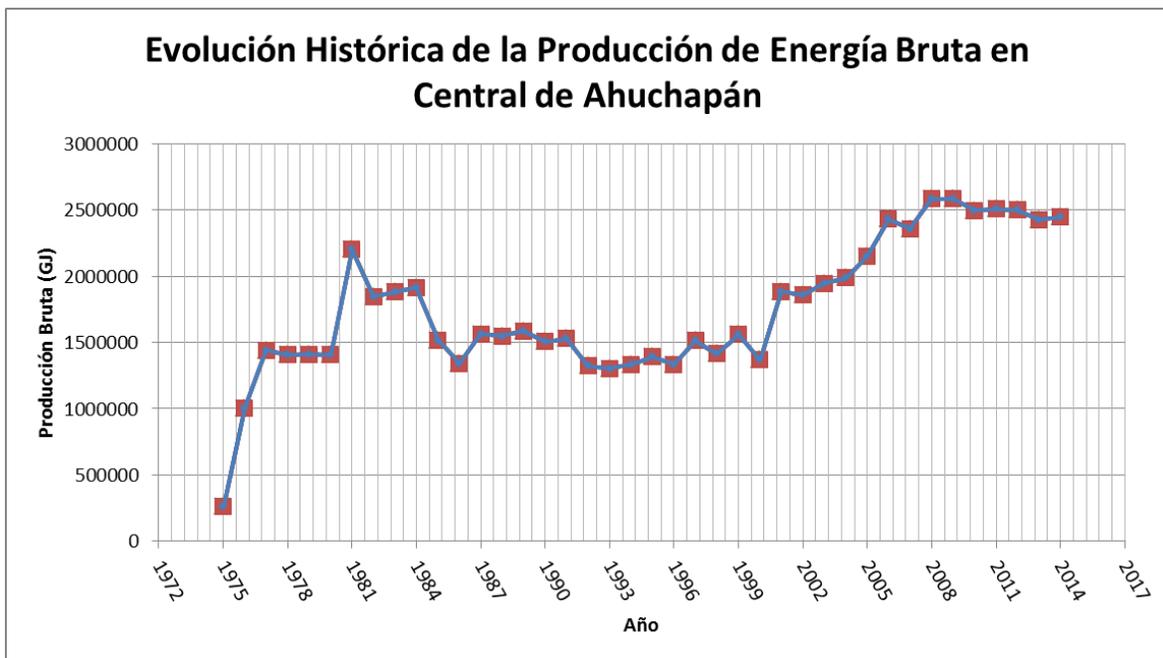


Figura 5-6 Evolución histórica de la producción de energía bruta en central de Ahuachapán.

Fuente: Elaboración Propia.

En la figura 5-6 se observa que a partir del año 1978 la capacidad instalada en la central de Ahuachapán se ha mantenido constante en 95 MW, la producción bruta se ha mantenido en aumento relativamente y es a partir de la primera década del siglo XXI que presenta una clara tendencia al alza estando cada vez más cerca de la capacidad instalada de la central.

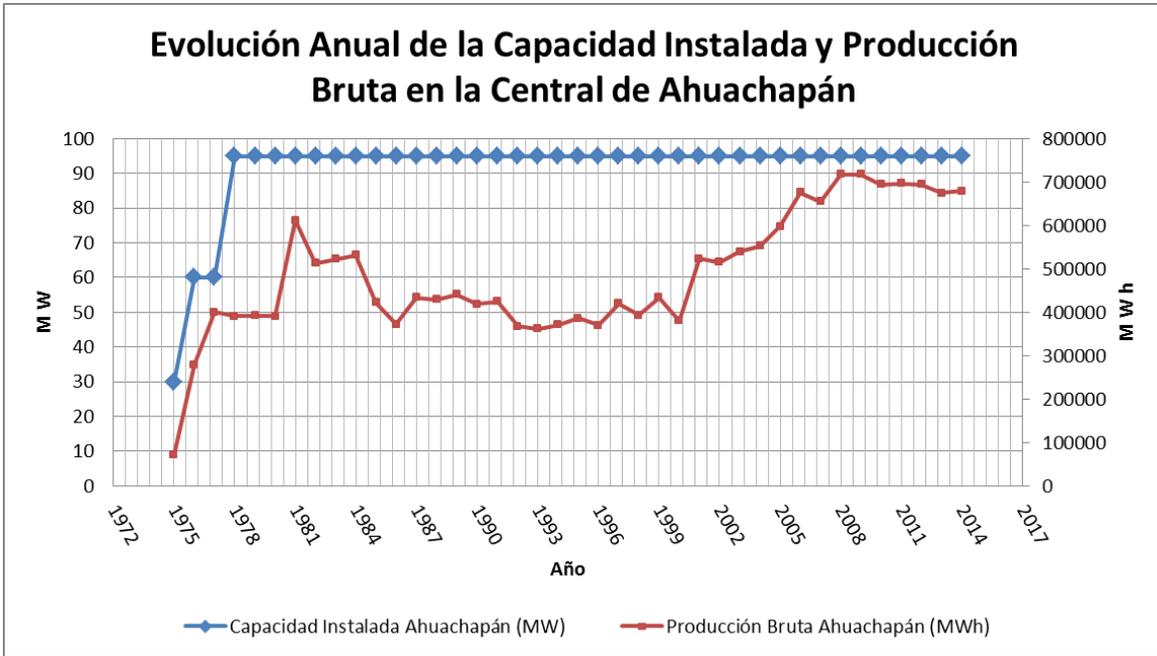


Figura 5-7 Evolución anual de la capacidad instalada y producción bruta en la central de Ahuachapán.

Fuente: Elaboración Propia.

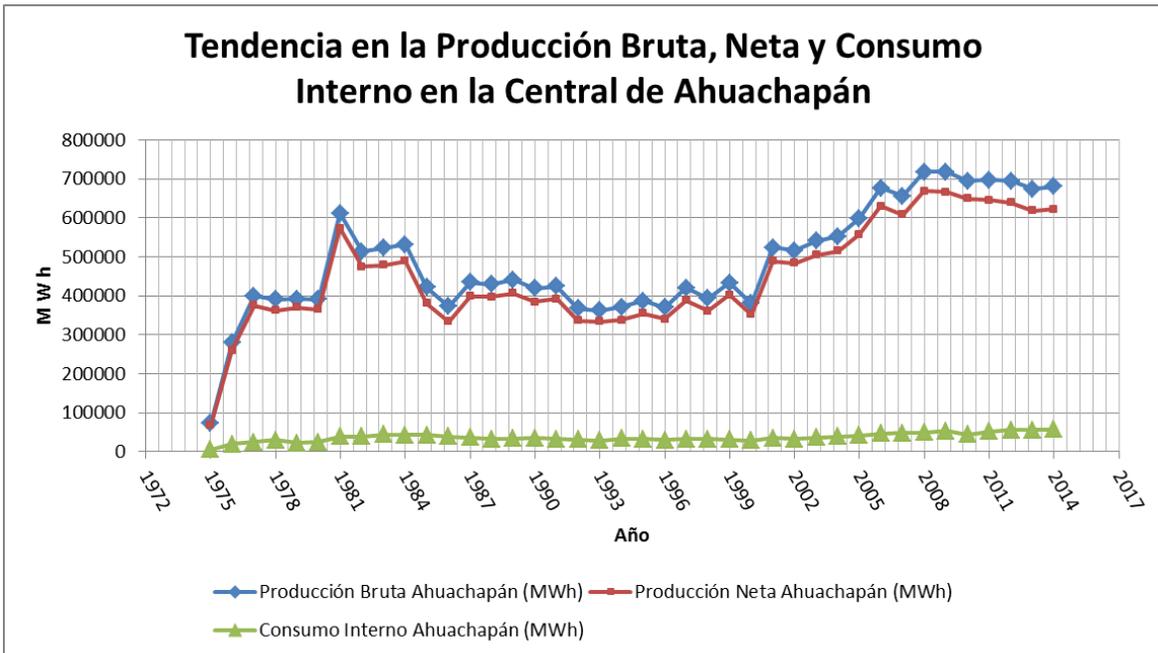


Figura 5-8 Tendencia en la producción bruta, neta y consumo interno en la central de Ahuachapán

Fuente: Elaboración Propia.

De la figura anterior se destaca lo siguiente, el consumo interno de la planta presenta un comportamiento casi lineal, leve al alza y directamente proporcional al

incremento de la producción, por otra parte, el consumo de la planta no supera los 10 MW a lo largo de todo el periodo de estudio.

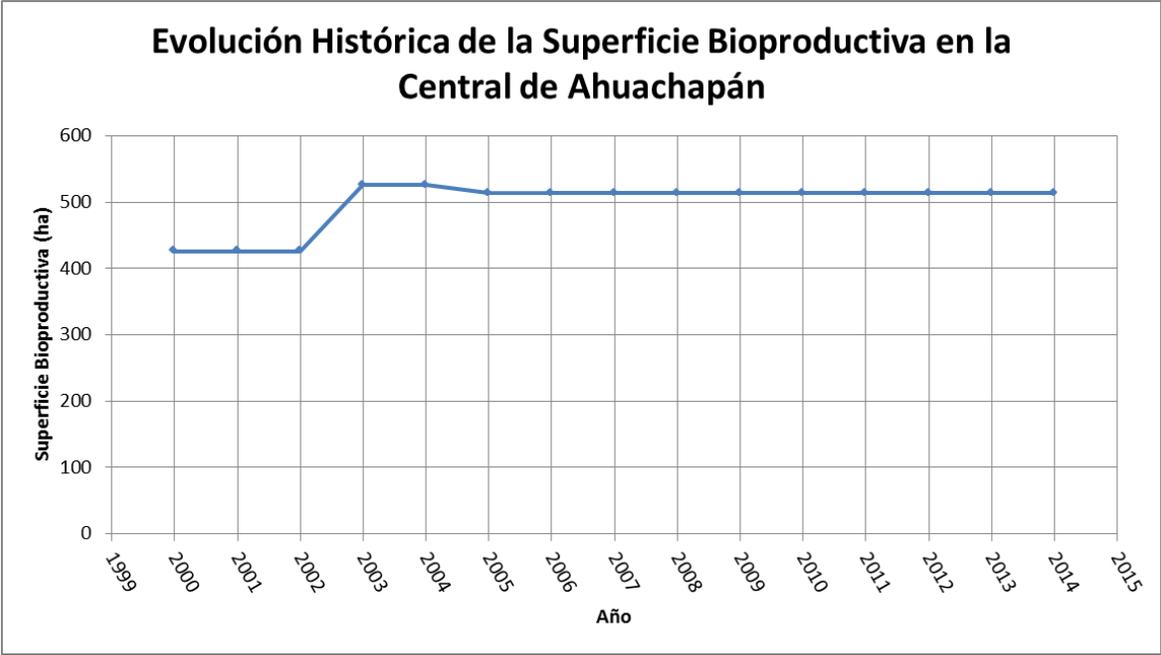


Figura 5-9 Evolución histórica de la superficie bioproductiva en la central de Ahuachapán

Fuente: Elaboración Propia.

Los resultados presentados en la figura 5-9, muestran una tendencia lineal en el uso de la cantidad de tierra en los periodos 2000-2002 y 2005-2014, con un incremento del año 2002 al 2003 y una sensible baja entre los años 2004-2005 debido al cambio en la disposición de las aguas residuales es decir al desuso de la canaleta de desagüe al mar.

De la figura 5-10 se puede destacar que en el período donde puede compararse datos de generación bruta de electricidad y superficie bioproductiva en la central de Ahuachapán, no se observa una tendencia clara entre los cambios que sufre la producción con respecto a la superficie bioproductiva utilizada. Pues del año 2005 al 2009 se incrementó la producción manteniendo constante la superficie bioproductiva, pero a partir del año 2010 se observa una caída en la producción a pesar que el área se mantiene constante.

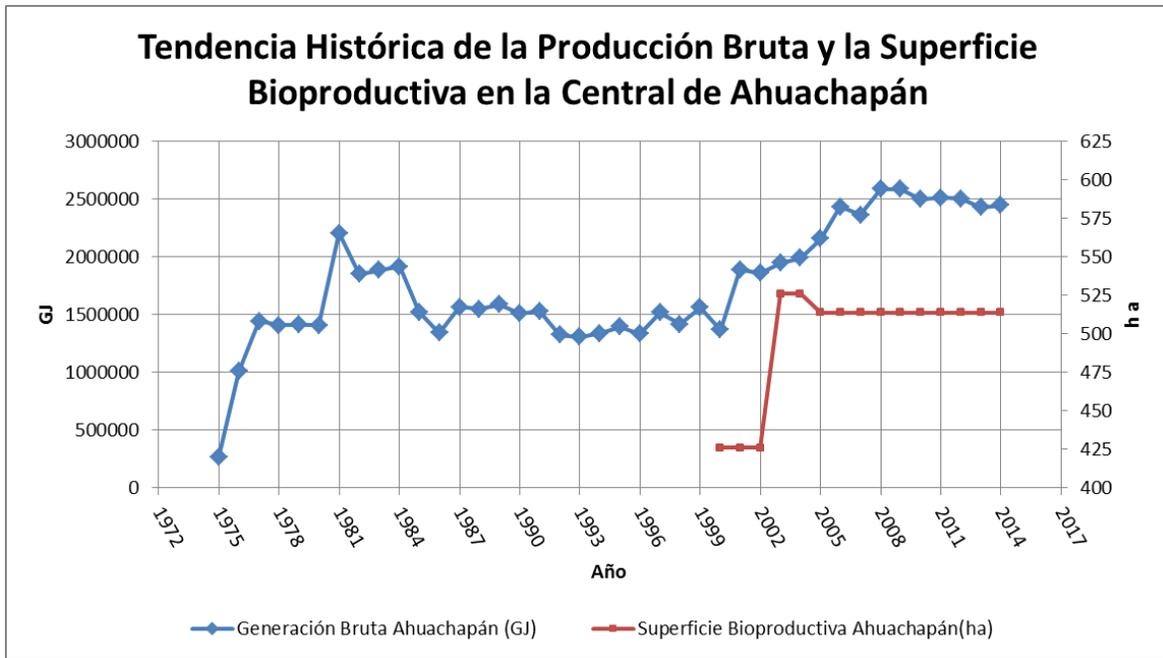


Figura 5-10 Tendencia histórica de la producción bruta y la superficie bioproductiva en la central de Ahuachapán.

Fuente: Elaboración Propia.

5.4.2 Análisis de inventario para planta generadora de Berlín.

En los resultados de la siguiente figura se observa claramente una tendencia al alza en la producción de energía en la central de Berlín, presentando cambios bruscos que evidencian grandes incrementos en los periodos 1998-2000 y 2006-2007.

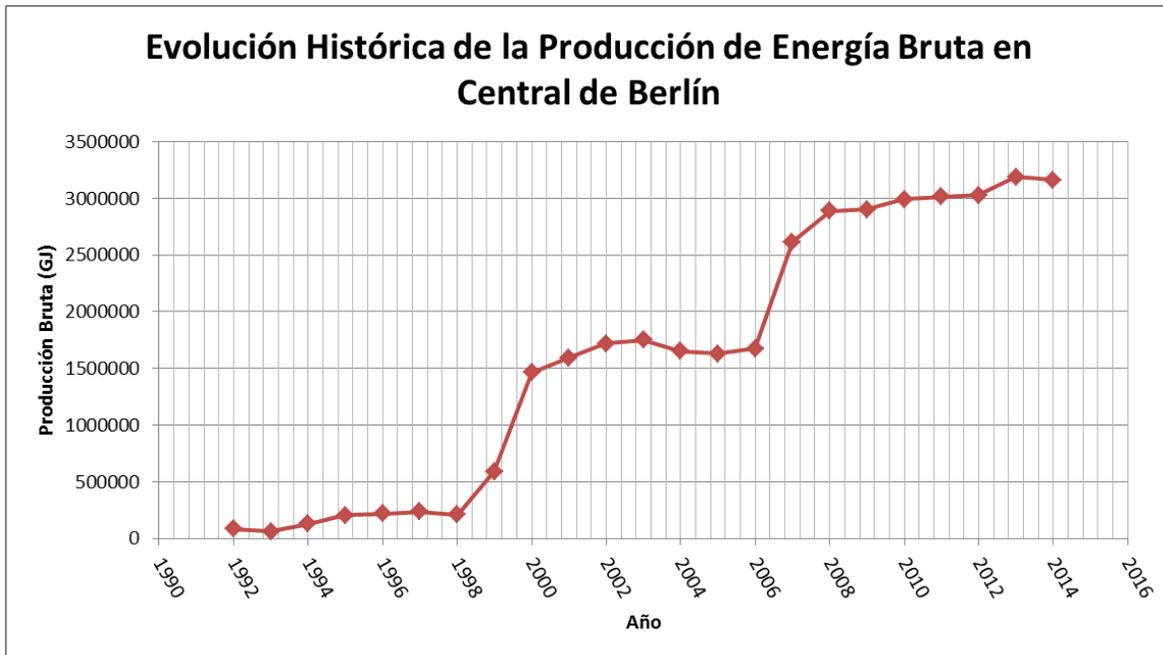


Figura 5-11 Evolución histórica de la producción de energía bruta en central de Berlín.

Fuente: Elaboración Propia.

En los resultados de la siguiente figura se observa que la capacidad instalada ha ido en incremento, manteniéndose constante desde el año 2007 hasta el 2014, es interesante observar que en el periodo 2006-2007 la producción bruta casi equipara a la capacidad instalada, y luego de la puesta en marcha de la planta de ciclo binario en el año 2007 esta brecha se rompe y la tendencia de los años siguientes indica que el fenómeno puede volver a ocurrir en los próximos años, pues, la tendencia en la producción bruta es a incrementarse cada año.

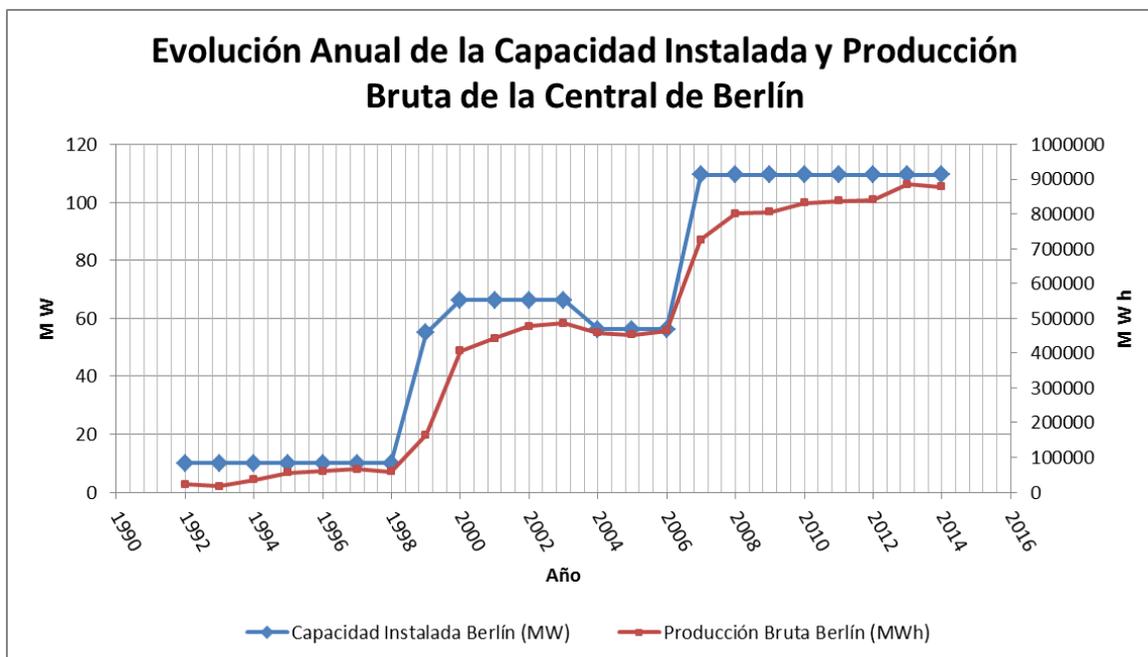


Figura 5-12 Evolución anual de la capacidad instalada y producción bruta de la central de Berlín.

Fuente: Elaboración Propia.

En los resultados de la figura 5-13 que se presenta a continuación, se destaca que el consumo interno de la planta no supera los 10 MW, este presenta una tendencia casi lineal y de leve alza que se evidencia en la discrepancia entre la distancia en las curvas de producción bruta y neta con énfasis en el periodo 2007-2014 donde la diferencia es mayor, esto puede estar relacionado a la incorporación de una planta de ciclo binario que inicia su operación a partir del año 2007.

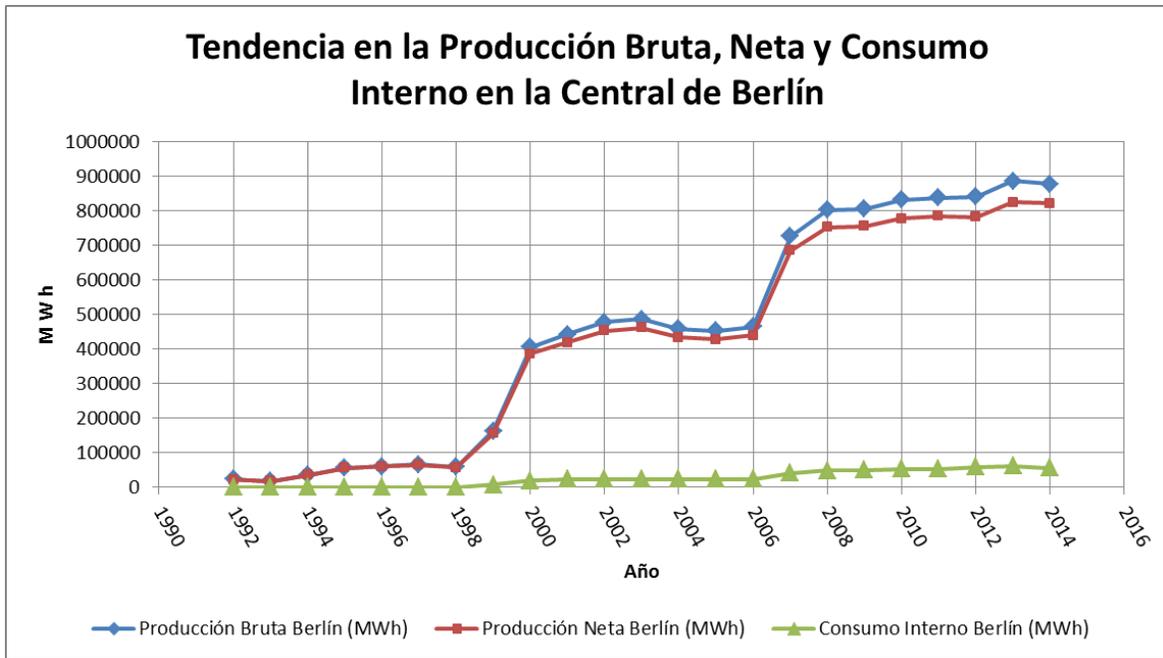


Figura 5-13 Tendencia en la producción bruta, neta y consumo interno de la central de Berlín.

Fuente: Elaboración Propia.

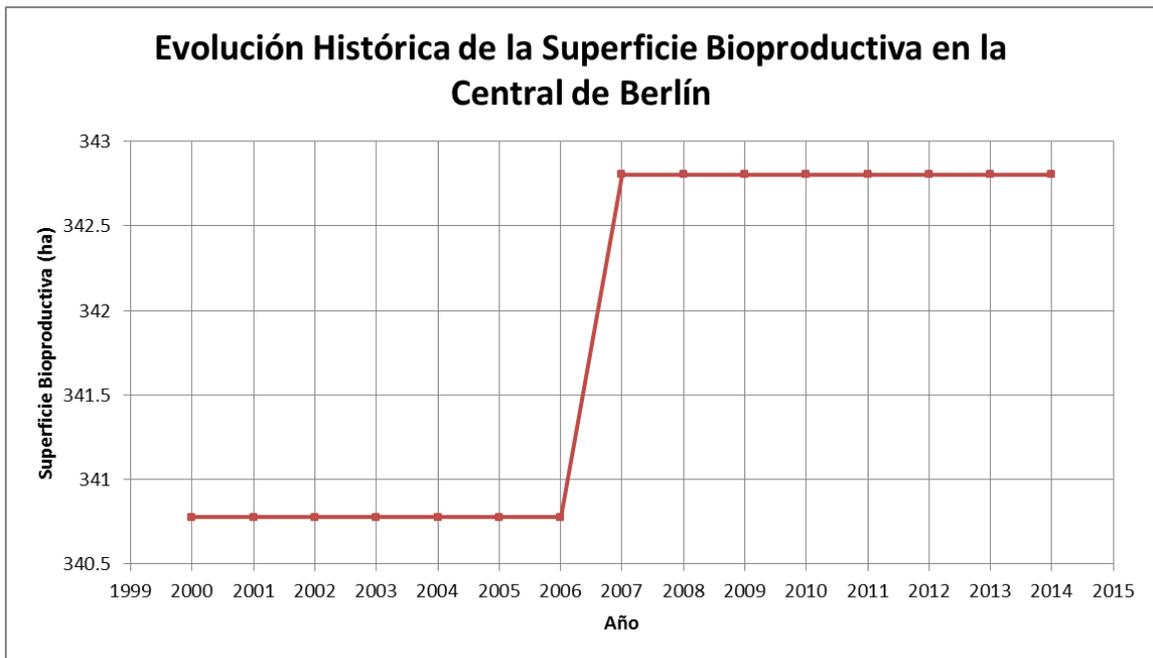


Figura 5-14 Evolución histórica de la superficie bioproductiva en la central de Berlín.

Fuente: Elaboración Propia.

En los resultados de la figura 5-14 es evidente que al incorporar al proceso de generación la planta de ciclo binario en el año 2007 se aumentó la superficie utilizada para generar electricidad.

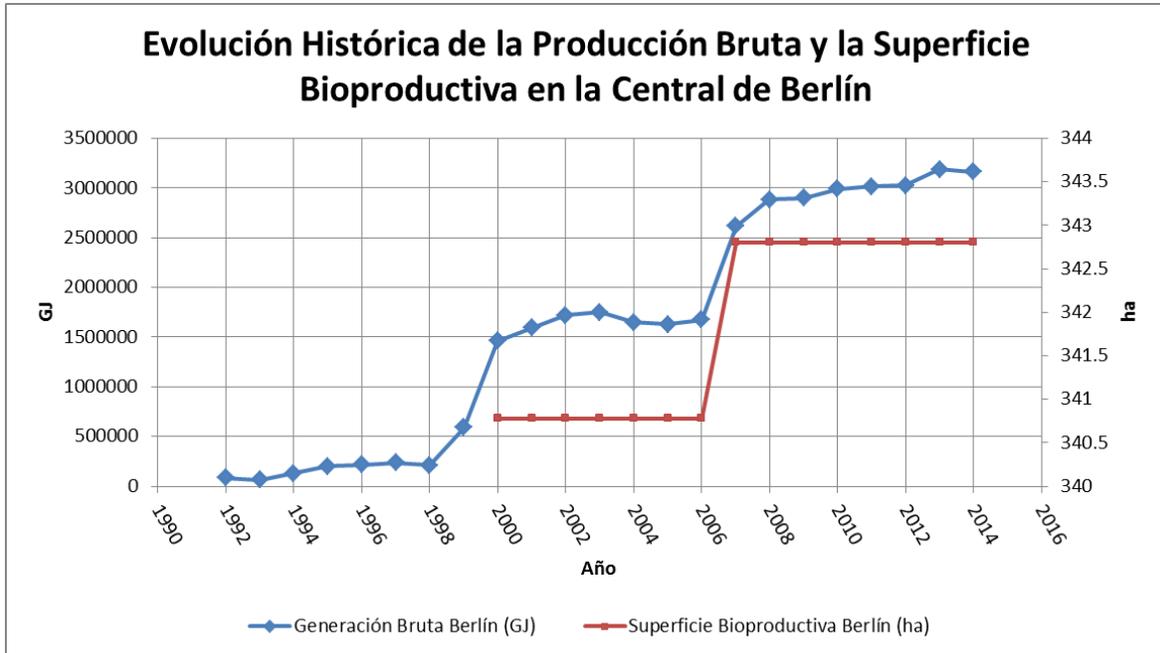


Figura 5-15 Evolución histórica de la producción bruta y la superficie bioproductiva en la central de Berlín.

Fuente: Elaboración Propia.

Los resultados evidenciados en la figura 5-15 se observa que al poner en marcha en el año 2007 la planta de ciclo binario, se aumentó la superficie bioproductiva en uso, a excepción de ello el uso de la tierra se ha mantenido constante en dos periodos de tiempo del 2000-2006 y del 2007-2014 presentándose una tendencia general al alza de la producción de electricidad en ambos.

5.5 Resultados

Se presentan los siguientes resultados y se incorpora un nuevo cálculo, el factor de productividad energética nacional, el cual se calculó por medio de la siguiente ecuación equivalente a una suma ponderada que cada central geotérmica ha realizado en un año específico y cuyos resultados se muestran en la tabla 5-5:

$$\begin{aligned}
 \text{Factor Nacional} = & \frac{\text{Factor Ahuachapán}}{\text{Factor Ahuachapán} + \text{Factor Berlín}} * \text{Factor Ahuachapán} \\
 & + \frac{\text{Factor Berlín}}{\text{Factor Ahuachapán} + \text{Factor Berlín}} * \text{Factor Berlín}
 \end{aligned}$$

(Ecuación 8)

Tabla 5-5 Factores de productividad energética en geotermia calculados.

Factores de Productividad Energética (GJ/ha.año)					
Año	Ahuachapán	Berlín	Factor de Contribución Ahuachapán	Factor de Contribución Berlín	Factor Nacional
2000	3214.34	4289.63	0.43	0.57	3829.03
2001	4429.38	4674.78	0.49	0.51	4555.39
2002	4360.57	5043.12	0.46	0.54	4726.61
2003	3698.55	5133.18	0.42	0.58	4532.38
2004	3784.19	4842.73	0.44	0.56	4378.40
2005	4193.27	4775.55	0.47	0.53	4503.31
2006	4736.50	4906.59	0.49	0.51	4823.05
2007	4592.77	7626.21	0.38	0.62	6486.03
2008	5027.80	8417.94	0.37	0.63	7150.26
2009	5033.41	8460.02	0.37	0.63	7181.80
2010	4863.20	8727.57	0.36	0.64	7344.78
2011	4884.83	8792.34	0.36	0.64	7396.77
2012	4869.96	8825.12	0.36	0.64	7418.67
2013	4724.66	9297.38	0.34	0.66	7756.62
2014	4762.74	9219.57	0.34	0.66	7701.46

Fuente: Elaboración Propia.

Los factores de productividad energética de la central de Ahuachapán cuya evolución histórica se muestra en la figura 5-16 presentan un incremento por etapas y decremento en otros periodos es decir, 2003-2008 y 2009-2014 respectivamente.

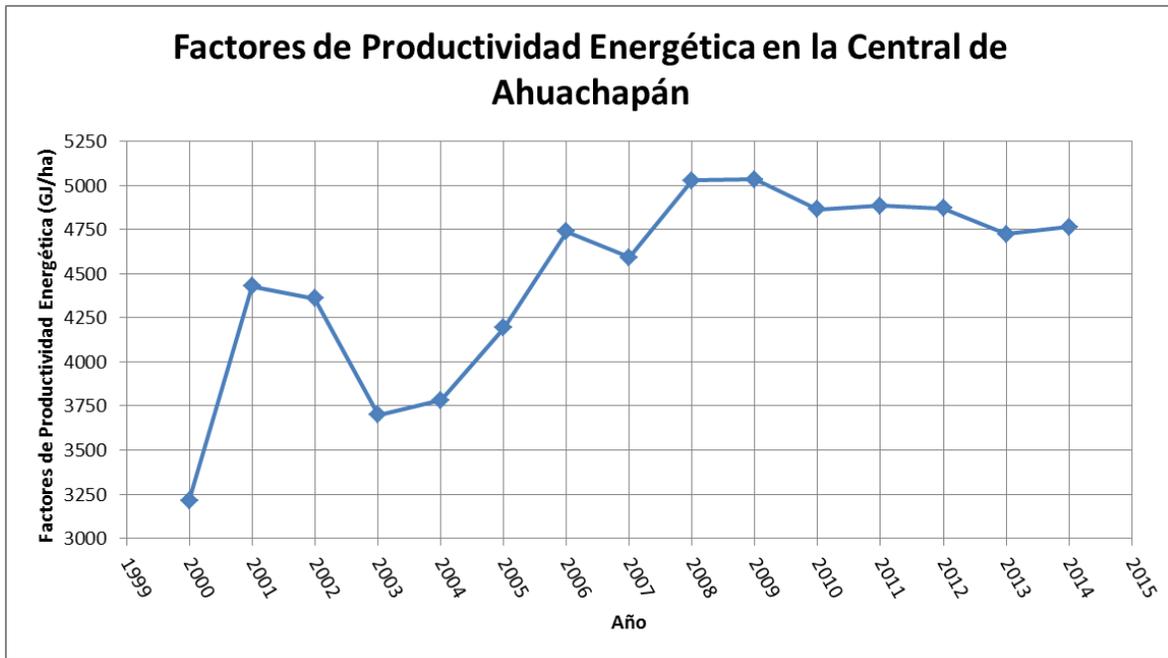


Figura 5-16 Factores de productividad energética en la central de Ahuachapán.

Fuente: Elaboración Propia.

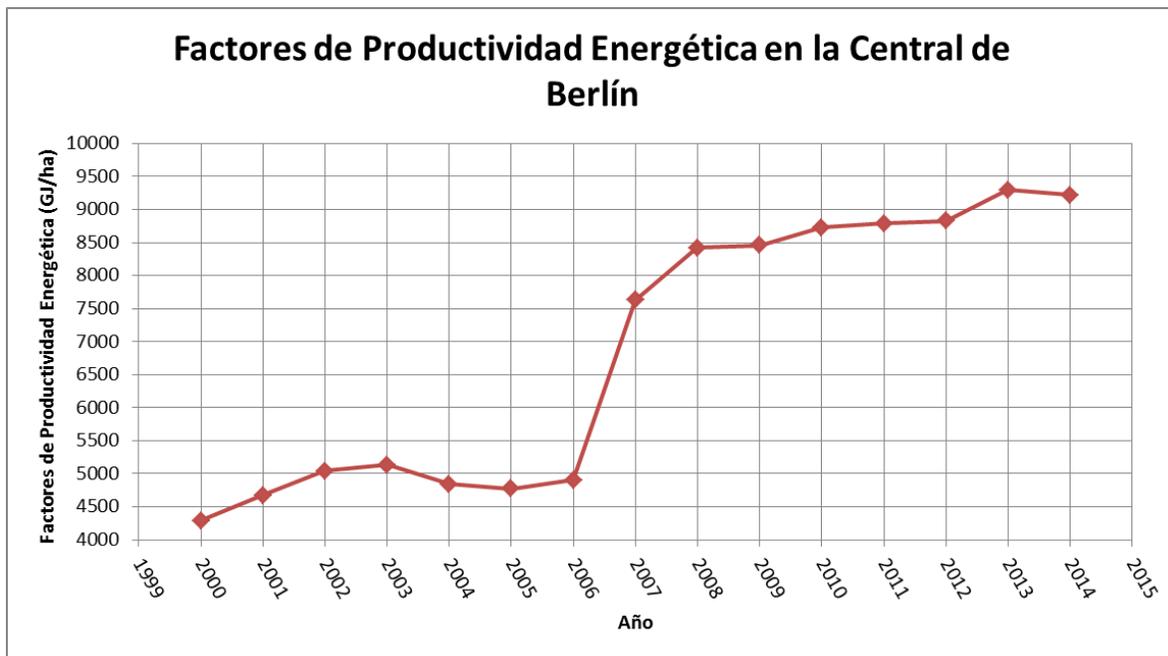


Figura 5-17 Factores de productividad energética en la central de Berlín.

Fuente: Elaboración Propia.

Los resultados de la figura 5-17 muestran una clara tendencia al alza de los factores de productividad energética de la central de Berlín a lo largo del periodo de estudio con un leve decremento en el periodo 2003-2006.

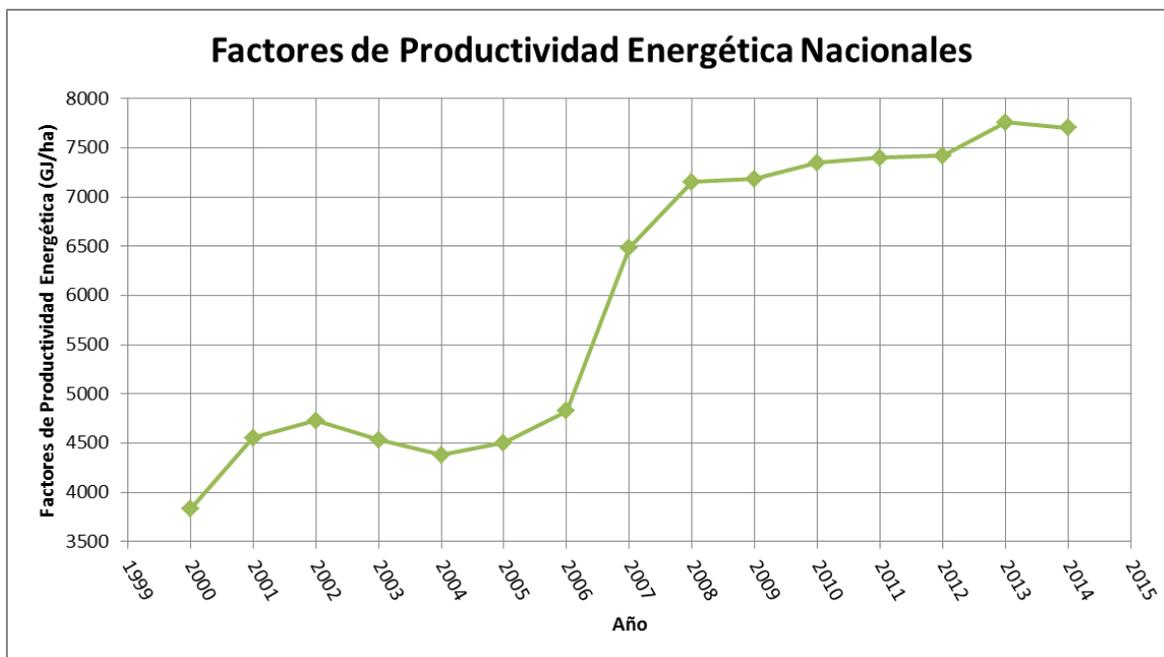


Figura 5-18 Factores de productividad energética Nacionales.

Fuente: Elaboración Propia.

Los factores de productividad nacionales mostrados en la figura 5-18 muestran una tendencia al alza con un periodo de leve decremento evidenciado en el intervalo 2002-2004.

CAPITULO 6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados de los factores de productividad obtenidos al evaluar los aspectos relacionados a estos para las centrales geotérmicas en El Salvador aplicando la metodología planteada en el capítulo 5. Por otra parte, se hizo un análisis comparativo del valor numérico de factores obtenidos con valores numéricos encontrados en bibliografía especializada. Además se expone el cálculo de la huella energética asociada a energía geotérmica tomando los consumos energéticos de otros estudios anteriormente publicados; pero ahora haciendo la evaluación con el factor de productividad obtenido en el presente trabajo comentando los resultados de estos.

6.1 Factores de productividad energética para la generación de energía geotérmica en El Salvador.

A partir de los resultados presentados en el capítulo cinco referentes al cálculo de factores de productividad energética de geotermia en El Salvador utilizando la metodología propuesta en este trabajo de investigación se realizan las siguientes observaciones:

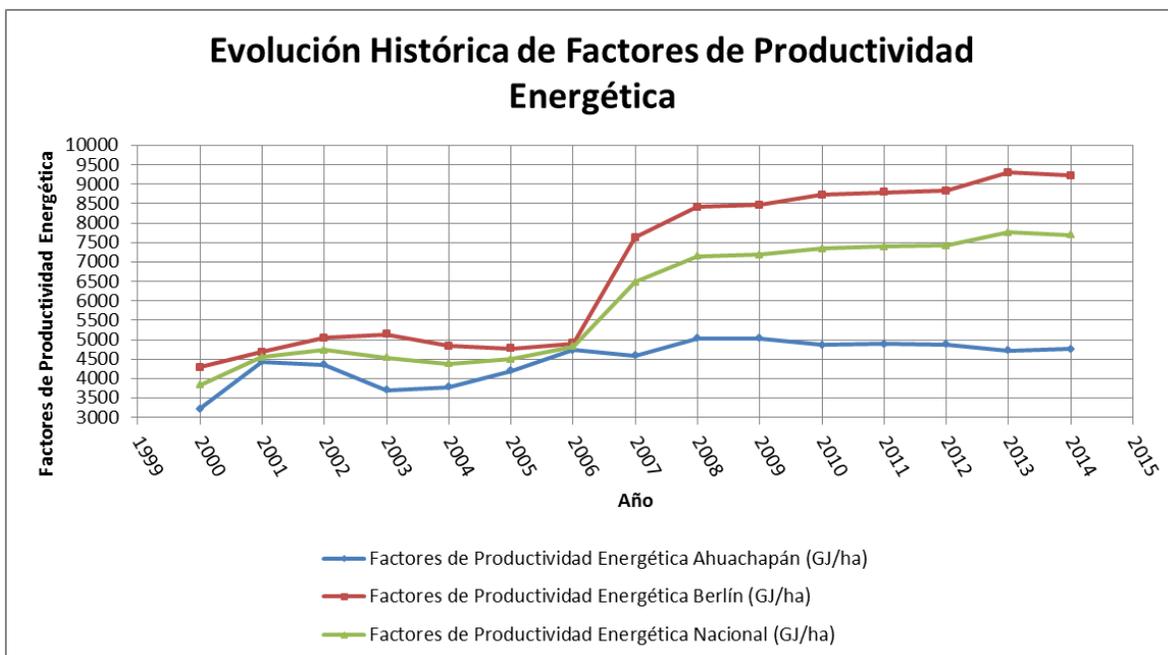


Figura 6-1 Evolución histórica de factores de productividad energética.

Fuente: Elaboración Propia.

Son interesantes los resultados obtenidos en la figura 6-1, pues, se observa que la curva que define los factores de productividad energética nacionales sigue la misma tendencia de la curva que se encuentra definida por los factores de productividad energética de Berlín.

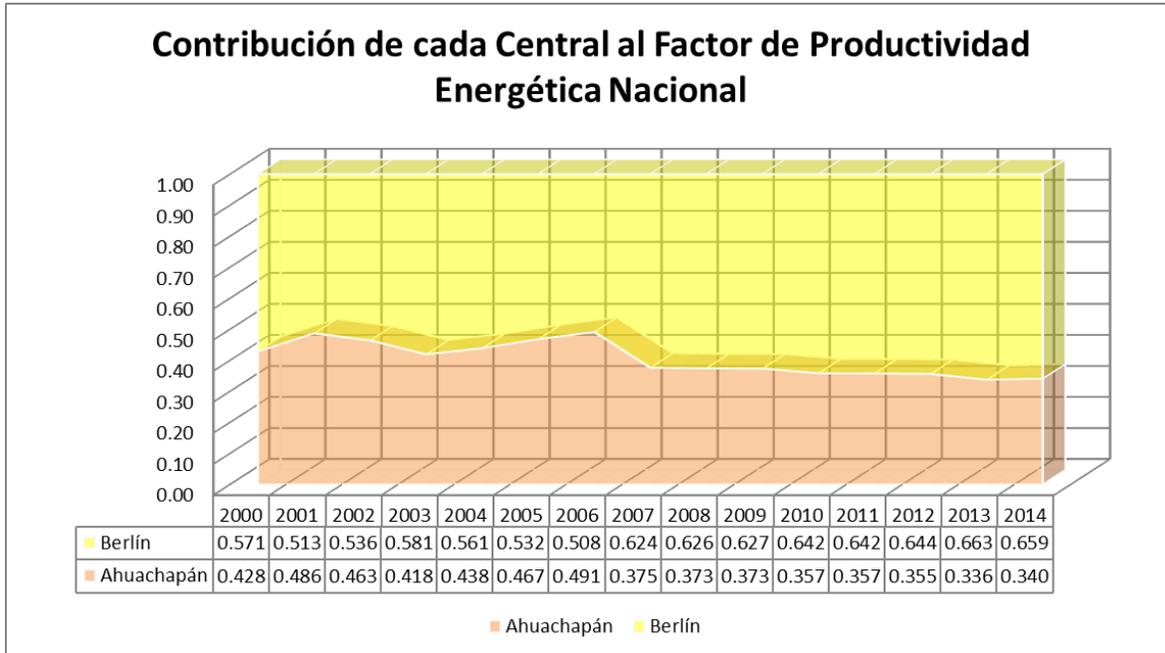


Figura 6-2 Contribución de cada central al factor de productividad energética nacional.

Fuente: Elaboración Propia.

Los resultados de la figura 6-2 proporcionan una explicación del motivo de la tendencia de las curvas mencionadas en la figura 6-1, pues, el factor se ve mayormente influenciado por la central geotérmica de Berlín en comparación con el aporte de la central geotérmica de Ahuachapán, en todos los años pondera con un valor mayor a 0.5 de un total de 1.0, llegando en algunos años hasta el 0.66 (2013).

En cuanto a los factores de productividad energética, para Ahuachapán se observa una tendencia al alza en el quinquenio 2003-2008 con una leve caída en el año 2007, y una tendencia de pendiente negativa en el periodo 2009-2014, por otra parte la producción bruta de la central presenta tendencia al alza en términos generales a lo largo del periodo de análisis 2000-2008 y una leve caída casi lineal a partir del año 2009. Las aseveraciones anteriores se pueden apreciar en la figura 6-3.

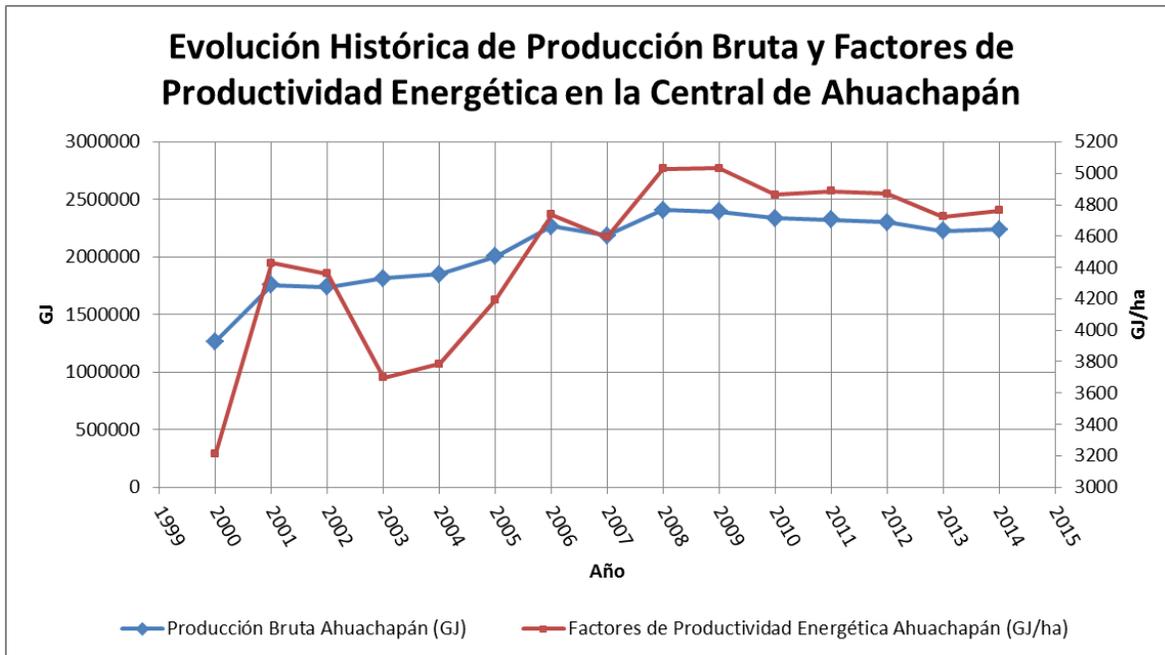


Figura 6-3 Evolución histórica de producción bruta y factores de productividad energética en la central de Ahuachapán.

Fuente: Elaboración Propia.

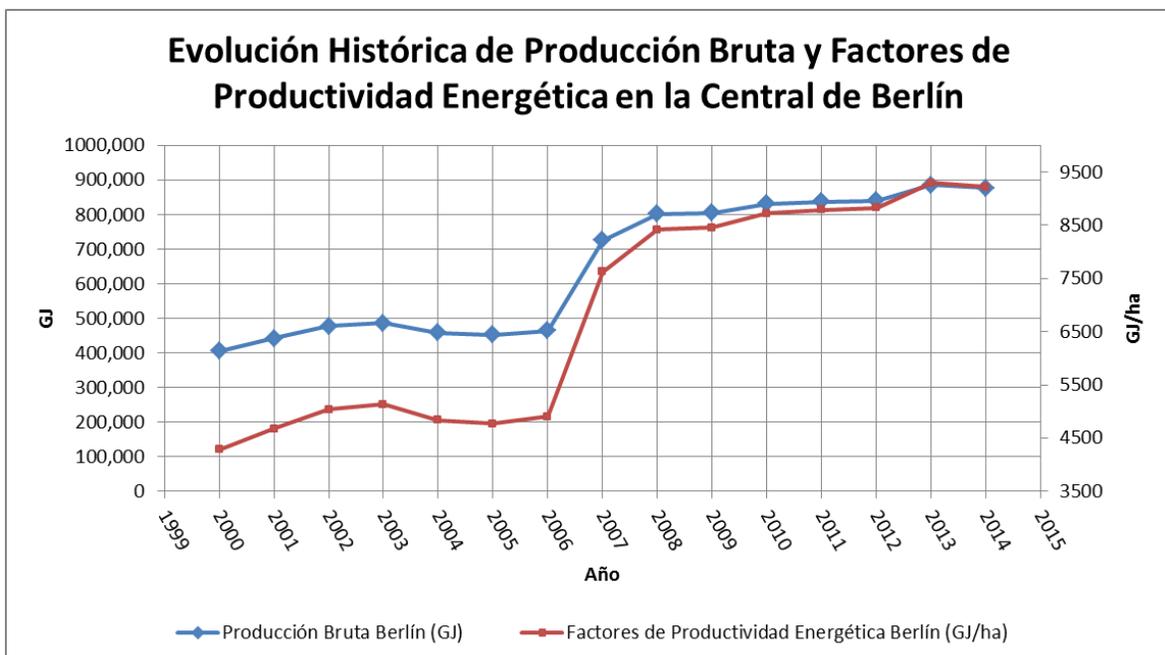


Figura 6-4: Evolución histórica de producción bruta y factores de productividad energética en la central de Berlín.

Fuente: Elaboración Propia.

Los resultados de la figura 6-4 son interesantes, pues, muestran una correlación entre el aumento de la producción de energía y los factores de productividad energética en la central de Berlín.

Los resultados mostrados en la siguiente figura para la central de Ahuachapán, no muestran una relación clara entre la superficie bioproductiva y los factores de productividad energética en el tiempo.

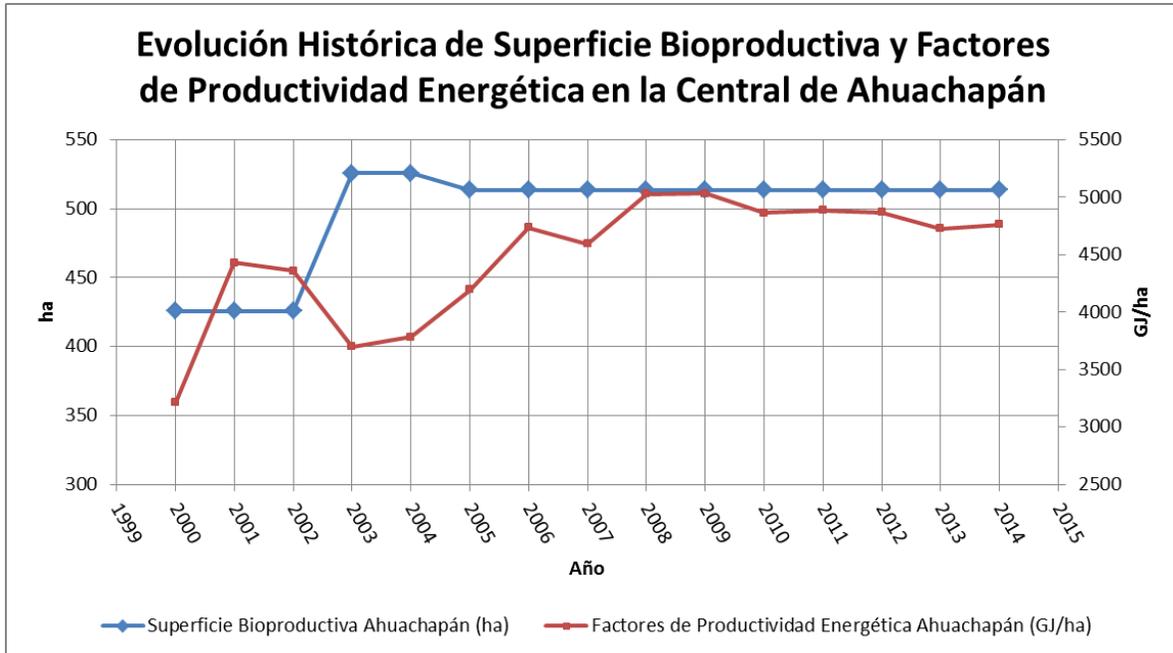


Figura 6-5 Evolución histórica de superficie bioproductiva y factores de productividad energética en la central de Ahuachapán.

Fuente: Elaboración Propia.

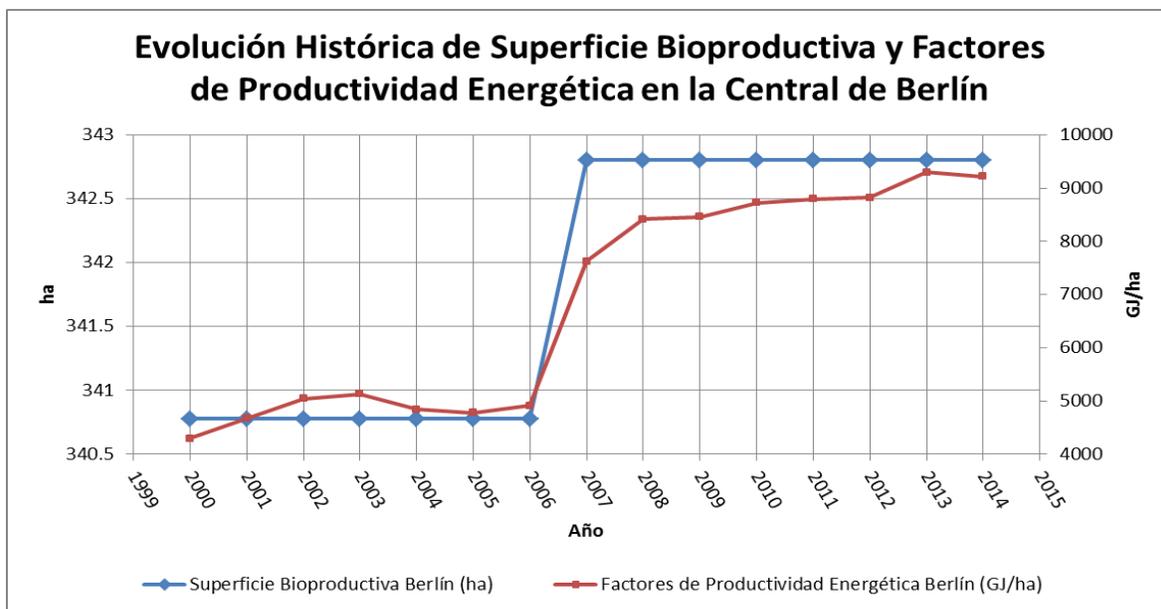


Figura 6-6 Evolución histórica de superficie bioproductiva y factores de productividad energética en la central de Berlín.

Fuente: Elaboración Propia.

En referencia a los resultados de la figura anterior se observa que manteniendo constante la superficie bioproductiva los factores de productividad aumentaron en términos generales, esto se debe obviamente al incremento en la producción de electricidad pues no hubo cambios en el área superficial, además, al poner en marcha la planta de ciclo binario en el año 2007 se observa que el factor de productividad aumentó considerablemente con respecto a años anteriores, de igual forma la superficie bioproductiva aumentó un poco más de 2 hectáreas.

Sobre la base de los resultados comentados anteriormente, se hace la siguiente inferencia:

En el periodo 2000-2014 los factores de productividad energética calculados para las centrales de Ahuachapán y Berlín se han visto mayormente afectados en cortos periodos por la producción de electricidad y la cantidad de terreno bioproductivo involucrado en el proceso de generación, 2002-2005 para Ahuachapán y 2006-2007 Berlín; sin embargo, dado que por periodos específicos la superficie bioproductiva se ha mantenido constante, la variación numérica de los factores de productividad energética es gobernada por la generación de electricidad, típico de los periodos 2000-2002 y 2006-2014 en Ahuachapán y 2000-2007 y 2007-2014 en Berlín.

Tomando como fundamento el resultado anterior, se puede sugerir las siguientes oportunidades de mejora para elevar numéricamente el valor de la generación de electricidad y por consecuencia los valores de productividad energética por unidad de área: Aumentar el factor de capacidad de las centrales generadoras: Dado que en las figuras 5-7 y 5-12 muestran que la capacidad instalada difiere de la producción bruta, se exponen algunas ideas referentes a ello en la figura siguiente.

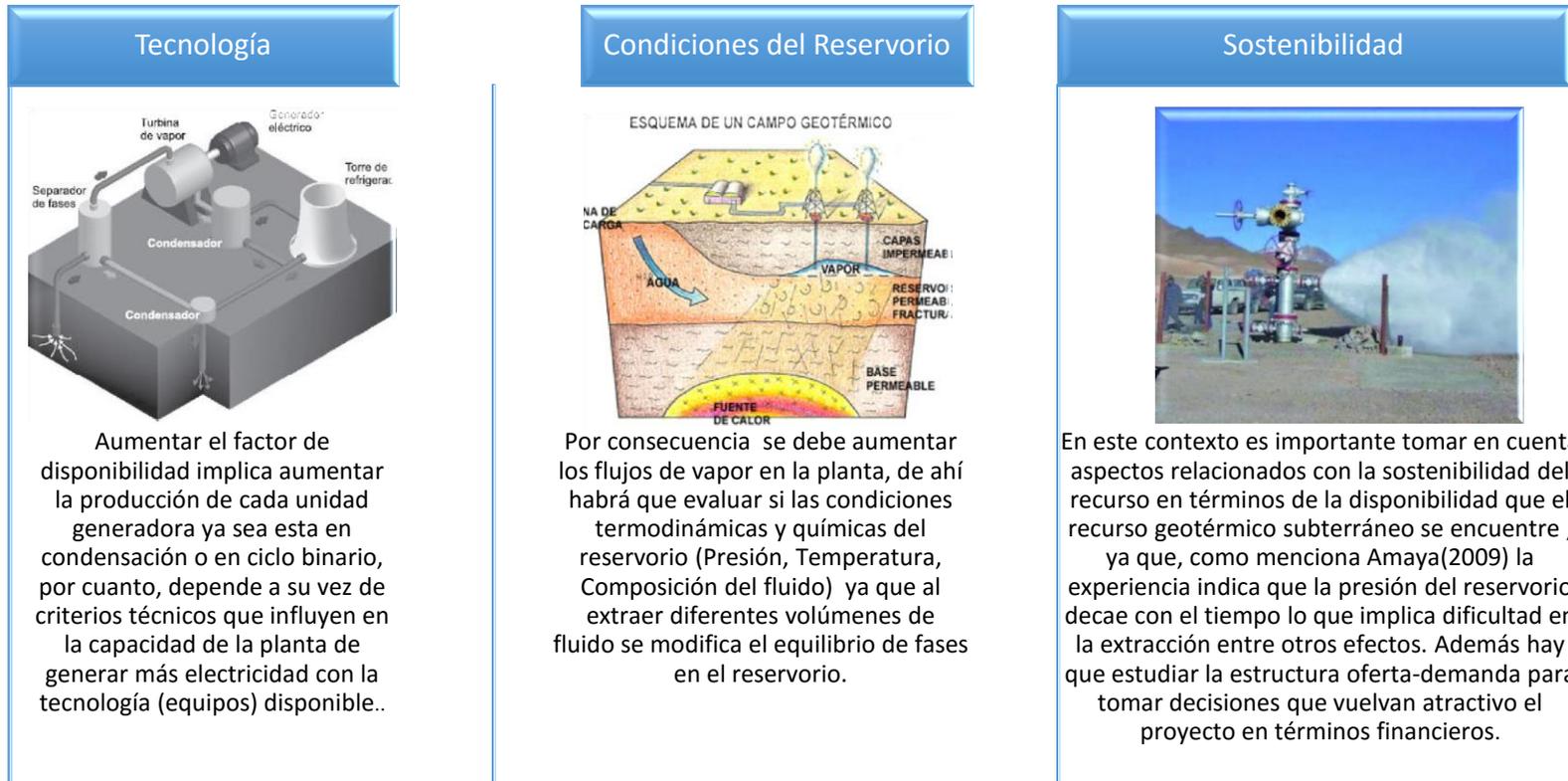


Figura 6-7 Elementos que afectan la generación de electricidad en geotermia.

Fuente: Elaboración Propia.

Referente a superficie bioproductiva como se menciona en el capítulo 4 el terreno en el que se encuentran plataformas y planta generadora, así como las tierras donde se ubican las líneas de acarreo y reinyección se asocian cualitativamente a un mayor impacto a superficie de cultivo como café, maíz y otros. LaGeo (2000b) menciona que en el caso de la Central de Berlín el terreno se usó de manera más eficiente que en Ahuachapán y es evidente en los valores cuantitativos reportados en la tablas 5-2 y 5-4.

6.2 Análisis comparativo de factores de productividad energética en geotermia.

A continuación se presenta el cálculo de factores de productividad energética en geotermia donde se compara con otros encontrados en bibliografía. Los factores fueron calculados con el mismo inventario levantado en el capítulo 5. Y se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 6-1 Factores de productividad energética reportados.

Factores de productividad energética GJ/ha.año			
Año	Ahuachapán	Berlín	Factor Nacional
2000	3214.34	4289.63	3829.03
2001	4429.38	4674.78	4555.39
2002	4360.57	5043.12	4726.61
2003	3698.55	5133.18	4532.38
2004	3784.19	4842.73	4378.40
2005	4193.27	4775.55	4503.31
2006	4736.50	4906.59	4823.05
2007	4592.77	7626.21	6486.03
2008	5027.80	8417.94	7150.26
2009	5033.41	8460.02	7181.80
2010	4863.20	8727.57	7344.78
2011	4884.83	8792.34	7396.77
2012	4869.96	8825.12	7418.67
2013	4724.66	9297.38	7756.62
2014	4762.74	9219.57	7701.46

Fuente: Elaboración Propia.

El análisis comparativo entre los factores de productividad energética que se presentaron en la sección anterior con valores obtenidos en bibliografía. Se presentan a continuación:

Tabla 6-2 Factores de productividad energética.

Valor	Unidades	Referencia	Observación
225, 000	GJ/ha.año	Adaptado de MIT, 2006	Plantas flash (110 MW) excluyendo pozos.
211, 764.6	GJ/ha.año	Adaptado de MIT, 2006	Plantas binarias (20MW) excluyendo pozos.
39, 996	GJ/ha.año	Adaptado de MIT, 2006	Plantas flash (56MW) incluye pozos (direccionales) y tuberías.
4762.74	GJ/ha.año	Este trabajo de investigación para año 2014	Central Ahuachapán, incluye plataformas, planta con tecnología flash simple y doble flash, líneas de acarreo y reinyección.
9219.57	GJ/ha.año	Este trabajo de investigación para año 2014	Central Berlín, incluye plataformas, planta con tecnología flash simple y binaria, líneas de acarreo y reinyección.

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 6-2 se observa los valores de factores de productividad energética, numéricamente es evidente que son resultados totalmente diferentes entre sí, debido, a las siguientes razones: los valores que presenta MIT (2006) fueron calculados para otros fines no con el objetivo de ser utilizados en el cálculo de huella ecológica y es palpable en las superficies que toma en cuenta dicho factor, ya que no toma en cuenta área de planta y tuberías de reinyección u otras que se encuentren involucradas en el proceso de generación según la tecnología utilizada, en este sentido, la tecnología en cada central es diferente a la existente en las centrales geotérmicas tanto la de Ahuachapán como la de Berlín. Para el cálculo de los factores de productividad asociados a cada central

geotérmica en Ahuachapán y Berlín se tomó como fundamento la metodología propuesta en el capítulo 5 de este trabajo y estos valores son menores a los presentados por el MIT en el año 2006.

Si se observa con mayor detenimiento, de los valores de productividad energética que presenta MIT (2006), los valores más elevados (225, 000 GJ/ha.año y 211, 764.6 GJ/ha.año) son aquellos que excluyen el área de los pozos de la superficie energética productiva, mientras que al ir añadiendo áreas en la superficie bioproductiva como por ejemplo área de tuberías y pozos direccionales, la productividad energética disminuye aunque este valor no hacer diferencia en el tipo de tecnología-, y no especifica si es el total de pozos en una plataforma ya que, en una misma plataforma se pueden perforar varios pozos verticales y direccionales, caso común en Ahuachapán y Berlín; en este sentido, metodológicamente hablando, el autor no especifica si se mide la tubería direccional del pozo, que en el caso de huella ecológica, la metodología no especifica a cerca de superficie subterránea que pueda ser bioproductiva, por cuanto en la metodología propuesta en este trabajo se aclara que no se toma en cuenta este tipo de superficie.

6.3 Cálculo de HE asociada a geotermia.

Para calcular la huella ecológica asociado al consumo de energía eléctrica a partir de geotermia en El Salvador, es necesario establecer el tipo de terreno que es impactado y su vez asociarlo a un factor de equivalencia, no olvidando que también es necesario datos de consumo y el valor de productividad energética. Para estudios de HE asociados a energía geotérmica en los cuales se reporte datos de consumo a partir del año 2015 en adelante se recomienda utilizar el factor de productividad energética más reciente, tomando como base este trabajo de investigación se sugiere el factor nacional de productividad calculado para el año 2014.

En este apartado se retoman datos de investigaciones previas en las que se calculó la HE de la producción de Biodiesel y Bioetanol en El Salvador por Fernández, et. Al, (2015), y la HE de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador presentado por Alvarenga et. Al, (2015) para el año 2013; realizando otras aproximaciones de los valores de HE utilizando la ecuación 1, descrita con anterioridad:

$$HE = \frac{\text{Consumo}}{\text{Productividad Energética}} \times \text{factor de equivalencia (Ecuación 1)}$$

Se realizaron dos cálculos de HE ambos orientados a calcular la HE asociada al consumo de energía eléctrica proveniente de geotermia, en primer lugar se calculó la HE sustituyendo el valor de la productividad energética por el valor calculado en este trabajo para el año de 2013 ya que los consumos energéticos asociados corresponden a ese año, manteniendo constantes el consumo y el factor de equivalencia, en segundo lugar se calculó la HE sustituyendo la productividad energética por el valor calculado en este trabajo y el valor del factor de equivalencia, manteniendo constante el valor de consumo, con la finalidad de observar la tendencia de la HE.

- **Cálculo de HE del Bioetanol (BE) y Biodiesel (BD) en El Salvador.**

Para calcular una primera aproximación del valor de HE asociada a la geotermia de la investigación llevada a cabo por Fernández, et al (2015), se utiliza los datos descritos en la tabla 6-3, se debe aclarar que este valor ha sido asociado por sus autores a tierras de pastoreo.

Tabla 6-3 Valores asociados al cálculo de la HE de la producción de BE y BD.

Descripción	Valor	Unidades	Referencia
Consumo energético asociado a geotermia para la producción de BE	11491.3	GJ/año	Tabla A6-18, Apéndice A, Fernández, et al (2015).
Consumo energético asociado a geotermia para la producción de BE	180.2	GJ/año	Tabla A6-14, Apéndice A, Fernández, et al (2015).
Productividad Energética	7756.62	GJ/año/ha	Tabla 5-5, año 2013 de este trabajo de investigación.
Factor de Equivalencia	0.46	gha/ha	Domenech (2007) asociado a tierra de pastoreo.

Fuente: Elaboración Propia.

$$HE_{BD} = \frac{180.2 \text{ GJ/año}}{7756.62 \text{ GJ/ha/año}} \times 0.46 \text{ gha/ha} = 0.010 \text{ gha}$$

$$HE_{BE} = \frac{11491.3 \text{ GJ/año}}{7756.62 \text{ GJ/ha/año}} \times 0.46 \text{ gha/ha} = 0.682 \text{ gha}$$

- **Cálculo de HE de la FIA, Universidad de El Salvador.**

Para calcular una primera aproximación del valor de HE asociada a la geotermia de la investigación llevada a cabo por Alvarenga, et al (2015), se utiliza los datos descritos en la tabla 6-4, se debe aclarar que este valor ha sido asociado por sus autores a tierra urbanizada.

Tabla 6-4 Valores asociados al cálculo de la HE de la FIA

Descripción	Valor	Unidades	Referencia
Consumo energético asociado a geotermia	66,605.79	kWh/año	Capítulo 4, Tabla 4.8, Alvarenga et al (2015).
Productividad Energética	7756.62	GJ/año/ha	Tabla 5-5 año 2013, de este trabajo de investigación.
Factor de Equivalencia	2.51	gha/ha	Domenech (2007) (asociado a tierra urbanizada).

Fuente: Elaboración Propia.

Convirtiendo consumo energético y multiplicando por el porcentaje de participación en la matriz nacional:

$$66,605.79 \text{ KWh/año} \times 0.036 \text{ GJ/KWh} \times 0.248 = 594.6564 \text{ GJ/año}$$

$$HE_{FIA} = \frac{594.6564 \text{ GJ/año}}{7756.62 \text{ GJ/ha/año}} \times 2.51 \text{ gha/ha} = 0.192 \text{ gha}$$

Los valores calculados anteriormente representan la primera aproximación al cálculo de las huellas ecológicas asociadas a la energía geotérmica, en las que únicamente se sustituyó el factor de productividad energética por el obtenido en este trabajo de investigación para el año 2013 y manteniendo la asociación a las superficies bioproductivas que los autores de cada investigación consideraron pertinentes, por lo que

se realizará una segunda aproximación con los datos descritos en la tabla 6-5, para obtener un valor de huella ecológica relacionado a la superficie bioproductiva de tierras cultivos que es la superficie bioproductiva a la que los factores de productividad calculados en esta investigación han sido asociados.

Tabla 6-5 Valores asociados al cálculo de segunda aproximación de HE

Descripción	Valor	Unidades	Referencia
Consumo energético asociado a geotermia para la producción de BE	11491.3	GJ/año	Tabla A6-18, Apéndice A, Fernández, et al (2015).
Consumo energético asociado a geotermia para la producción de BE	180.2	GJ/año	Tabla A6-14, Apéndice A, Fernández, et al (2015).
Consumo energético asociado a geotermia en la FIA.	594.66	GJ/año	Capítulo 4, Tabla 4.8, Alvarenga et al (2015).
Productividad Energética	7756.62	GJ/año/ha	Tabla 5-5, año 2013 de este trabajo de investigación.
Factor de Equivalencia	2.51	<i>gha/ha</i>	Domenech (2007) asociado a tierras de cultivo.

Fuente: Elaboración Propia.

$$HE_{BD} = \frac{180.2 \text{ GJ/año}}{7756.62 \text{ GJ /ha/año}} \times 2.51 \text{ gha/ha} = 0.058 \text{ gha}$$

$$HE_{BE} = \frac{11491.3 \text{ GJ/año}}{7756.62 \text{ GJ /ha/año}} \times 2.51 \text{ gha/ha} = 3.719 \text{ gha}$$

$$HE_{FIA} = \frac{594.6564 \text{ GJ/año}}{7756.62 \text{ GJ/ha/año}} \times 2.51 \text{ gha/ha} = 0.192 \text{ gha}$$

6.4 Análisis comparativo de huella energética asociada a geotermia.

Los resultados obtenidos en el apartado 6.3 referente al cálculo de HE asociada a la energía geotérmica se exponen en el siguiente cuadro resumen:

Tabla 6-6 Valores reportados de huella ecológica variando factores de productividad energética factores de equivalencia.

Autores		HE referencia	HE calculada	HE asociada
Fernández et al.	BD	0.370	0.010	0.058
	BE	23.910	0.682	3.719
Alvarenga et al.	FIA	0.040	0.192	0.192

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 6-7 Proporciones de cambio entre HE reportadas.

Autores		HE referencia-calculada	HE referencia-asociada	HE calculada-asociada
Fernández et al.	BD	37:1	6.3:1	0.2:1
	BE	35:1	6.4:1	0.2:1
Alvarenga et al.	FIA	0.2:1	0.2:1	1:1

Fuente: Elaboración propia.

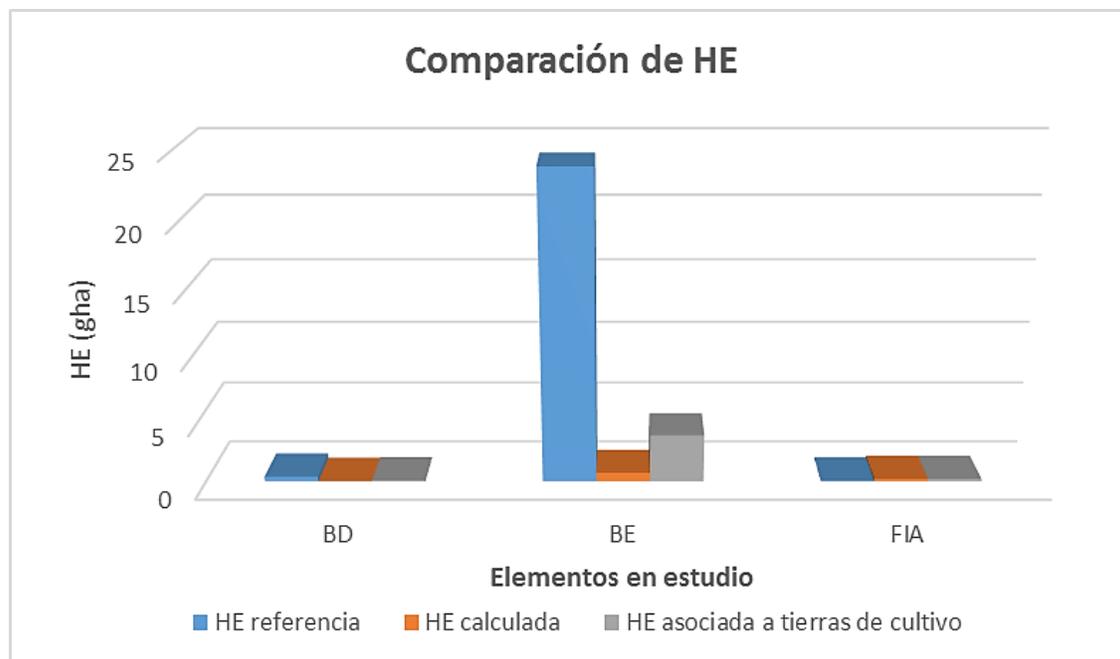


Figura 6-8 Huella energética asociada a geotermia en el año 2013 para diferentes rubros.

Fuente: Elaboración Propia.

En la figura 6-8 se muestra la comparación de los valores obtenidos de HE para el año 2013 mediante tres gráficas, la de color naranja representa los valores obtenidos de la HE calculados como una primera aproximación, la gráfica de color gris representa a los valores de HE asociados a tierras de cultivo mientras que la gráfica azul muestra los valores de HE de referencia que son los calculados por los autores de las investigaciones tomadas en el apartado anterior. En el caso de los cálculos para la primera aproximación de los valores de HE, se observa que para las HE de Biocombustibles la calculada con el factor de productividad que se presenta en este trabajo, el valor de HE es menor a la calculada por Fernández et al. (2015), por el contrario la HE de la FIA es mayor que la calculada por Alvarenga et al. (2015), en donde la discrepancia en el cálculo es debido a los factores de productividad energética utilizados, ya que se retomaron los consumos energéticos asociados a la energía eléctrica provenientes de la geotermia en donde en la investigación realizada por Fernández, et al (2015) se usó un factor de equivalencia asociado a tierras de pastoreo, mientras que en la investigación realizada por Alvarenga, et al (2015) el factor de equivalencia utilizado es el de tierra urbanizada.

Al recalcular el valor de la huella energética vinculada a geotermia en la producción de Biocombustibles -biodiesel y bioetanol- y la HE de FIA de la Universidad de

El Salvador asociada a tierras de cultivo se observó que los valores son mayores a los obtenidos como una primera aproximación pero siguen siendo menores a los valores de HE de referencia presentados por Alvarenga, et al (2015) y Fernández, et al (2015).

Es importante recalcar que los valores de productividades energéticas utilizados por Alvarenga, et al (2015) y Fernández, et al (2015) no fueron calculados con el fin de ser utilizados en la metodología de HE asociada al consumo energético además de no representar la relación entre la tecnología de generación de energía eléctrica a partir de geotermia utilizada en El Salvador y las condiciones geográficas que como se ha indicado anteriormente, estos son factores influyentes en los valores de productividades energéticas.

En el desarrollo de la siguiente sección se exponen las conclusiones y las recomendaciones de este trabajo de grado, realizados sobre la base de los objetivos que tiene el presente trabajo, tales como: Calcular Factores de productividad energética, caracterizar la tecnología utilizada en las plantas de generación, diseñar una metodología que permita cuantificar valores numéricos de factores de productividad, realizar un análisis comparativo de los factores de productividad energética en geotermia, realizar un análisis comparativo de Huella Ecológica, elaborar una propuesta de asignación de tipos de terreno como metodología para el cálculo de factores de productividad energética en geotermia.

CONCLUSIONES

Los factores de productividad energética para la Central de Ahuachapán numéricamente se encuentran en el intervalo de 3214.34 *GJ/ha.año* - 5033.41 *GJ/ha.año* correspondientes a tecnología de generación flasheo simple y doble en turbinas de condensación en cuyo proceso de generación se encuentran involucradas y contabilizadas las plataformas de perforación, planta de producción, líneas de acarreo, líneas de reinyección y asociados dichos factores a tierras bioproductivas de cultivo. De manera similar los factores de productividad energética para la Central de Berlín se encuentran en el intervalo de 4289.63 *GJ/ha.año*- 9297.38 *GJ/ha.año* generando con tecnología de planta híbrida con flasheo simple en turbinas de condensación y ciclo binario (ciclo ORC usando como fluido de trabajo isopentano) en cuyo proceso de generación se encuentran involucradas y contabilizadas las plataformas de perforación, plantas de producción, líneas de acarreo, líneas de reinyección y asociados dichos factores a tierras bioproductivas de cultivo. Finalmente los factores de productividad energética nacionales para El Salvador se encuentran en el intervalo de 3829.01 *GJ/ha.año*- 7756.62 *GJ/ha.año* generando con tecnología de las centrales de Ahuachapán y Berlín en cuyo proceso de generación se encuentran involucradas y contabilizadas las plataformas de perforación, plantas de producción, líneas de acarreo y reinyección y asociados dichos factores a tierras bioproductivas de cultivo, todos los factores calculados por año para el periodo 2000-2014.

Los factores de productividad energética nacionales calculados para geotermia en El Salvador se sitúan en valores numéricos comprendidos entre 3829.03 *GJ/ha.año* y 7701.46 *GJ/ha.año* dentro de un análisis que comprende el periodo 2000-2014 presentándose el valor menor y mayor en los años 2000 y 2013 respectivamente. Los factores anuales nacionales presentados son resultados de una suma ponderada de dos factores de productividad, uno corresponde a la Central Geotérmica de Ahuachapán, el otro a la Central Geotérmica de Berlín, de los cuales, los pertenecientes a Berlín influyen en ponderación mayor a los factores nacionales en valores que van del 50% al 66%, razón por la cual, el comportamiento de la curva de evolución temporal de factores nacionales se asemeja en mayor medida a la curva de evolución temporal de factores de Berlín. Sobre la base anterior, se infiere que el comportamiento de la evolución temporal

de los resultados sugiere que los factores de productividad podrían aumentar en los próximos años.

El factor de productividad energética que se recomiendan utilizar en el cálculo de la huella energética asociado a la energía geotérmica para estudios posteriores al año 2014 es el valor de 7701.46 GJ/ha.año que corresponde al factor nacional reportado para el mismo año ya que es el último valor más cercano a la tecnología utilizada y uso de la tierra más reciente en términos de la metodología de HE.

Los resultados obtenidos en el cálculo de factores de productividad energética para geotermia reproducen y refuerzan el postulado que sostiene Wackernagel y Rees, en donde afirma que <<los factores de energía no fósil proporcionan productividades más altas que la energía de combustible fósil>>, muestra de ello es que según este mismo autor las productividades energéticas de las energías generadas con combustibles no fósiles hidráulica (promedio), solar fotovoltaica y eólica presentan valores de 1000 GJ/ha.año, 1000 GJ/ha.año y 12500 GJ/ha.año respectivamente en contraste a los valores que presenta para energías de origen fósil que no superan los 100 GJ/ha.año y que no son muy diferentes en valor numérico a los presentados por Coto-Millán Doménech y Mateo (2008), en este sentido los factores de productividad energética para geotermia calculados en este trabajo se encuentran entre 3829.03 GJ/ha.año y 7756.62 GJ/ha.año por consecuencia son mucho más altos numéricamente que factores de productividad energética de energías generadas con combustibles de origen fósil.

La tecnología utilizada en el proceso de generación de electricidad implicó influencia directa en el valor calculado de los factores de productividad energética, para la Central de Berlín estos fueron más altos en valor numérico a los calculados a la Central de Ahuachapán, en la primera a partir del año 2007 que entra en operación la planta de ciclo binario, es evidente el aumento de energía eléctrica que pasó de ser de 464459.1 MWh a 726191.3 MWh superando en generación a la Central de Ahuachapán y mejorando apreciablemente el valor del factor de productividad energética a partir de ese año.

Según la evolución temporal de la capacidad instalada en las centrales vs. La evolución temporal de la producción bruta de estas, los resultados evidencian que para ambas la producción bruta casi equipara a la capacidad instalada a partir del año 2005, podría inferirse que hay oportunidad de aumentar la capacidad instalada de las centrales

y aumentar con ello la producción de electricidad; sin embargo, se debe tener en cuenta la sostenibilidad del recurso, por una parte, en términos financieros se debe estudiar la estructura oferta-demanda y aspectos técnicos de producción a manera de reducir los riesgos e incertidumbre de nuevos proyectos generando así que la actividad económica sea rentable en el tiempo, por otra parte se debe estudiar la capacidad regenerativa del recurso subterráneo y la disponibilidad de este capital natural ya que con el tiempo la presión del reservorio decae y pueden ocurrir problemas de enfriamiento del yacimiento, como sucedió en el sistema geotérmico de Ahuachapán, este, fue uno de los motivos, por los cuales se procedió a la reinyección total de las aguas residuales.

La cantidad de superficie bioproductiva involucrada en el proceso de producción de electricidad con geotermia fue mayor siempre en la central de Ahuachapán en comparación a la central de Berlín, esto confiere mayor aprovechamiento de la tierra en este último lo que abonó a elevar los factores de productividad en Berlín. En este mismo contexto en ambas centrales geotérmicas el factor de productividad energética se encuentra asociado a impacto de tierras de cultivo que son en su mayoría cultivo de café en las plataformas ubicadas a mayor altura y en las plantas de producción, de igual forma las plataformas y tuberías ubicadas a menor altitud se encuentran en tierras de cultivos de maíz, frijol y otros. Esto se dedujo de forma cualitativa ya que no se obtuvieron datos numéricos referidos al uso de tierras bioproductivas y las imágenes de satélite a las que se tuvo acceso no tienen la precisión necesaria para realizar un estudio con esos fines.

Los factores de productividad energética calculados en este trabajo de investigación son menores a los valores publicados por el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) *en el año 2006* en el cual, de los valores de productividad energética presentados para geotermia, uno equivale a 39 996 *GJ/ha.año* es aún mucho menor en comparación a los otros dos factores presentados (225, 000 *GJ/ha.año* y 211, 764.6 *GJ/ha.año*)—haciendo de lado la diferencia en el tipo de tecnología—; sin embargo, los factores nacionales calculados en este trabajo de graduación se encuentran entre 3829.03 *GJ/ha.año* y 7756.62 *GJ/ha.año* es importante mencionar que los factores publicados por MIT fueron calculados para otros fines no con el objetivo de ser utilizados en el cálculo de huella ecológica, metodológicamente es evidente en las superficies que toma en cuenta dicho factor, ya que no menciona si el factor está asociado a tierras de cultivo, bosques CO₂, mar productivo u otras, adicionalmente no toma en cuenta área de planta y tuberías de reinyección u otras que se encuentren involucradas en el proceso de

generación geotérmica sin importar la tecnología utilizada, en este sentido, la tecnología en cada central es diferente a la existente en las centrales geotérmicas tanto la de Ahuachapán como la de Berlín. Para el cálculo de los factores de productividad asociados a cada central geotérmica en Ahuachapán y Berlín se tomó como fundamento la metodología propuesta en el capítulo 5 de este trabajo.

La HE asociada a energía geotérmica vinculada a los inventarios de consumo presentados por Fernández et al. (2015) y Alvarenga et al.(2015), calculados para huellas de Biocombustibles (biodiesel y Bioetanol) y huella de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador (FIA) respectivamente, muestran resultados totalmente diferentes a los calculados en este trabajo, pues para biodiesel y bioetanol la huella energética presentada por Fernández et al.(2015) equivale a 0.37 gha y 23.91 gha y las calculadas en este trabajo cambiando el factor de productividad energética son 0.010 gha y 0.682 gha respectivamente representando una disminución de 37:1 y 35:1; por otra parte la huella energética calculada haciendo uso del factor de equivalencia relacionado a terreno de cultivo presentó valores de 0.058 gha y 3.719 gha respectivamente evidenciando una clara diferencia en la huella de biocombustibles la cual disminuye aproximadamente de 6 a 1 en ambos caso entre las huellas de referencia y calculadas, de forma análoga, el análisis comparativo de huella ecológica de la FIA, muestra discrepancia en los resultados presentados por Alvarenga et al.(2015) a los mostrados en este trabajo, pues las huellas calculadas presentan tendencias de cambio que van de 0.2:1 en la razón de huella de referencia-huella calculada y huella de referencia-huella asociada, y manteniéndose el valor de la huella calculada y la huella asociada ya que el valor del factor de equivalencia asociados a tierras urbanizada y tierras de cultivo numéricamente es igual. La razón de las discrepancias radica en el valor de productividad energética utilizado en los cálculos, pues, Fernández et al. (2015) y Alvarenga et al. (2015) usan valores de productividad energética que presenta MIT *en el año 2006*, y en las huellas recalculadas en este trabajo, se usan valores de productividad energética calculados en este documento y que son específicos para El Salvador y la tecnología utilizada en el proceso de generación de las centrales geotérmicas que existen en el país además del factor de equivalencia al que se encuentra asociada la productividad energética ya que los factores calculados en este trabajo son vinculados a tierras de cultivo.

RECOMENDACIONES

Es importante que la Universidad de El Salvador realice una campaña educativa a nivel Nacional con el objetivo de que se conozca sobre diversas herramientas de sostenibilidad ambiental, para que estas temáticas tengan una mayor apertura y puedan ser evaluadas, y aplicadas en conjunto con herramientas ambientales en el país como los estudios de impacto ambiental, para impulsar una mejora en la gestión ambiental de los recursos naturales.

Debido al crecimiento que tendrá la explotación de recursos geotérmicos en el país, realizar una investigación sobre el cálculo de la huella ecológica para la energía eléctrica proveniente de la geotermia aplicando el factor de productividad energética calculado en este trabajo de investigación, ampliando los estudios de sostenibilidad y que sirvan como una base para comparar este valor con el de biocapacidad y así poder establecer si hay o no un déficit ecológico.

Las superficies como zona de alteración hidrotermal que incluye lodos hirvientes, fumarolas, agua caliente y otras similares no están clasificadas como superficies bioproductivas en un tipo de tierra dentro de la metodología de huella ecológica, pero algunas de ellas pueden ser aprovechadas, por ejemplo, utilizar de manera directa el calor de ellas, resultando sistemas de cogeneración donde la energía térmica puede ser usada para operaciones como secado y otros usos directos. Por lo que se podría recomendar que en futuros estudios se puedan considerar este tipo de superficies.

Realizar un análisis de factores de planta, factores de capacidad y otros indicadores de funcionamiento de una planta para generar una base sobre la cual se construyan análisis técnicos donde se estudie si es posible mejorar estos indicadores con base a la sostenibilidad del recurso en términos ambientales, económicos y sociales.

Para calcular las superficies bioproductivas utilizar software de información geográfica para estimar con mayor exactitud la cantidad y el tipo de superficies implicados en el proceso de generación de electricidad, de ser posible, documentar con imágenes aéreas para tener un mejor panorama del campo geotérmico

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarenga T., Ayala, O., y Portillo, R. (2015). *Cálculo de la huella ecológica de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de El Salvador* (Trabajo de graduación de grado). Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador.
- Alvarez, P., Domenech J., y Perales, A. (2008). *Huella ecológica energética corporativa: un indicador de la sostenibilidad empresarial*. Huelva, España.
- Amaya, J. (2009) *Exploitation and development of the Ahuachapan geothermal field*. UNU-GTP and LaGeo, Santa Tecla, El Salvador.
- Arenívar, B., Martínez, G., y Rivera, L. (2013). *Evaluación fisicoquímica de arcillas naturales existentes en el campo geotérmico de Berlín, Usulután y elaboración del diagnóstico de su comportamiento reológico durante la perforación de pozos geotérmicos*. (Trabajo de graduación de grado), Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador.
- Bolívar, H. (2011). *Metodologías e indicadores de evaluación de sistemas agrícolas hacia el desarrollo sostenible*. Centro de Investigación de ciencias administrativas y gerenciales, Universidad central de Venezuela.
- Bonilla, J., Meléndez, O, Reyes, E., y Rivera, L. (2013). *Diseño conceptual de un ciclo binario para una planta geotérmica*. (Trabajo de graduación, Programa Regional de Entrenamiento Geotérmico), San Salvador, El Salvador.
- Centro de leyes y políticas ambientales, Universidad de Yale. (2008). *Environmental Performance Index*, recuperado de http://www.yale.edu/epi/files/2008EPI_Text.pdf
- Comisión Económica para América Latina y El Caribe CEPAL. (2003). *Sostenibilidad y desarrollo sostenible: un enfoque sistémico*. Recuperado de: <http://www.cepal.org/publicaciones/xml/6/14256/lcl1864p.pdf>

- Consejo Nacional de Energía CNE (2010). *Política Energética Nacional*. San Salvador, El Salvador.
- Consejo Nacional de Energía CNE (2012). *Resumen de Documento Plan Maestro para el Desarrollo de la Energía Renovable en El Salvador*. San Salvador, El Salvador.
- Consejo Nacional de Energía CNE (2014). *El camino del cambio de la matriz energética en El Salvador, 2014*. San Salvador.
- Consejo Nacional de Energía CNE. (2015). *Energía geotérmica*. Recuperado de: http://www.cne.gob.sv/index.php?option=com_content&view=article&id=115&Itemid=196
- Coto-Millán P., Doménech Quesada J., y Mateo Mantecón I. (2008). *Corporate Ecological Footprint: New Conversion Factors Corporate Ecological Footprint: New Conversion Factors*. Research Letters in Ecology, volumen 2008, Article ID 415934, 4 pages. doi:10.1155/2008/415934.
- Dickson H. M., y Fanelli M. (2003). *Geothermal Energy: utilization and technology*. Paris: UNESCO.
- Doménech Quesada, J. (2007). *Huella ecológica y desarrollo sostenible*. AENOR ediciones. España.
- Doménech Quesada, J. (2008). *Guía metodológica para el cálculo de la huella ecológica corporativa*. España.
- Duran, G. (2013). Medir la sostenibilidad. Recuperado de: <http://pendientedemigracion.ucm.es/info/ec/jec7/pdf/com1-6.pdf>

- Fernández, J., Magaña, M., y Pineda, K. (2015). *Evaluación de huella ecológica de la producción de bioetanol y biodiesel en El Salvador*. (Trabajo de graduación de grado), Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador.
- Galicia, D., y Sánchez, O., (2013). *Diseño y desarrollo de un modelo de absorbedor cáustico, para la mitigación de sulfuro de hidrógeno (H₂S) durante la descarga de un pozo geotérmico*. (Trabajo de graduación de grado), Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador.
- Hernández, C. (2012). *Aquifer Fluid compositions at the berlin geothermal field, El Salvador in 2012*. UNU-GTP and LaGeo, Santa Tecla, El Salvador.
- Hoekstra, A.Y. (2009). *Apropiación humana del capital natural: un análisis de comparación de la Huella Ecológica con la Huella Hídrica*. Centro Twente del agua, Universidad de Twente, Holanda.
- Instituto Tecnológico de Massachusetts MIT. *The Future of Geothermal Energy*, 2006, Massachusetts.
- Jacobo, P. (2003). *Gas chemistry of the Ahuachapán and berlin geothermal fields, El Salvador*. UNU-GTP, LaGeo, Santa Tecla, El Salvador.
- LaGeo. (2000a). *Diagnóstico Ambiental Central Geotérmica de Ahuachapán*. Centro de Información LaGeo, La Libertad, El Salvador.
- LaGeo. (2000b). *Diagnóstico Ambiental Central Geotérmica de Berlín*. Centro de Información LaGeo, La Libertad, El Salvador.
- LaGeo. (2015). *Centrales geotérmicas*. Recuperado el 18 de Agosto de 2015, de <http://www.lageo.com.sv/?cat=8&title=Centrales&lang=es>

- Lopez, I. (2012). *Sostenibilidad débil y fuerte y democracia deliberativa*. Recuperado de:
http://earchivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/16270/tesis_lopez_pardo_2012.pf?sequence=1
- Luffiego, M., Rabadán, J.M. (2000). La evolución del concepto de sostenibilidad y su introducción en la enseñanza. *Enseñanza de las ciencias*, 18 (3), 473-486
- Masera, O., Astier, M., y Galvan-Miyoshi, Y. (2008). *Evaluación de sustentabilidad. Un enfoque dinámico y multidimensional*. Ed. Mundiprensa. México.
- McKenzie, S. (2014). Social sustainability: Towards some definitions. Recuperado de:
<https://atn.edu.au/Documents/EASS/HRI/working-papers/wp27.pdf>.
- Ministerio del Medio Ambiente, Rural y Marino MARM. (2008). *Análisis de la Huella Ecológica de España*. Gobierno de España.
- Monterrosa, M., y Montalvo, F. (2006). *Geothermal Reservoir management in El Salvador case histories of Ahuachapán and Berlin*. UNU-GTP and LaGeo, Santa Tecla, El Salvador.
- Monterrosa, F., y Zepeda, N. (2009). *Sustainable Development Strategy for Geothermal Resources in El Salvador*. LaGeo, Santa Tecla, El Salvador.
- OEI. (2010). *La sostenibilidad o sustentabilidad como revolución cultural, tecnocientífica y política*. Recuperado de: <http://www.oei.es/decada/accion.php?accion=1>
- ONU. (1987). *Nuestro futuro común*. Nairobi: General.
- ONU. (2011). *El futuro que queremos*. Recuperado de <http://www.un.org/es/sustainablefuture/sustainability.shtml>

- Penela, A., (2008). *La huella ecológica corporativa: concepto y aplicación a dos empresas pesqueras de Galicia*. (Artículo Científico) Revista Galega de Economía, Universidad de Santiago de Compostela, España.
- Saemundsson, K., Axelsson, G., y Steingrímsson, B., (2009). *Geothermal systems in global perspective*. Proceedings of a Short Course on Surface Exploration for Geothermal Resources, organized by UNU-GTP and LaGeo, San Salvador, El Salvador
- Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones SIGET. (2015). *Boletín de Estadísticas Eléctricas N° 16*. San Salvador, El Salvador.
- Tarbut, E., y Lutgens, F., (2005). *Ciencias de la tierra: Una introducción a la geología física*. Octava edición, Pearson Educación S. A., Madrid
- Vásquez Cid, J. (2009). *La Huella Ecológica de la comunidad de la Universidad Veracruzana (UV), Campus Xalapa*. Trabajo de graduación inédito. Universidad Veracruzana. Veracruz.
- Wackernagel, M., y Rees, W. (2001). *Nuestra huella ecológica. Reduciendo el impacto humano sobre la tierra*. Primera edición en español. LOM Editores. Santiago de Chile.
- Wackernagel, M. (1998). *The Ecological Footprint of Santiago de Chile*. Volume 3, número 1. DOI: 10.1080/13549839808725541.
- Wackernagel M., y Monfreda C. (2004). *Ecological Footprints and Energy. Redefining Progress*, Oakland, California.

ANEXO 1

Tendencias del mercado eléctrico y potencial geotérmico nacional.

Tabla A1-1: Demanda de Energía Primaria a nivel mundial por tipo de combustible.

* Tasa Compuesta de Crecimiento Anual

	1980	2000	2007	2015	2030	2007-2030*
Carbón	1792	2292	3184	3828	4887	1.9%
Petróleo	3107	3655	4093	4234	5009	0.9%
Gas	1234	2085	2512	2801	3561	1.5%
Nuclear	186	676	709	810	956	1.3%
Hidro	148	225	265	317	402	1.8%
Biomasa y Desechos	749	1031	1176	1338	1604	1.4%
Otras renovables	12	55	74	160	370	7.2%
Total	7228	10019	12013	13488	16789	1.5%

Fuente: CNE, 2010, Política Nacional de Energía.

Tabla A1-2: Inventario de recursos geotérmicos de alta entalpía en El Salvador.

N°	Área	Ubicación geográfica	Temperatura promedio Reservoirio(°C)	Volumen promedio Reservoirio(km ³)	Energía eléctrica estimada(Potencial Geotérmico(MWe 25 años))
1	Ahuachapán	Ahuachapán	233±6	10±2	86±20
2	San Lorenzo	Ahuachapán	216±22	2±1	16±10
3	Chipilapa	Ahuachapán	231±4	10±2	85±18
4	Calupo	Sonsonate	207±25	2±1	15±9
5	Cotepeque	Santa Ana	216±6	9±3	70±26
6	San Vicente	San Vicente	228±10	14±6	117±56
7	Berlín	Usulután	316±6	10±4	119±50
8	Chinameca	San Miguel	210±6	10±4	76±30
9	Chambala	San Miguel	233±10	3±1	26±9
10	Chinlanguera	San Miguel	153±20	2±1	11±6
11	Olomega	San Miguel	163±13	2±1	11±7
12	Conchagua	La Unión	180±12	2±1	13±7
TOTALES					644±248
RANGO					396-892

Fuente: CNE, 2012, Resumen del Plan Maestro para el Desarrollo de la Energía Renovable en El Salvador.

Tabla A1-3: Inventario de recursos geotérmicos de moderada-baja entalpía en El Salvador.

N°	Área	Ubicación geográfica	Temperatura promedio Reservoirio(°C)	Volumen promedio Reservoirio(km ³)	Energía eléctrica estimada(Potencial Geotérmico(MWe 25 años))
1	Toles	Ahuachapán	126±6	3±1	13
2	Guija	Santa Ana	119±9	2±1	8
3	Los apoyos	Santa Ana	133±7	2±1	9
4	Aguascalientes	Chalatenango	123±7	2±1	9
5	El Paraíso	Chalatenango	133±7	2 ±1	9
6	Nombre de Jesús	Chalatenango	151±8	3 ±1	16
7	Tihuapa	La Libertad	128±11	2 ±1	9
8	El Salitral	La Paz	123±10	2 ±1	8
9	Obrajuelo	San Vicente	133±14	2 ±1	9
10	Carolina	San Miguel	141±11	3 ±1	15
11	Santa Rosa	La Unión	126±12	8 ±1	34
12	El Sauce	La Unión	118±12	2 ±1	8
TOTALES					147

Fuente: CNE, 2012, Resumen del Plan Maestro para el Desarrollo de la Energía Renovable en El Salvador.

Tabla A1-4: Porcentaje de Participación de recursos energéticos según capacidad instalada en El Salvador

Recurso	MW	Porcentaje de participación
Hidráulica	472.6	31
Geotérmica	204.4	13
Biomasa	104.5	7
Térmica	755.1	49
Total	1536.6	100

Fuente: CNE, 2014

Tabla A1-5: Participación en la matriz de generación de energía eléctrica en El Salvador

Recurso	GWh	Porcentaje de participación
Hidráulica	1785	30.7
Geotérmica	1443	24.8
Biomasa	229	3.9
Térmica	2355	40.5
Total	5812	100

Fuente: CNE, 2014

ANEXO 2

Factores de Conversión para energía eléctrica utilizados

Tabla A2-1: Factores de Conversión

Unidad	Equivale a:
1 KWh	0.036 GJ
1 MWh	3.6 GJ
1 GWh	3600 GJ
1 ha	0.0001 m ²
1 ha	0.01 km ²
1 año	8760 horas

Fuente: Elaboración Propia

Tabla A2-2: Factores de absorción de CO₂ según el tipo de terreno

Tipo de terreno	Factor de absorción (tCO₂/ha)
Absorción de CO₂	3.67
Cultivo	1.98
Pastos	0.84
Bosques	3.67
Superficie Construida	1.98
Mar productivo	0.24

Fuente: Domenech, 2007.

Tabla A2-3: Sinónimos de las superficies bioproductivas

Tipo de Superficie	Sinónimos
Absorción de CO₂	Absorción de carbono
Cultivo	Cultivo
Pastoreo	Pastos, Pastizales
Bosques	Forestal,
Tierra Urbanizada	Área urbanizada, Superficie construida
Mar productivo	Zonas pesqueras

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 3

Inventario de energía y superficie para cálculo de factores de productividad energética de geotermia

Cuadro A3-1: Inventario de Producción de Energía Geotérmica por Central en El Salvador (Unidades).

Inventario de Producción de Energía (Unidades)									
Año	Nombre de la Central Geotérmica			Nombre de la Central Geotérmica			Total Energía Geotérmica		
	Generación		Consumo Interno	Generación		Consumo Interno	Generación		Consumo Interno
	Bruta	Neta		Bruta	Neta		Bruta	Neta	

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro A3-2: Inventario de Superficie Bioproductiva (Unidades) por Central en El Salvador.

Inventario de Superficie Bioproductiva para Ahuachapán (Unidades)								
Año	Número de Plataformas	Área por Plataforma	Área de Plataformas	Líneas de Acarreo	Líneas de Reinyección	Planta (Tipo)	Otras	Total

Fuente: Elaboración Propia.

ANEXO 4

Inventario de energía para centrales de Ahuachapán y Berlín

Cuadro A4-1: Resumen Inventario de Producción de Energía Geotérmica por Central en El Salvador (MWh).

Inventario de Producción de Energía (MWh)									
Año	Ahuachapán			Berlín			Total Energía Geotérmica		
	Generación		Consumo Interno	Generación		Consumo Interno	Generación		Consumo Interno
	Bruta	Neta		Bruta	Neta		Bruta	Neta	
1975	72330.6	66968.8	5361.8				72330.6	66968.8	5361.8
1976	279800	260061.8	19738.2				279800	260061.8	19738.2
1977	400051	375125.7	24925.3				400051	375125.7	24925.3
1978	391025	361644.9	29380.1				391025	361644.9	29380.1
1979	392183	369528.3	22654.7				392183	369528.3	22654.7
1980	390502	365300	25202				390502	365300	25202
1981	612282	573441.7	38840.3				612282	573441.7	38840.3
1982	513393	474556.7	38836.3				513393	474556.7	38836.3
1983	522992	478984.3	44007.7				522992	478984.3	44007.7
1984	531642	488430	43212				531642	488430	43212
1985	421990	379644.2	42345.8				421990	379644.2	42345.8
1986	372750	333702	39048				372750	333702	39048
1987	434516	398488.1	36027.9				434516	398488.1	36027.9
1988	429962	397109.6	32852.4				429962	397109.6	32852.4
1989	440867	406564.7	34302.3				440867	406564.7	34302.3
1990	418703	384266.9	34436.1				418703	384266.9	34436.1
1991	424537.6	391628.8	32908.8				424537.6	391628.8	32908.8
1992	367729.5	336293.1	31436.4	23134.2	22954.2	180	390863.7	359247.3	31616.4
1993	362195.8	333181.6	29014.2	17445.8	17330.7	115.1	379641.6	350512.3	29129.3
1994	370787.9	337497.4	33290.5	35900.9	35621.1	279.8	406688.8	373118.5	33570.3

Continúa...

Inventario de Producción de Energía (MWh)									
Año	Ahuachapán			Berlín			Total Energía Geotérmica		
	Generación		Consumo Interno	Generación		Consumo Interno	Generación		Consumo Interno
	Bruta	Neta		Bruta	Neta		Bruta	Neta	
1995	386331.8	354194.8	32137	56349.2	55873.4	475.8	442681	410068.2	32612.8
1996	370180.8	339936.1	30244.7	60386.8	59898.4	488.4	430567.6	399834.5	30733.1
1997	420406.1	388152.4	32253.7	65838.3	65311.1	527.2	486244.4	453463.5	32780.9
1998	392780.6	360483.4	32297.2	58406.3	57909.7	496.6	451186.9	418393.1	32793.8
1999	433713.2	402069.3	31643.9	163939.2	155778.2	8161	597652.4	557847.5	39804.9
2000	380168.4	352063.2	28105.2	406058	386788.2	19269.8	786226.4	738851.4	47375
2001	523875	488477	35398	442516	418380	24136	966391	906857	59534
2002	515736.2	483329.2	32407	477382.8	453049.6	24333.2	993119	936378.8	56740.2
2003	540175	504222	35953	485908	461987	23921	1026083	966209	59874
2004	552683.7	514156.2	38527.5	458413.7	433928.2	24485.5	1011097.4	948084.4	63013
2005	598452.5	557463.6	40988.9	452055.1	427720.8	24334.3	1050507.6	985184.4	65323.2
2006	675980.3	629570.6	46409.7	464459.1	440009	24450.1	1140439.4	1069579.6	70859.8
2007	655467.8	607891.9	47575.9	726191.3	685145.8	41045.5	1381659.1	1293037.7	88621.4
2008	717554.2	668573.3	48980.9	801582.4	752367	49215.4	1519136.6	1420940.3	98196.3
2009	718353.9	665426	52927.9	805588.8	755434.4	50154.4	1523942.7	1420860.4	103082.3
2010	694062.1	649818.1	44244	831065.7	777639.8	53425.9	1525127.8	1427457.9	97669.9
2011	697149.8	645808.6	51341.2	837233.5	784164.5	53069	1534383.3	1429973.1	104410.2
2012	695027.8	639441.9	55585.9	840354.9	780981.5	59373.4	1535382.7	1420423.4	114959.3
2013	674290.3	618345.2	55945.1	885324.5	824034.8	61289.7	1559614.8	1442380	117234.8
2014	679724.8	622500	57224.8	877916.1	821361	56555.1	1557640.9	1443861	113779.9

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro A4-2: Resumen Inventario de Producción de Energía Geotérmica por Central en El Salvador (GJ).

Inventario de Producción de Energía (GJ)									
Año	Ahuachapán			Berlín			Total Energía Geotérmica		
	Generación		Consumo Interno	Generación		Consumo Interno	Generación		Consumo Interno
	Bruta	Neta		Bruta	Neta		Bruta	Neta	
1975	260390.16	241087.68	19302.48				260390.16	241087.68	19302.48
1976	1007280	936222.48	71057.52				1007280	936222.48	71057.52
1977	1440183.6	1350452.52	89731.08				1440183.6	1350452.52	89731.08
1978	1407690	1301921.64	105768.36				1407690	1301921.64	105768.36
1979	1411858.8	1330301.88	81556.92				1411858.8	1330301.88	81556.92
1980	1405807.2	1315080	90727.2				1405807.2	1315080	90727.2
1981	2204215.2	2064390.12	139825.08				2204215.2	2064390.12	139825.08
1982	1848214.8	1708404.12	139810.68				1848214.8	1708404.12	139810.68
1983	1882771.2	1724343.48	158427.72				1882771.2	1724343.48	158427.72
1984	1913911.2	1758348	155563.2				1913911.2	1758348	155563.2
1985	1519164	1366719.12	152444.88				1519164	1366719.12	152444.88
1986	1341900	1201327.2	140572.8				1341900	1201327.2	140572.8
1987	1564257.6	1434557.16	129700.44				1564257.6	1434557.16	129700.44
1988	1547863.2	1429594.56	118268.64				1547863.2	1429594.56	118268.64
1989	1587121.2	1463632.92	123488.28				1587121.2	1463632.92	123488.28
1990	1507330.8	1383360.84	123969.96				1507330.8	1383360.84	123969.96
1991	1528335.36	1409863.68	118471.68				1528335.36	1409863.68	118471.68
1992	1323826.2	1210655.16	113171.04	83283.12	82635.12	648	1407109.32	1293290.28	113819.04
1993	1303904.88	1199453.76	104451.12	62804.88	62390.52	414.36	1366709.76	1261844.28	104865.48
1994	1334836.44	1214990.64	119845.8	129243.24	128235.96	1007.28	1464079.68	1343226.6	120853.08
1995	1390794.48	1275101.28	115693.2	202857.12	201144.24	1712.88	1593651.6	1476245.52	117406.08
1996	1332650.88	1223769.96	108880.92	217392.48	215634.24	1758.24	1550043.36	1439404.2	110639.16

Continúa...

Inventario de Producción de Energía (GJ)									
Año	Ahuachapán			Berlín			Total Energía Geotérmica		
	Generación		Consumo Interno	Generación		Consumo Interno	Generación		Consumo Interno
	Bruta	Neta		Bruta	Neta		Bruta	Neta	
1997	1513461.96	1397348.64	116113.32	237017.88	235119.96	1897.92	1750479.84	1632468.6	118011.24
1998	1414010.16	1297740.24	116269.92	210262.68	208474.92	1787.76	1624272.84	1506215.16	118057.68
1999	1561367.52	1447449.48	113918.04	590181.12	560801.52	29379.6	2151548.64	2008251	143297.64
2000	1368606.24	1267427.52	101178.72	1461808.8	1392437.52	69371.28	2830415.04	2659865.04	170550
2001	1885950	1758517.2	127432.8	1593057.6	1506168	86889.6	3479007.6	3264685.2	214322.4
2002	1856650.32	1739985.12	116665.2	1718578.08	1630978.56	87599.52	3575228.4	3370963.68	204264.72
2003	1944630	1815199.2	129430.8	1749268.8	1663153.2	86115.6	3693898.8	3478352.4	215546.4
2004	1989661.32	1850962.32	138699	1650289.32	1562141.52	88147.8	3639950.64	3413103.84	226846.8
2005	2154429	2006868.96	147560.04	1627398.36	1539794.88	87603.48	3781827.36	3546663.84	235163.52
2006	2433529.08	2266454.16	167074.92	1672052.76	1584032.4	88020.36	4105581.84	3850486.56	255095.28
2007	2359684.08	2188410.84	171273.24	2614288.68	2466524.88	147763.8	4973972.76	4654935.72	319037.04
2008	2583195.12	2406863.88	176331.24	2885696.64	2708521.2	177175.44	5468891.76	5115385.08	353506.68
2009	2586074.04	2395533.6	190540.44	2900119.68	2719563.84	180555.84	5486193.72	5115097.44	371096.28
2010	2498623.56	2339345.16	159278.4	2991836.52	2799503.28	192333.24	5490460.08	5138848.44	351611.64
2011	2509739.28	2324910.96	184828.32	3014040.6	2822992.2	191048.4	5523779.88	5147903.16	375876.72
2012	2502100.08	2301990.84	200109.24	3025277.64	2811533.4	213744.24	5527377.72	5113524.24	413853.48
2013	2427445.08	2226042.72	201402.36	3187168.2	2966525.28	220642.92	5614613.28	5192568	422045.28
2014	2447009.28	2241000	206009.28	3160497.96	2956899.6	203598.36	5607507.24	5197899.6	409607.64

Fuente: Elaboración Propia.

ANEXO 5

Estimación de Superficie Bioproductiva para Plantas geotérmicas de Ahuachapán y Berlín.



Figura A5-1: Imagen Satelital tomada con google earth de planta a condensación de Ahuachapán.
Fuente: Elaboración Propia.

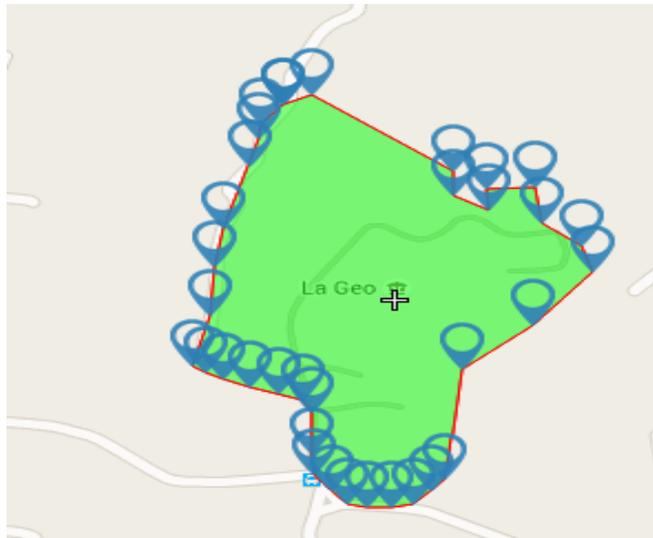


Figura A5-2: Imagen de área asumida en imagen satelital de planta a condensación de Ahuachapán.
Fuente: Elaboración Propia.

Area Output

137815.576 m²
0.138 km²
34.055 Acres
13.782 Hectares
1483434.520 Feet²

Total Area Output

137815.576 m²
0.138 km²
34.055 Acres
13.782 Hectares
1483434.52 Feet²

Perimeter Output

1679.072 m
1.679 km

Figura A5-3: Resultados de área de planta a condensación Ahuachapán.
Fuente: Elaboración Propia.



Figura A5-4: Imagen Satelital tomada con google earth de plantas geotérmicas de Berlín.
Fuente: Elaboración Propia.

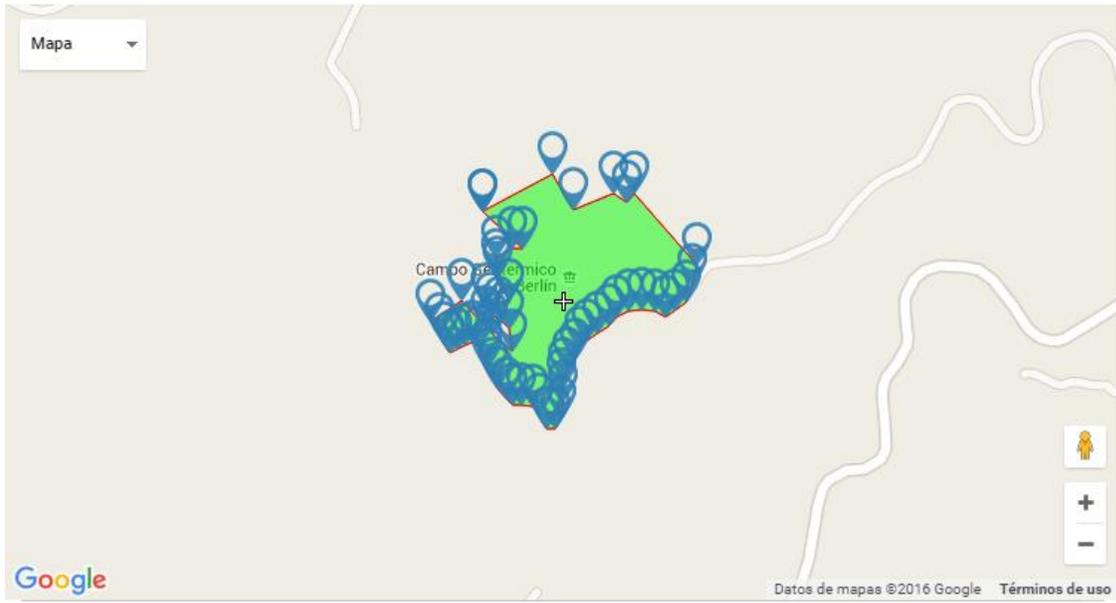


Figura A5-5: Imagen de área asumida en imagen satelital de planta a condensación de Berlín.
Fuente: Elaboración Propia.

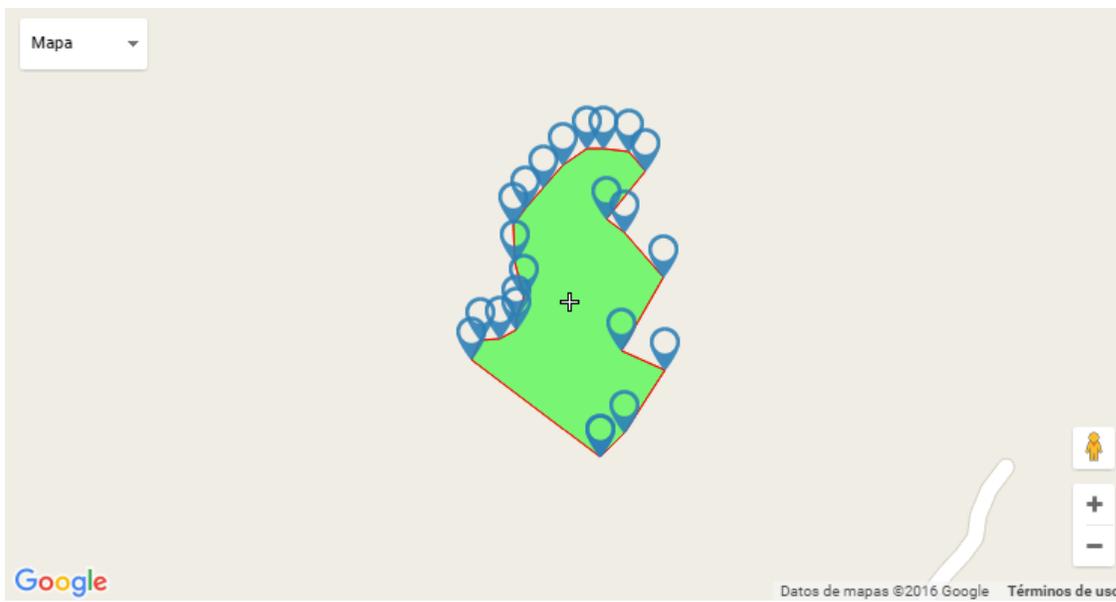


Figura A5-6: Imagen de área asumida en imagen satelital de planta de ciclo binario de Berlín.
Fuente: Elaboración Propia.

Area Output

74473.564 m²
0.074 km²
18.403 Acres
7.447 Hectares
801626.779 Feet²

Total Area Output

74473.564 m²
0.074 km²
18.403 Acres
7.447 Hectares
801626.779 Feet²

Perimeter Output

1634.931 m
1.635 km

Figura A5-7: Resultados de área de planta a condensación Berlín.
Fuente: Elaboración Propia.

Area Output

20261.479 m²
0.020 km²
5.007 Acres
2.026 Hectares
218092.751 Feet²

Total Area Output

20261.479 m²
0.02 km²
5.007 Acres
2.026 Hectares
218092.751 Feet²

Perimeter Output

688.665 m
0.689 km

Figura A5-8: Resultados de área de planta de ciclo binario Berlín.
Fuente: Elaboración Propia.

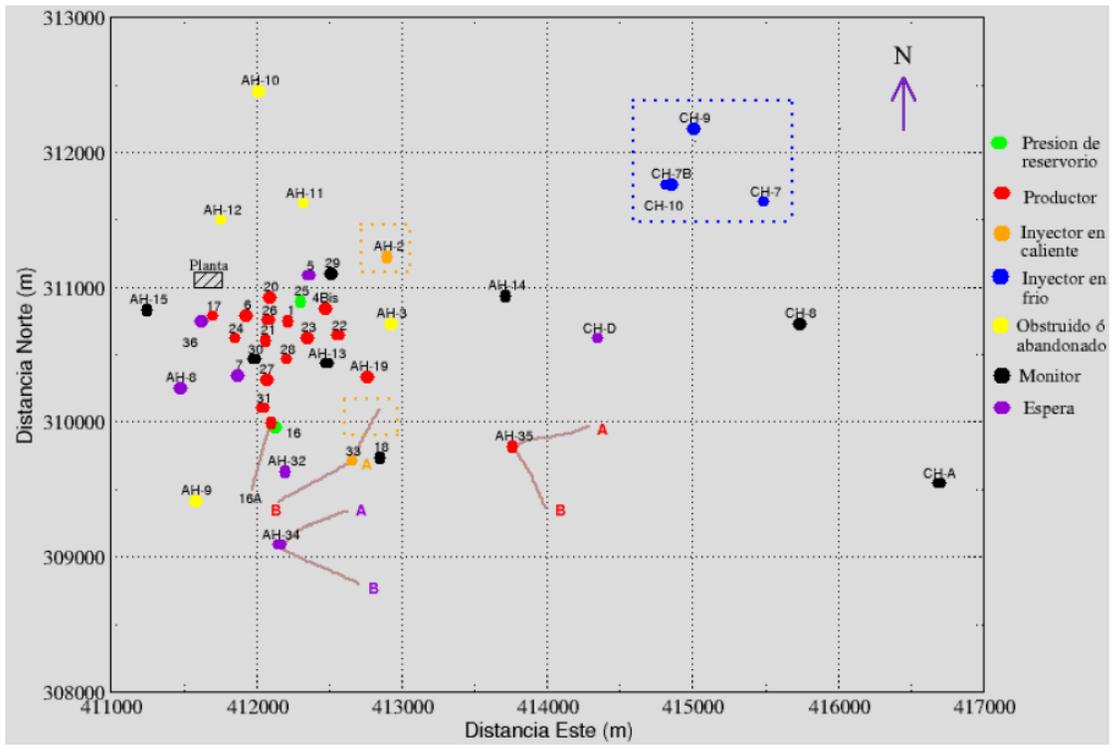


Figura A5-9: Mapa de área de producción y reinyección de campo geotérmico de Ahuachapán.
Fuente: Monterrosa y Montalvo 2006.

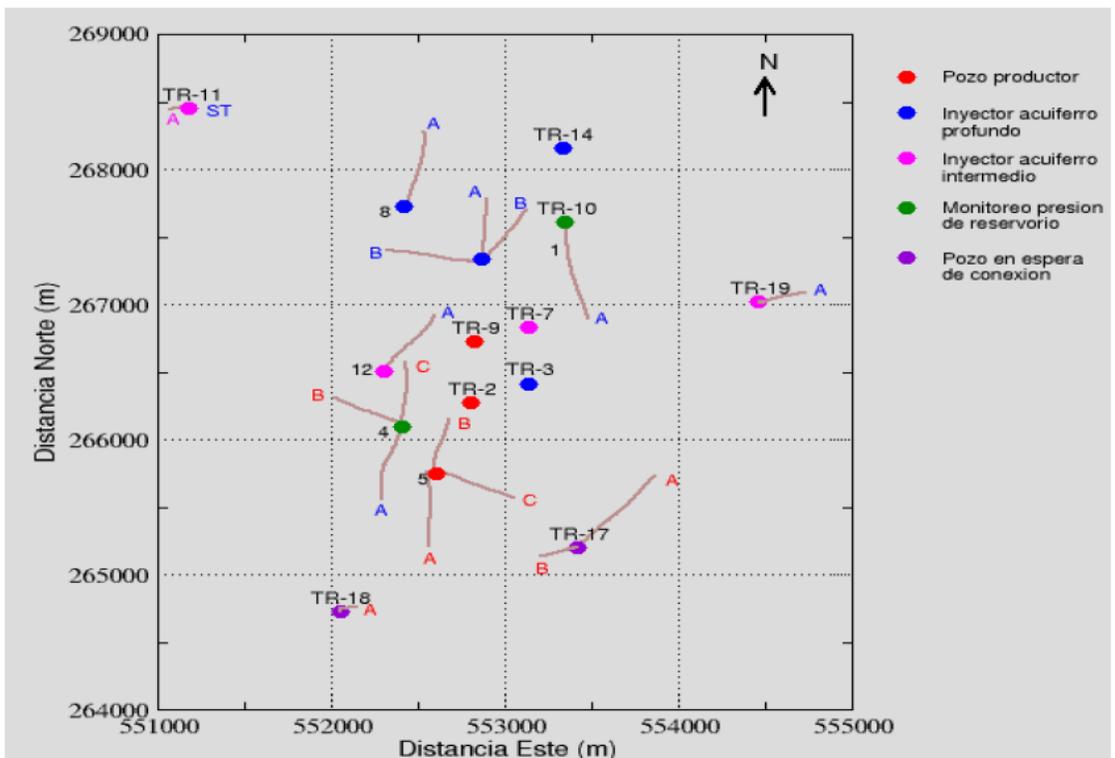


Figura A5-10: Mapa de área de producción y reinyección de campo geotérmico de Berlín.
Fuente: Monterrosa y Montalvo 2006.

ANEXO 6
Nomenclatura Utilizada

BD	Biodiesel
BE	Bioetanol
CNE	Consejo Nacional de Energía de El Salvador
FIA	Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador
GEI	Gases de efecto invernadero
GFN	Global Footprint Network
HE	Huella Ecológica
MARM	Ministerio del Medio Ambiente, Rural y Marino de España
MIT	Instituto Tecnológico de Massachusetts
OEI	Organización de Estados Iberoamericanos
ONU	Organización de las Naciones Unidas
SIGET	Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones
UT	Unidad de Transacciones