

**Programa Regional de Entrenamiento Geotérmico (PREG)**  
Diplomado de Especialización en Geotermia-2015

Universidad de El Salvador  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
Unidad de Postgrados

**LaGeo**



**Proyecto Final:**

**“Propuesta de una hoja de ruta para el fomento del desarrollo de proyectos Geotérmicos”**

**Presentado por:**

Henry Josué Zapata Lesmes,  
Unidad de Planeación Minero Energética, Colombia

**Tutor del Trabajo:**

Lic. Francisco Montalvo

30 de Octubre de 2015

## TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN .....</b>	<b>6</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>6</b>
<b>2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACION .....</b>	<b>7</b>
2.1 Metodologías y practicas recomendadas (Hoja de ruta) .....	7
2.2 Indicadores para la toma de decisión de proyectos geotérmicos .....	8
2.3 Aplicación para la estimación del potencial geotérmico en etapas iniciales .....	8
<b>3 OBJETIVOS .....</b>	<b>9</b>
<i>Objetivo general</i> .....	9
<i>Objetivos específicos</i> .....	9
<b>4 ALCANCES.....</b>	<b>9</b>
<b>5 MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>10</b>
<b>5.1 Breve introducción a la Energía Geotérmica.....</b>	<b>10</b>
5.1.1 Algunos antecedentes .....	10
5.1.2 Breve introducción a la Energía Geotérmica .....	12
5.1.3 Avances en capacidad y uso de la electricidad geotérmica en el ámbito mundial y en Latinoamérica.....	15
5.1.4 Avances en capacidad y uso de usos directos de la geotérmica en el ámbito mundial y en Latinoamérica.....	18
<b>5.2 La óptica ambiental .....</b>	<b>21</b>
<b>5.3 Evaluación del potencial.....</b>	<b>22</b>
5.3.1 Método Volumétrico .....	23
<b>5.4 Análisis económico .....</b>	<b>26</b>
5.4.1 Competitividad de las tecnologías de generación de electricidad .....	26
5.4.2 Aspectos del análisis económico en la metodología Olade.....	28
<b>6 METODOLOGÍA .....</b>	<b>30</b>
<b>6.1 Revisión de información y clasificación .....</b>	<b>30</b>
<b>7 ANÁLISIS DE METODOLOGIAS (Barreras) .....</b>	<b>31</b>
7.1 Barreras identificadas .....	31
7.2 Indicadores .....	35

<b>8</b>	<b>PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>36</b>
<b>8.1</b>	<b>Resumen de Barreras.....</b>	<b>36</b>
8.1.1	Conocimiento .....	36
8.1.2	Marco legal e institucional.....	37
8.1.3	Infraestructura.....	37
8.1.4	Financiamiento y cobertura de riesgos .....	37
<b>8.2</b>	<b>Hoja de ruta.....</b>	<b>38</b>
8.2.1	Consolidación de señales o indicadores de posibles beneficios .....	40
8.2.2	Consolidación del conocimiento de las condiciones locales .....	40
8.2.3	Gestión del Conocimiento geocientífico geotérmico y relacionado .....	40
8.2.4	Mejoramiento de condiciones de solidez y completos del marco institucional y legal	40
8.2.5	Condiciones para el desarrollo adecuado de la hoja de ruta.....	41
8.2.6	Lineamientos de política.....	50
<b>8.3</b>	<b>Calculo de potencial con el método de volumétrico mediante una aplicación básica de Crystal Ball.....</b>	<b>51</b>
8.3.1	Búsqueda de referentes de caso para Colombia .....	51
8.3.2	Determinación de parámetros para el modelo de para una aproximación al reservorio del Volcán Azufral .....	52
<b>9</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>59</b>
<b>10</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>60</b>
<b>11</b>	<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>61</b>
<b>12</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>62</b>
<b>13</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>64</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1, ALGUNOS HITOS EN EL CONOCIMIENTO DEL CALOR DE LA TIERRA .....	10
TABLA 2, CLASIFICACIÓN DE LOS RECURSOS GEOTÉRMICOS (°C).....	11
TABLA 3, ALGUNOS MÉTODOS UTILIZADOS PARA APROXIMAR EL POTENCIAL GEOTÉRMICO EN ETAPAS MUY TEMPRANAS.....	22
TABLA 4, CARACTERÍSTICAS DE LAS OPCIONES DE GENERACIÓN.....	26
TABLA 5, COSTO ANALIZADO DE CAPITAL Y DE OPERACIÓN US\$/kW VS EL FACTOR DE CAPACIDAD .....	27
TABLA 6, DATOS DE GENERACIÓN TOTAL Y POR FUENTE Y PRECIO MEDIO PROMEDIO MENSUAL PARA EL AÑO 2010, EL SALVADOR.....	44
TABLA 7, DATOS DE GENERACIÓN TOTAL Y POR FUENTE Y PRECIO MEDIO PROMEDIO MENSUAL PARA EL AÑO 2005, COLOMBIA .....	46
TABLA 8, DATOS DE GENERACIÓN PLANTA GEOTÉRMICA VIRTUAL (50MW) Y PRECIO VIRTUAL PROMEDIO MENSUAL ESTIMADO PARA EL SALVADOR, 2010.....	47
TABLA 9, DATOS DE GENERACIÓN PLANTA GEOTÉRMICA VIRTUAL (50MW) Y PRECIO VIRTUAL PROMEDIO MENSUAL ESTIMADO PARA COLOMBIA, 2005.....	49
TABLA 10, VARIABLES O PARÁMETRO RESPECTO DEL RESERVORIO.....	57
TABLA 11, PARÁMETROS DE LA PLANTA GEOTÉRMICA .....	57
TABLA 12, ALGUNAS VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA GEOTERMIA SEGÚN OLADE.....	66
TABLA 13, NOMENCLATURA DE SIGLAS DE CLASIFICACIÓN DE TEMAS GENERALES DE LA GEOTERMIA.....	74
TABLA 14, , NOMENCLATURA DE SIGLAS DE CLASIFICACIÓN DE TEMAS ESPECÍFICOS DE LA GEOTERMIA ....	74
TABLA 15, NOMENCLATURA DE SIGLAS DE ENTIDADES, QUE APOYAN DESARROLLOS EN LA GEOTERMIA ....	74
TABLA 16, EJEMPLO DE USO DE NOMENCLATURA DE SIGLAS PARA LA CLASIFICACIÓN DE LOS DOCUMENTOS CONSULTADOS DE LA GEOTERMIA .....	75

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA No. 1, ESTRUCTURA DE LA TIERRA.....	11
FIGURA No. 2, EL SISTEMA GEOTÉRMICO.....	13
FIGURA No. 4, CLASIFICACIÓN DE LOS RECURSOS GEOTÉRMICOS. ....	14
FIGURA No. 5, EVOLUCIÓN DE LA CAPACIDAD DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD A PARTIR DE LA GEOTERMIA, GLOBAL. ....	15
FIGURA No. 6, EVOLUCIÓN DE LA CAPACIDAD DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD A PARTIR DE LA GEOTERMIA EN LATINOAMÉRICA. ....	15
FIGURA No. 7, CAPACIDADES DE GENERACIÓN GEOTÉRMICA EXISTENTES Y EN DESARROLLO PARA REGIONES EN DESARROLLO .....	16
FIGURA No. 8, CAPACIDADES DE GENERACIÓN GEOTÉRMICA EN CENTROAMÉRICA.....	17
FIGURA No. 9, EVOLUCIÓN DE LA CAPACIDAD INSTALADA Y LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA GEOTÉRMICA GLOBAL .....	18
FIGURA No. 10, 10 PAÍSES LIDERES EN CAPACIDAD DE APLICACIONES DE USOS DIRECTOS EN EL ÁMBITO GLOBAL .....	19
FIGURA No. 11, 10 PAÍSES LIDERES EN CONSUMO DE APLICACIONES DE USOS DIRECTOS EN EL ÁMBITO GLOBAL .....	19
FIGURA No. 12, EN ESCALA LOGARÍTMICA LAS CAPACIDADES DE GENERACIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA DE LATINOAMÉRICA.....	20

<i>FIGURA No. 13, EN ESCALA LOGARÍTMICA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA ANUAL PARA USOS DIRECTOS DE LATINOAMÉRICA .....</i>	<i>20</i>
<i>FIGURA No. 14, REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LOS USOS MÚLTIPLES DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA</i>	<i>21</i>
<i>FIGURA No. 15, UTILIZACIÓN DE GEOTERMÓMETROS PARA ESTIMAR LA TEMPERATURA DEL RESERVORIO</i>	<i>24</i>
<i>FIGURA No. 16, COSTO ANALIZADO DE CAPITAL Y DE OPERACIÓN US\$/KW VS EL FACTOR DE CAPACIDAD</i>	<i>27</i>
<i>FIGURA No. 17, COSTO NIVELADO DE GENERACIÓN VS TEMPERATURA Y FLUJO “KH” (MD-FT) DEL RESERVORIO.....</i>	<i>28</i>
<i>FIGURA No. 18, BARRERAS PRINCIPALES PARA EL DESARROLLO DE LA GEOTERMIA.....</i>	<i>36</i>
<i>FIGURA No. 19, HOJA DE RUTA Y CONDICIONES .....</i>	<i>39</i>
<i>FIGURA No. 20, CASO DE COMPARACIÓN DE LA GENERACIÓN Y PRECIO HISTÓRICO REAL VS LA SITUACIÓN HIPOTÉTICA VIRTUAL DE 50MW GEOTÉRMICOS, EL SALVADOR, AÑO 2010.....</i>	<i>47</i>
<i>FIGURA No. 21, AHORRO HIPOTÉTICO DE LA DEMANDA. CASO DE COMPARACIÓN DE LA GENERACIÓN Y PRECIO HISTÓRICO REAL VS LA SITUACIÓN HIPOTÉTICA VIRTUAL DE 50MW GEOTÉRMICOS, EL SALVADOR, AÑO 2010. ....</i>	<i>48</i>
<i>FIGURA No. 22, CASO DE COMPARACIÓN DE LA GENERACIÓN Y PRECIO HISTÓRICO REAL VS LA SITUACIÓN HIPOTÉTICA VIRTUAL DE 50MW GEOTÉRMICOS, COLOMBIA, AÑO 2005. ....</i>	<i>49</i>
<i>FIGURA No. 23, CASO DE COMPARACIÓN DE LA GENERACIÓN Y PRECIO HISTÓRICO REAL VS LA SITUACIÓN HIPOTÉTICA VIRTUAL DE 50MW GEOTÉRMICOS, COLOMBIA, AÑO 2005. ....</i>	<i>50</i>
<i>FIGURA No. 24, UBICACIÓN DEL VOLCÁN AZUFRAL, ALFARO ET AL 2015.....</i>	<i>51</i>
<i>FIGURA No. 25, VISTA DE LA ZONA DEL VOLCÁN AZUFRAL. WWW.SGC.GOV.CO.....</i>	<i>52</i>
<i>FIGURA No. 26, MODELO CONCEPTUAL DEL SISTEMA GEOTÉRMICO DEL VOLCÁN AZUFRAL, ALFARO ET AL 2015.....</i>	<i>53</i>
<i>FIGURA No. 27, FALLAS Y ALTERACIONES HIDROTERMALES EN LA CERCANÍA DEL VOLCÁN AZUFRAL (FUENTE: ALFARO ET AL., 2015) .....</i>	<i>53</i>
<i>FIGURA No. 28, ÁREA DEL RESERVORIO CON BASE EN GRAVIMETRÍA Y MAGNETOMETRÍA. FUENTE ALFARO ET AL. (MODIFICADO PARA ESTIMAR LOCALIZACIÓN Y TAMAÑO DEL RESERVORIO). ....</i>	<i>54</i>
<i>FIGURA No. 29, PERFIL GEOELÉCTRICO PARALELO A GUACHUCAL, UBICADA CERCA DE 10 KM AL SURESTE DEL VOLCÁN AZUFRAL. ....</i>	<i>55</i>
<i>FIGURA No. 30, MAPA DE LOS SONDEOS GEOELÉCTRICOS, (VER CORTE NE5).....</i>	<i>55</i>
<i>FIGURA No. 31, RESULTADO CRYSTAL BALL DE PROBABILIDAD Y FRECUENCIA DE CAPACIDADES DE POTENCIA DEL CASO BASE. ....</i>	<i>58</i>

## RESUMEN

Se revisa globalmente las fases de implementación de proyectos geotérmicos establecidas en metodologías, guías o buenas practicas reconocidas (-OLADE, ESMAP, JICA/WEST JEC, ISAGEN-BID, KWF, Agencia Internacional de Geotermia e IRENA) y se resume las barreras planteadas. Lo anterior fue un insumo para formular una propuesta de hoja de ruta o acciones, aplicable a la etapa inicial como una visión corta pero complementaria de la ejecución de las fases de un proyecto, la cual ayuda a identificar o reducir las incertidumbres y riesgos (los cuales representan costos enormes) en zonas con potencial geotérmico *Figura No. 2*. Se establece un listado de indicadores para medir las condiciones generales del entorno del proyecto, aplicable antes o durante la primer etapa de recolección de información. Se realiza un ejemplo básico de un indicador de beneficio económico de la generación geotérmica, como insumo para soportar acciones del Estado para apoyar mas decididamente la generación con este recurso renovable. Finalmente, se aplica el método volumétrico utilizando el método de MonteCarlo con el software Crystal Ball, como una practica geocientífica básica del conocimiento impartido durante el diplomado, para establecer un potencial geotérmico preliminar de 89,5 MWe en al caso del Volcán Azufral en Colombia.

## 1 INTRODUCCIÓN

Este aparte del documento ilustrar de manera global sobre la visión y el contenido del documento El trabajo realizado revisa de forma global las fases de metodologías, guías o buenas practicas (elaboradas por fuentes reconocidas) para el desarrollo de proyectos geotérmicos de generación de electricidad y resumir las barreras encontradas. Las barreras y fases metodológicas se toman como insumo para establecer una propuesta de hoja de ruta o acciones aplicable a la etapa inicial de un proyecto, con la finalidad de aportar una visión corta pero complementaria de temas que subyacen en la practica de la ejecución de un proyecto, y que seguramente pueden desde etapas tempranas aportar a reducir las incertidumbres y riesgos (los cuales representan costos enormes de capital y esfuerzos) en la implementación de un proyecto geotérmico.

Se logra un listado de indicadores (que complementa la hoja de ruta) para medir o tener una visión de las condiciones generales del entorno del proyecto, desde la primer etapa de recolección de información. Se realiza un ejemplo básico de un indicador de beneficio económico de la generación con geotermia, el cual seria un insumo para soportar acciones del Estado para apoyar mas decididamente la generación con este recurso renovable.

Considerando la importancia para la toma de decisiones de la estimación inicial del potencial geotérmico, también se realiza una aplicación del método volumétrico utilizando el método de MonteCarlo con el software Crystal Ball como una practica geocientífica básica del conocimiento impartido durante el diplomado, para lo cual fue necesario realizar una búsqueda bibliográfica que llevó establecer un caso concreto, con estudios recientes publicados por funcionarios del Servicio Geológico Colombiano.

Todo lo anterior, puede aportar elementos claves para una base o referente para establecer la formulación de un Plan Maestro para el desarrollo de la geotermia. Se buscó aportar pautas generales que ayuden en la tarea de la construcción del plan, y consecuentemente, en la manera en la cual el Estado puede propiciar mejores condiciones para valorar la geotermia a partir de la hoja de ruta.

*Respecto del segundo objetivo de esta introducción.* Este apartado se realiza una aproximación muy básica a la geotermia, menciona de los usos actuales las capacidades instaladas en el mundo, a partir de información del Congreso Internacional de Geotermia 2015, realizado en Australia.

## 2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACION

El reto del presente trabajo es facilitar una propuesta de *Hoja de Ruta*, que oriente desde tempranas fases del proyecto geotérmico y ayude a reducir los riesgos y a facilitar su desarrollo. Dado que uno de los elementos de mayor incertidumbre en las primeras fases de reconocimiento es la estimación del potencial, de manera complementaria se realiza una aplicación geocientífica de estimación del potencial geotérmico, mediante un caso de Colombia (donde no se ha calculado antes), aplicado del método volumétrico. Por otra parte ante la falta de promoción de la energía geotérmica en muchos países de Suramérica, se realizan indicadores de la hoja de ruta, y particularmente se muestra un posible indicador y se cuantifica el beneficio a la demanda de incluir una hipotética planta pequeña de geotermia. Lo anterior demostraría que se ha cumplido un reto pertinente del Programa Regional de Entrenamiento Geotérmico (PREG) y del diplomado en cuanto a “*Brindar una Capacitación Sostenible en Geotermia, de calidad con una curricular actualizada, la cual generará y fortalecerá capacidades en geotermia en la región de América Latina y el Caribe*” y resulta completamente concordante con el objetivo de las diversas entidades que apoyan el programa en cuanto a favorecer el desarrollo del uso de la geotermia en Latinoamérica.

### 2.1 Metodologías y practicas recomendadas (Hoja de ruta)

Para lograr el desarrollo de óptimo de un proyecto geotérmicos existe una gran diversidad la necesidades como: información sobre experiencias y metodologías particulares, estándares, bases de datos publicas y privadas, conocimiento de normativas, tramites, reglamentaciones, acompañamiento social desde las primeras etapas, planes de desarrollo nacionales, regionales y locales, campañas de educación, apoyo o ayudas para implementar proyectos (electricidad y usos directos), guías de ayuda para soportar estudios de mercado, entre otros. A partir de los aspectos planteados se busca de manera generalizada proponer una propuesta de **hoja de ruta** la cual sin entrar en el detalle , facilite un mapa genérico para el desarrollo de proyectos geotérmicos.

La hoja de ruta se busca que sea útil en facilitar al Estado lineamientos para generar condiciones y espacios para la superación de barreras técnicas y no técnicas, así como a reducir riesgos en aspectos técnicos, administrativos, legales, regulatorios, financieros y políticos. Adicionalmente, puede aportar elementos claves para la formulación de un Plan Maestro Nacional para el desarrollo de la geotermia, así como para soportar que desde el

Estado que se propicie mejores condiciones para valorar los beneficios y adoptar la geotermia en la diversificación de la canasta energética.

La aproximación busca mediante la revisión bibliográfica de algunas de las principales metodologías y guías prácticas establecer referentes de la temática, integrar de forma general las barreras de las diversas experiencias o casos y tomar los criterios y aspectos aplicables al caso general de una propuesta de hoja ruta.

La propuesta de hoja de ruta considerará los aportes de diversos enfoques del proyecto geotérmico (OLADE 1993-1994, ESMAP 2012, ISAGEN – BID 2012, WEST JEC 2015, IGA, KfW), en algunos asocian riesgos y barreras tanto técnicas, como no técnicas en los países para el logro de un desarrollo geotérmico.

## **2.2 Indicadores para la toma de decisión de proyectos geotérmicos**

Muchas veces los tomadores de decisión se quedan cortos para decidir sobre acciones para el desarrollo de la energía geotérmica en un país, por carencia de referentes y conocimiento respecto de los aportes y beneficios de la geotermia, en este trabajo se busca establecer una propuesta de listado indicadores que ayuden a la toma de decisiones y acciones para el desarrollo de proyectos geotérmicos, buscado establecer o plantear de manera muy básica un indicador de beneficio que pueda ayudar a suplir esta deficiencia.

Aportar a difundir de forma sencilla lineamientos o prácticas recomendadas y las más actuales experiencias exitosas, puede aportar en los países en desarrollo a remover barreras al conocimiento y riesgos a las inversiones, por marcos regulatorios de mercado y ambientales no adecuados, así mismo como a facilitar actuaciones de respaldo o la participación directa del Estado en función de los beneficios del recurso geotérmico, considerando aspectos clave como la independencia y la seguridad energética, el empleo y demás aportes asociados al aprovechamiento del potencial del recurso geotérmico.

## **2.3 Aplicación para la estimación del potencial geotérmico en etapas iniciales**

Aplicación de un método básico para evaluar el potencial geotérmico en etapas preliminares a un caso en Colombia, país donde a nivel del Estado no existen aplicaciones de estudios o para estimar el potencial geotérmico de una zona determinada, en particular en la evaluación del potencial del Volcán Azufral, al sur del país. Con el presente trabajo se busca realizar un primer ejercicio encaminado a establecer el potencial asociado al este del volcán, como una primer aproximación, desarrollada como un ejercicio académico. Con lo cual se da alcance a la aplicación del conocimiento científico impartido en el Diplomado de Geotermia 2015, realizando una aplicación metodológica del análisis volumétrico con el método de Montecarlo.

### **3 OBJETIVOS**

#### **Objetivo general**

Elaborar una propuesta de hoja de ruta e indicador para fomento del desarrollo de proyectos Geotérmicos.

#### **Objetivos específicos**

- Revisar las barreras para el desarrollo geotérmico
- Establecer una aproximación a una hoja de ruta con un indicador que muestre al gobierno la oportunidad de aportar a la solución de las barreras y riesgos para el desarrollo de proyectos geotérmicos.
- Elaborar una aproximación al potencial geotérmico aplicando el método volumétrico, a un estudio de caso en Colombia.

### **4 ALCANCES**

- Elaborar un resumen de las barreras (conocimiento geocientífico, legislación y normatividad, financiamiento) en el contexto mundial para el desarrollo de proyectos geotérmicos.
- Establecer las principales barreras y riesgos asociados al desarrollo geotérmico.
- Formular recomendaciones de lineamientos de política y reglamentación que ayuden a la remoción de las barreras y riesgos identificados.
- Realizar una estimación gruesa del potencial geotérmico, a partir de información pública disponible.
- Establecer una aproximación a una hoja de ruta con un indicador que soporte el fomento acciones para el desarrollo de proyectos geotérmicos.

## 5 MARCO TEÓRICO<sup>1</sup>

### 5.1 Breve introducción a la Energía Geotérmica

#### 5.1.1 Algunos antecedentes<sup>2</sup>

Geotermia es una palabra de origen griego, deriva de “geos” que quiere decir tierra, y de “thermos” que significa calor: el calor de la Tierra. Se emplea indistintamente para designar tanto a la ciencia que estudia los fenómenos térmicos internos del planeta como al conjunto de procesos industriales que intentan explotar ese calor para producir energía eléctrica y/o calor útil al ser humano.

El hombre desde las culturas antiguas, ha observado que en la superficie de la tierra existen fenómenos (vulcanismo, anomalías térmicas o hidrotermales) y los ha asociado al fuego o energía del interior de la tierra. Con los avances de las civilizaciones y nuevas necesidades se han logrado los avances en el conocimiento del calor de la tierra.

**Tabla 1, algunos hitos en el conocimiento del calor de la tierra**

Primeras civilizaciones	Noción del calor (volcanes, anomalías térmicas) proveniente del fuego interior de la tierra.
1740	El gradiente térmico natural, la temperatura aumenta con la profundidad. (Bullard, 1965)
1870	Modernos métodos científicos para estudiar el régimen termal de la Tierra
siglo XX	Descubrimiento del calor radiogénico, que podemos comprender plenamente tal fenómeno como un balance térmico y la historia térmica de la Tierra.

Fuente: Elaboración propia a partir del documento de la nota a pie No. 1

La Tabla 1 muestra algunos hitos iniciales del conocimiento humano sobre la procedencia del calor de la tierra, a partir de ellos desde el siglo XX se han dado los mayores avances, mas el 90 % de los modelos geotermiales, involucran el calor generado por el decaimiento de los isótopos radioactivos de larga vida: Uranio (U238, U235), Torio (Th 232) y potasio (K40), presentes en la Tierra (Lubimova, 1968), solamente hasta los años 80 se establecen modelos mas realistas sobre el no equilibrio térmico de la tierra planteando que esta se esta enfriando al disipar el calor al espacio exterior.

Sin embargo las alteraciones climáticas en las recientes décadas generan controversias no sobre el calor interno de la tierra sino sobre el de la atmosfera y la superficie donde claramente en las ciudades se ha medido alteraciones o incrementos del gradiente térmico natural, asociado consumo principalmente de combustibles fósiles generadores

<sup>1</sup> Extractado del documento “Que es la Energía Geotérmica?”, Dickson et al, 2004. Se han realizado algunos ajustes.

<sup>2</sup> Se toman en consideración textos la publicación ¿Qué es la Energía Geotérmica? (Dickson y et al, 2007, Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR, Pisa, Italia).

de gases de efecto invernadero.



- Corteza ..... 30°C/km
- Manto ..... >1000°C
- Núcleo externo ..... >3000°C
- Corteza Núcleo interno .. >5000°C

Figura No. 1, Estructura de la tierra<sup>3</sup>

Globalmente Stacey y López (1988), establecen un flujo calórico total de la Tierra en 42.1012 W (por los mecanismos de conducción, convección y radiación). El cual es diferenciado de acuerdo a su origen como: i. en la corteza terrestre es  $8 \times 10^{12}$  W (2% del volumen de la Tierra) con gran contenido de isotopos radioactivos, ii. en el manto  $32.3 \times 10^{12}$  W (82% del volumen de la tierra) e iii. en el núcleo  $1,7 \times 10^{12}$  W (16% del volumen de la tierra) el cual no contiene isótopos radioactivos.

La tierra está compuesta por capas como lo muestra la *Figura No. 1*: i. *el núcleo interno*, solido compuesto por metales pesados, cubierto por ii. *el núcleo externo* que es semisólido, que posee elementos menos densos, iii. *el manto* principalmente sílice fluida sobre el núcleo externo e iv. *La corteza* mas liviana de todas las capas y tiene un gradiente térmico promedio de 30 °C/km, sin embargo el recurso geotérmico de mayor energía se relaciona con lugares en al

corteza terrestre donde el gradiente es mucho mayor. Las corrientes eléctricas generadas por la rotación del núcleo y la circulación de la roca fundida en el manto son responsables de la existencia del campo magnético terrestre.

En las zonas con recursos geotérmicos, aguas procedentes del subsuelo como una manifestación del recurso, este es clasificado de acuerdo a la temperatura del reservorio o yacimiento como de alta, media o baja entalpia como lo muestra Tabla 2:

**Tabla 2, Clasificación de los recursos geotérmicos (°C)**

Recursos	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Baja entalpía	< 90	<125	<100	<120	≤150	≤190
Intermedia entalpía	90-150	125-225	100-200	120-200	-	-
Alta entalpía	>150	>225	>200	>200	>150	>190

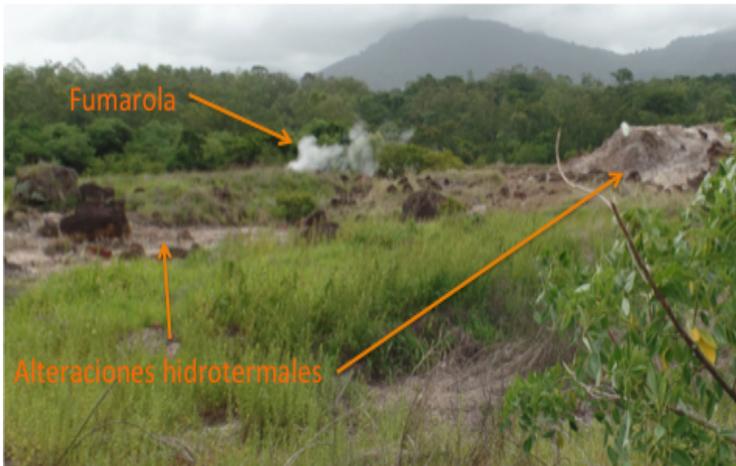
Referencia: (a) Muffler and Cataldi (1978), (b) Hochstein (1990), (c) Benderitter and Cormy (1990), (d) OLADE (1994), (e) Nicholson (1993) y (f) Axelsson and Gunnlaugsson (2000). A la tabla original de Dickson et al, 2007, se ha agregado el ítem (d) de Olade.

<sup>3</sup> La figura y la base para su explicación fueron tomados de Notas para la investigación y desarrollo de proyectos geotérmicos en Colombia, ISAGEN-BID, 2012.

Igualmente a manera sucinta general, en el apartado de marco teórico “introducción a la geotermia”, complementa lo expuesta ya que incluye , entre otras temáticas, el significado y funcionamiento de un sistema geotérmico y su aprovechamiento con una planta de generación de electricidad, capacidades instaladas globalmente y en Latinoamérica, tanto en generación de electricidad como en usos directos.

### 5.1.2 Breve introducción a la Energía Geotérmica

La *Fotografía 1*<sup>4</sup> y la *Figura No. 2*, ilustra una situación típica en inmediaciones de recursos geotérmicos (lugares con magma a profundidades cercanas -3 a 10km-), en la superficie del valle entre dos montañas existe manifestaciones de anomalías térmicas<sup>5</sup> en la superficie: i. **alteraciones hidrotermales**; lugares donde el color de las rocas cambia respecto de lo normal, debido a acumulación o deposito de minerales precipitados debido al cambio de temperatura y presión del flujo de agua caliente al llegar a superficie e, ii. **fumarolas**: emanaciones de vapor y gases del suelo, por afloramiento de fluidos calientes procedentes de zonas profundas.



*Fotografía 1, Alteraciones hidrotermales y fumarolas*

Al realizar un vistazo al corte transversal de la *Figura No. 2* se puede establecer un modelo físico básico que lo explica, una serie *conductos* entre las de capas del subsuelo; fallas o fracturas o las capas de roca porosa permeable, permiten que el agua lluvia se infiltre llegue a las capas profundas impermeables en contacto o cercanía a una fuente de calor (intrusión magmática) donde el agua es calentada a alta temperatura y presión

perdiendo densidad y ascendiendo mediante el tipo de conductos mencionados a la superficie, explicando la escena de fumarolas o fuentes termales en la superficie de la *Fotografía 1* y la *Figura No. 2*.

Un sistema geotérmico esta comprendido por una área de recarga de agua lluvia que desciende en el subsuelo incrementando su energía interna (propiedad termodinámica llamada entalpia) mediante la transferencia de calor desde la energía térmica del interior de la tierra.

<sup>4</sup> Fuente: Auzol El Playón, Salida de Campo a Ahuachapán, “Diplomado de Geotermia 2015”

<sup>5</sup> Una anomalía térmica, significa la existencias de lugares donde la temperatura es muy superior (~2 veces) a la temperatura normal del suelo, el agua o el aire.

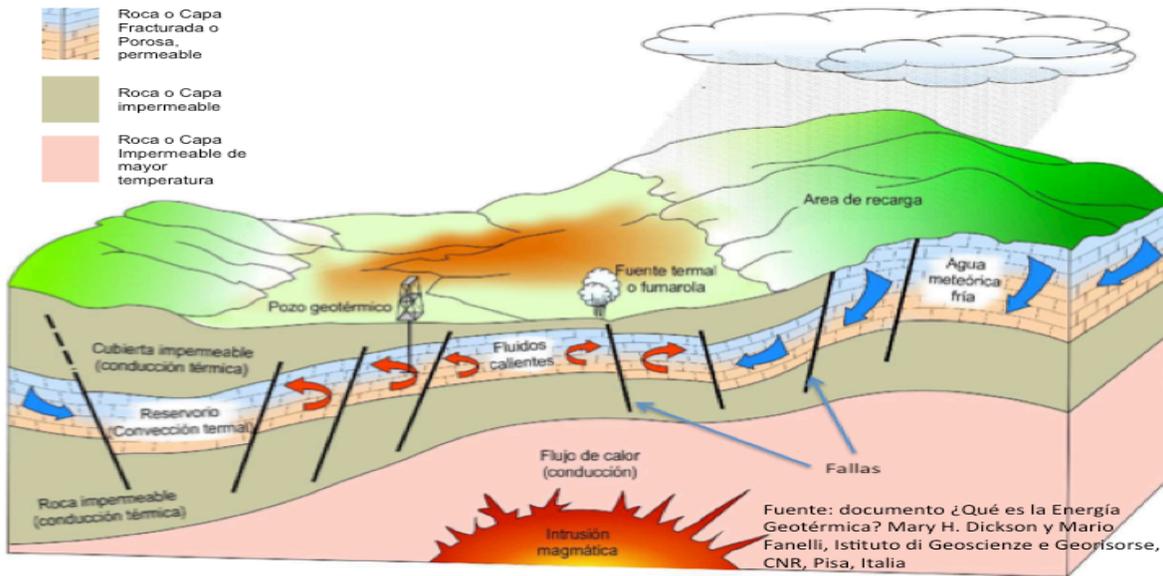


Figura No. 2, El sistema geotérmico

El agua una vez alcanza una alta temperatura en la profundidad en inmediaciones o zonas cercanas al magma, puede ascender mediante pozos geotérmicos abiertos con esta finalidad, de esta manera el agua transporta la energía del interior de la tierra a la superficie, para transformarla a partir del vapor de agua altamente energético (con alta entalpía o temperatura y presión), energía térmica, en energía mecánica de rotación de la turbina de vapor, la cual a su vez la transmite al generador para convertirla en electricidad transportada por líneas eléctricas a los lugares de consumo, para la atención de una demanda determinada (por ejemplo ciudades, o fabricas).

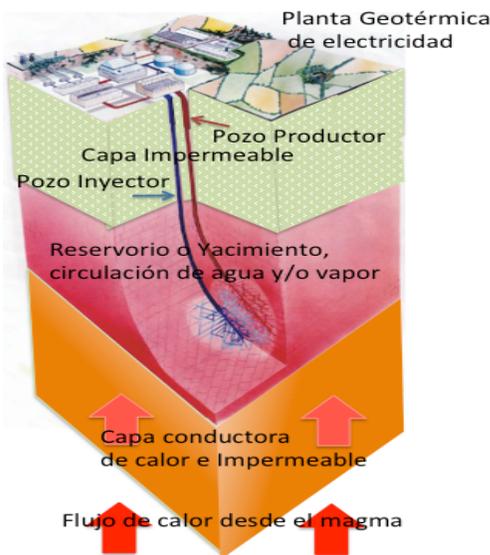


Figura No. 3, El Recurso y planta geotérmica

extraída y transformada la energía térmica en electricidad, ya que, el agua cede en el proceso su energía térmica, es reinyectada (pozo línea azul) con menor temperatura en el yacimiento o reservorio a la profundidad adecuada, con la finalidad de garantizar la sostenibilidad del aprovechamiento del recurso energético. Esta figura muestra claramente que la zona (roja) del deposito o reservorio de agua caliente recibe el calor

transportado por conducción térmica desde una roca impermeable altamente conductora del calor proveniente del magma a mayor profundidad en la parte inferior. Así mismo, muestra que el reservorio debe estar confinado por una capa superior impermeable que confina verticalmente el fluido del reservorio, el cual únicamente es posible extraer mediante pozos profundos de producción. Se entiende que **la energía geotérmica** es el calor del subsuelo que puede aprovecharse para fines prácticos.

Existen diversas aproximaciones para establecer estimaciones del potencial del recurso geotérmico y sus reservas de energía, partiendo de datos inferidos o estimados en las actividades de estudios de las etapas de reconocimiento, prefactibilidad, factibilidad y desarrollo, durante las cuales se realizan tareas como mapeo geológico, estudios de geoquímica, gravimetría, resistividad, magnetismo, termoluminiscencia (recientemente aplicada en Japón<sup>6</sup>), características de fluidos superficiales, entre otros. La calidad y logros asertivos de la estimación del potencial dependen de la disponibilidad de información.

Los recursos geotérmicos pueden ser tipificados de acuerdo a la *Figura No. 4*<sup>7</sup>, que muestra una clasificación de los recursos geotérmicos considerando el grado de conocimiento y certidumbre y las posibilidades técnicas y comerciales de ser explotable hoy o en un futuro. La clasificación realizada en la mencionada figura establece tres etapas del desarrollo que permite definir qué tan confiable es el recurso, es decir si el recurso es probado, probable e inferido.

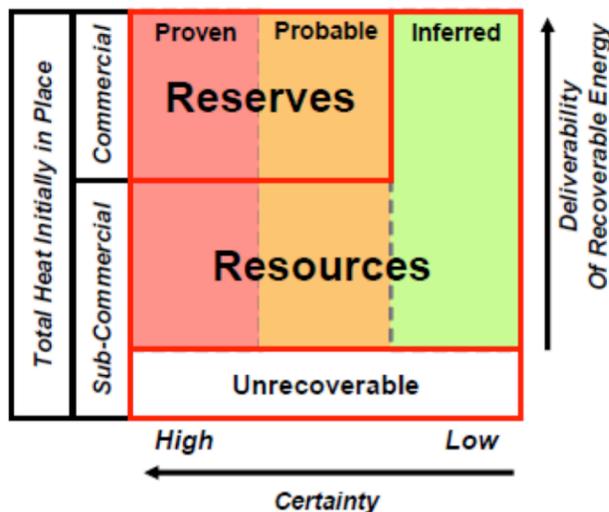


Figura No. 4, Clasificación de los recursos geotérmicos.

Fuente indicada al pie de pagina.

estudios preliminares de las anomalías hidrotermales, así como la geología básica de la zona, y un modelo conceptual mínimo.

Una de las técnicas o metodologías más básicas para estimar el potencial del recurso geotérmico es el **método volumétrico**, el cual requiere de información básica sobre la extensión del área del posible reservorio o yacimiento, su el espesor, información sobre el calor específico del fluido, y su temperatura, la porosidad y densidad de la roca, capacidad calorífica de la roca, tiempo de vida del proyecto y condiciones ambientales, entre las principales.

En etapas muy tempranas del desarrollo geotérmico, a nivel regional, este método puede ser útil considerando variables como la estimación de la temperatura del fluido a profundidad, a partir de datos de los fluidos superficiales disponibles en los

<sup>6</sup> Exploración Geotérmica mediante termoluminiscencia, PhD Norifumi Tsushiya, Programa Regional de Entrenamiento Geotérmico, Semana de Cursos Cortos 2015.

<sup>7</sup> Tomada de las presentaciones de ingeniería de Reservorios en el Diplomado de Geotermia 2015.

Otras metodologías más elaboradas se aplican en la medida que se avanza en las etapas de reconocimiento prefactibilidad, factibilidad y desarrollo, las cuales involucran estudios de mayor detalle y complejidad en la medida que se avanza con los estudios de geología, geofísica y geoquímica, así como en su integración, entre otros.

### 5.1.3 Avances en capacidad y uso de la electricidad geotérmica en el ámbito mundial y en Latinoamérica.

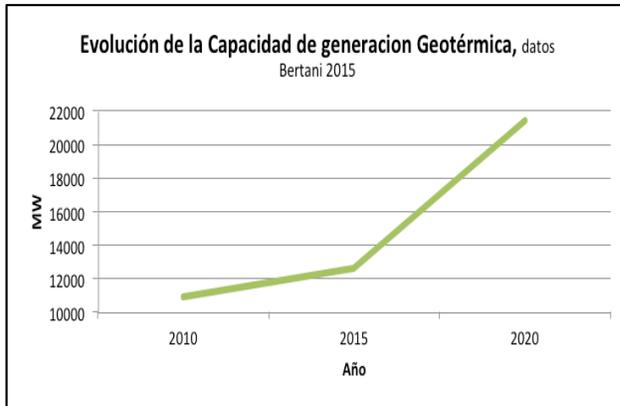


Figura No. 5, Evolución de la capacidad de generación de electricidad a partir de la geotermia, Global.

Fuente: Bertani, WGC 2015, internet octubre de 2015<sup>8</sup>

Para este apartado del documento se ha tomado nota de los avances globales, expuestos en el Congreso Mundial de Geotermia, Australia 2015 (WGC2015), en cuanto a cifras de capacidades instaladas y proyectadas, realizando un acercamiento la caso de Latinoamérica en el corto plazo al año 2020.

De acuerdo al WGC 2015, la posible evolución de la capacidad global de generación de electricidad producida a partir de la geotermia actual de 12,6 GW alcance los 21 GW al 2020, de acuerdo con las estadísticas referenciadas en la Figura No. 5.

A partir de la información de Bertani se realiza la Figura No. 6, para el caso de Latinoamérica, organizándose con base en las proyecciones planteadas para la capacidad de generación de electricidad esperada al año 2020.

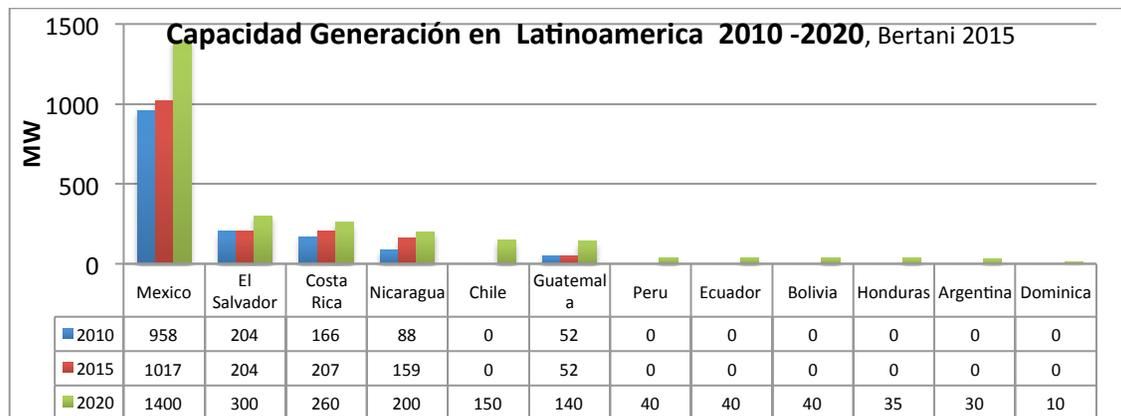


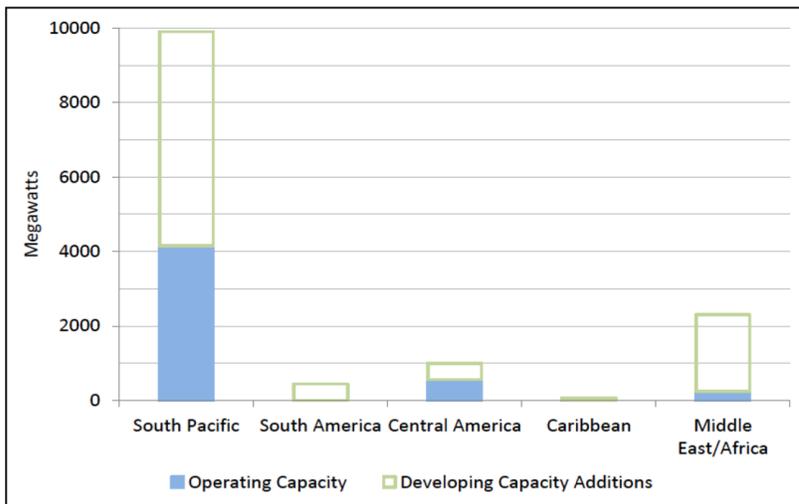
Figura No. 6, Evolución de la capacidad de generación de electricidad a partir de la geotermia en Latinoamérica.

<sup>8</sup> link: [http://www.geothermalpress.com/wp-content/uploads/2015/04/WorldGeothermalCongress2015\\_Release\\_global.pdf](http://www.geothermalpress.com/wp-content/uploads/2015/04/WorldGeothermalCongress2015_Release_global.pdf)

Se observa que México seguido de El Salvador y Costa Rica son los países con la mayor capacidad geotérmica implementada, se nota en la proyección del 2020 la presencia de nuevos actores en Latinoamérica con nueva capacidad instalada, en su orden de importancia, Chile con 150 MW y Guatemala con 140 MW los más destacados y en proporciones menores o iguales a 40 MW, Perú, Ecuador, Bolivia, Honduras, Argentina y República Dominicana. De lo anterior se encuentra que al 2020 el número de países que generarán energía a partir de la geotermia pasará de 5 a 12, así mismo la capacidad total instalada en Latinoamérica pasaría de 1639 MW (2015) a 2645 MW (2020).

Con seguridad las estimaciones del año 2020 se deberán cumplir, de acuerdo a los planes de ayuda de fuentes de financiamiento internacional. Jens Wirth del Fondo Alemán KfW, (en GEOLAC, 2014), planteó que existen acuerdos en un grupo conformado por los principales fondos de financiamiento mundial, el objeto es aportar facilidades para el desarrollo geotérmico en Latinoamérica, estas entidades realizan aportes una bolsa común de recursos de apoyo a proyectos geotérmicos del orden de 75 MU\$, los cuales se orientan a superar las barreras de acceso a financiamiento en las perforaciones iniciales ya que comparten el riesgo del fracaso en un porcentaje de 40%.

Por otra parte, acorde con lo anterior, en sus resultados el reporte “The Status of Geothermal Power in Emerging Economies, Geothermal Energy Association GEA, 2014” establece un acercamiento a la situación de la geotermia en economías emergentes, para



Source: GEA

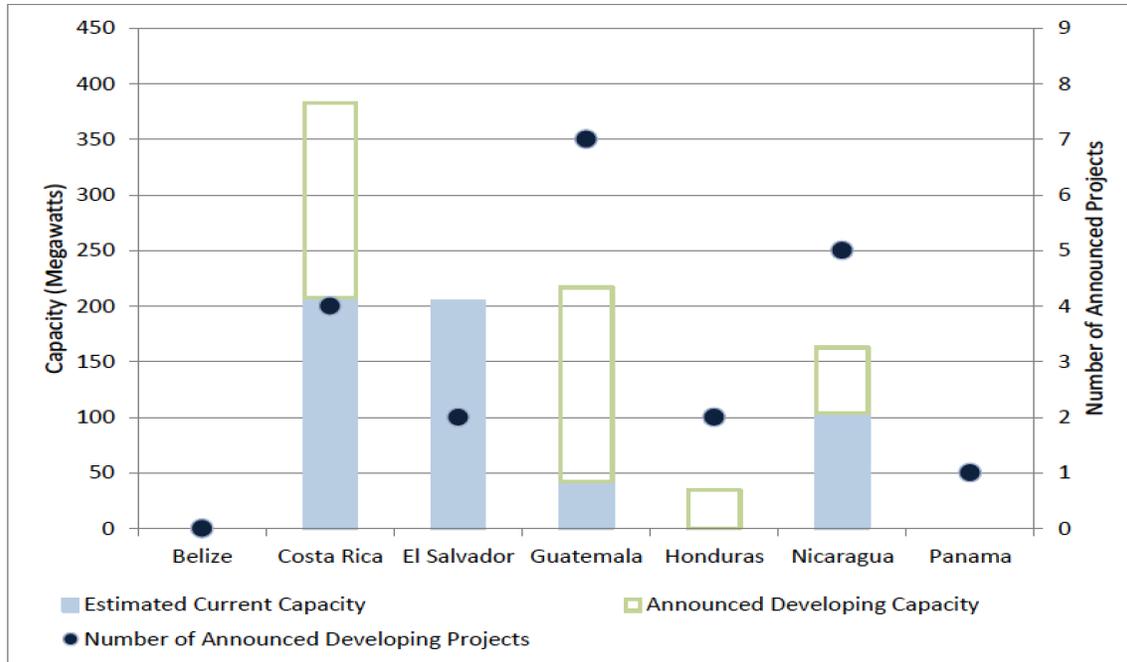
Figura No. 7, Capacidades de generación geotérmica existentes y en desarrollo para regiones en desarrollo

el caso de Costa Rica prestamos de \$ 550 millones de la Agencia de Cooperación Internacional del Japón se destinará de tres plantas geotérmicas - Pailas II, Borinquen I y II-Borinquen planificadas para 55 MW de posibles adiciones de capacidad. Su construcción se plantea iniciar en 2018 y estar en pleno funcionamiento en 2020. Se aspira a evitar el aumento de las tarifas (30% en 2013).

La Figura No. 7, muestra el caso de Suramérica donde la realidad del desarrollo geotérmico es nulo, aun cuando existen diversas iniciativas, resultan México y Centroamérica líderes en los desarrollos geotérmicos de Latinoamérica.

Se estima que el potencial geotérmico en Centroamérica entre 3.000 y 13.000 MW más de aproximadamente 50 sitios (GEA, 2014).

La *Figura No. 8*, muestra que El Salvador y Costa Rica son líderes en la capacidad geotérmica de generación de electricidad, con más de 200MW. Así mismo ilustra sobre un vasto potencial geotérmico. Nicaragua posee 100MW y ofrece incentivos fiscales para la energía renovable, genera un poco más de dos tercios de su energía a partir de recursos renovables, lo cual hace de un plan para generar 90% de la energía renovable al 2020.



Note: The figure above compares current installed geothermal capacity to "announced developing capacity." "Announced developing capacity" is the estimated power plant capacity reported for specific sites by a private company, government agency or contractor associated with the site.

Source: GEA

*Figura No. 8, Capacidades de generación geotérmica en Centroamérica*

En el caso de Guatemala considera la posible generación de 300 MW de energía geotérmica, adjudicó 150 MW en el año 2013 dentro de un plan para lograr dos tercios de la demanda del 2022, lo que ofrece seguridad energética al país. Para el caso de Honduras, a modificado la compañía eléctrica nacional, la ENEE, ha abierto el mercado de la energía para atraer la inversión privada.

Montalvo, WGC2014, establece que en América Central existen abundantes recursos geotérmicos, y tan sólo se utiliza una pequeña porción para la generación eléctrica. Se muestra como los comienzos de la exploración para evaluar el recurso geotérmico en El Salvador, Nicaragua, Costa Rica y Guatemala, conllevó al inicio de la explotación comercial de algunas áreas como Ahuachapán en 1975, Momotombo en 1983, Berlín en 1992, Miravalles en 1994, Zunil en 1998, San Jacinto Tizate en 2005, Amatitlán en 2006 y, recientemente, Las Pailas, en 2011. Plantea que la región cuenta con una capacidad instalada de 624,1 MW., y establece una estadística de los porcentajes de generación de energía eléctrica: En América Central, la electricidad generada con recursos locales

proporciona un promedio de 12% del total producido, en países como El Salvador, Costa Rica y Nicaragua, la geotermia contribuye en el suministro eléctrico el 24%, 14% y 13%, respectivamente, en el año 2012. La generación geotérmica en Centroamérica en 2012 fue de 3.542 GWh, 7,9% de la electricidad total generada. Plantea que el recurso potencial en América Central es estimado en 5.057 MW.

En un artículo reciente en *Latinoamérica Advisor* 2015 se mira hacia el futuro de la energía geotérmica en América Latina, describe un mercado más optimista para el desarrollo geotérmico en América Latina con apoyo multilateral para el desarrollo, por ejemplo, a través de fondos de mitigación de riesgo, como se mencionó antes.

Entre otras iniciativas al Fondo para el Desarrollo geotérmica para América Latina, una iniciativa lanzada en Lima en 2014, que ha alineado actores importantes como JICA, BID, NDF, KfW, GTZ, BCIE, y es un fondo que consta de más de US\$ 67 millones en la forma de instrumentos de gestión de riesgo y más de US\$ 785 millones en líneas de crédito, que se utilizará para financiar la preparación y construcción de plantas de energía geotérmica en diez países de América Latina.

#### 5.1.4 Avances en capacidad y uso de usos directos de la geotérmica en el ámbito mundial y en Latinoamérica.

En cuanto a los usos directos la situación mundial reportada por Lund et al. WGC2015 es la mostrada en las siguientes figuras de elaboración propia.

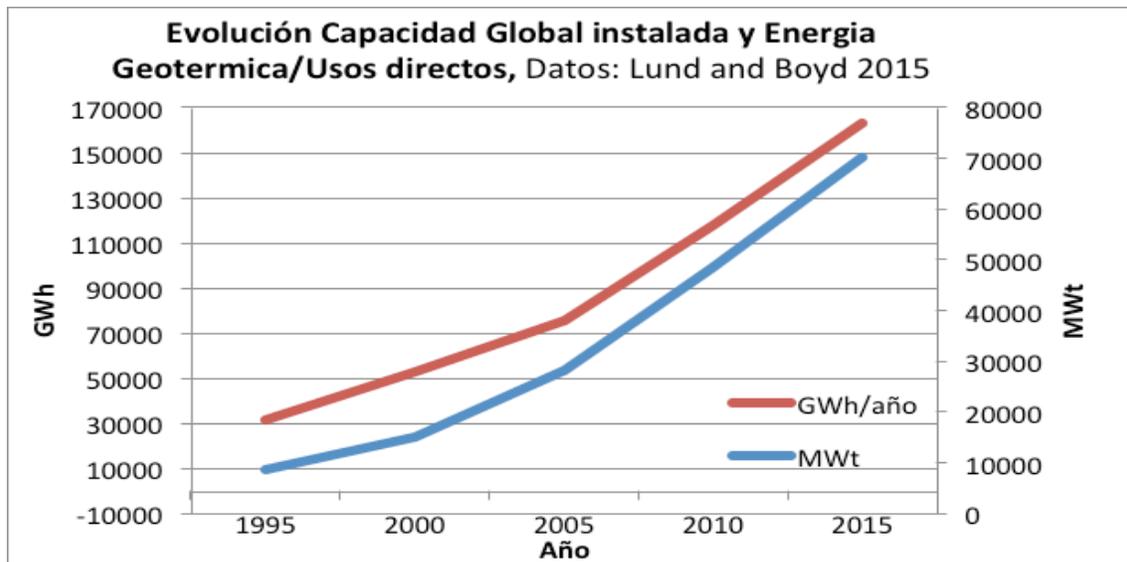


Figura No. 9, Evolución de la capacidad instalada y la producción de energía térmica geotérmica Global

La Figura No. 9, muestra un crecimiento en la pendiente de la capacidad instalada cada quinquenio al año 2015 y a partir de los reportes de los países establecen una capacidad de 70,329 MW térmicos y un aporte de energía térmica anual de 163274 GWh térmicos.

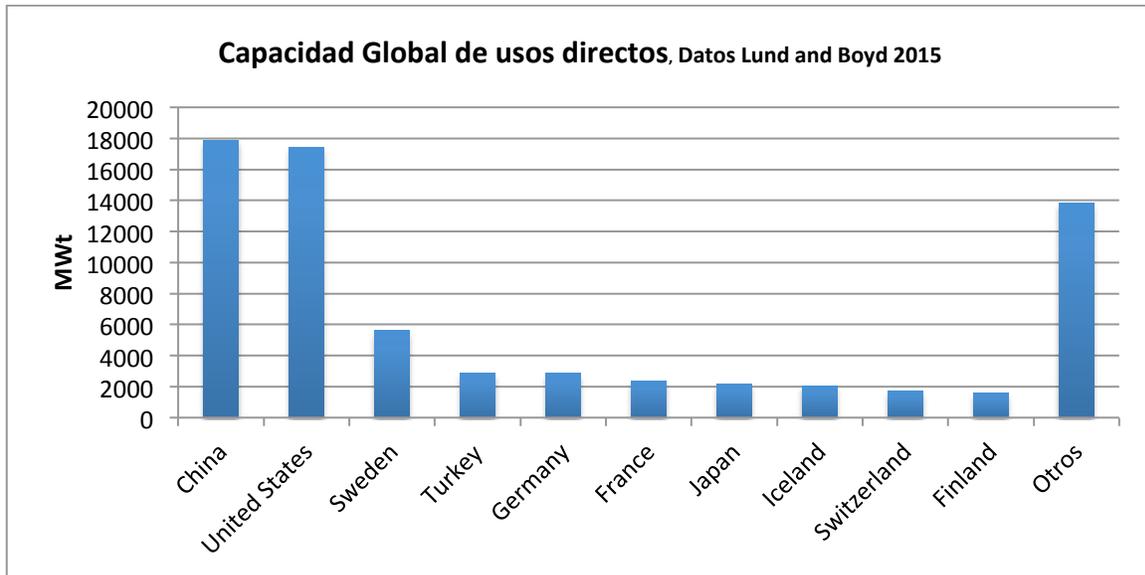


Figura No. 10, 10 países líderes en capacidad de aplicaciones de usos directos en el ámbito global

La Figura No. 10, muestra los 10 países líderes en el uso de aplicaciones de usos directos de la geotermia, organizados de acuerdo a su capacidad de producción de energía térmica, de destacan Estados Unidos y China, con mas de 16000 MWt cada uno, cerca del 50% de la capacidad mundial. Estos son seguidos por Suecia, Turquía, Alemania, Francia y Japón en el rango de 2000 a 6000 MWt instalados, seguidos por Islandia, Suiza y Finlandia con en el rango de 1500 a 2000 MWt.

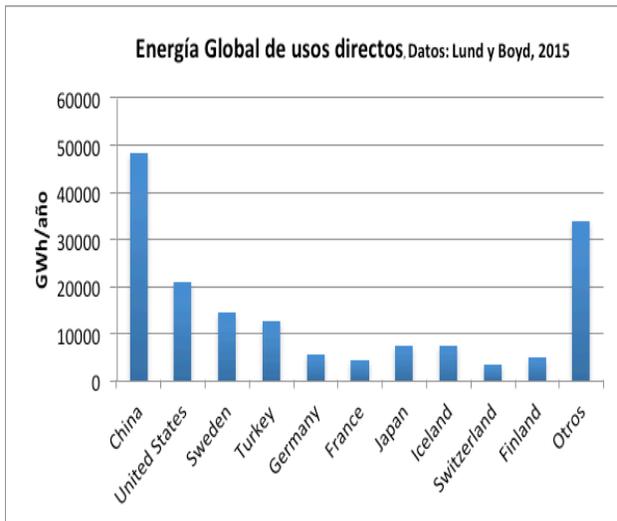


Figura No. 11, 10 países líderes en consumo de aplicaciones de usos directos en el ámbito global

La Figura No. 11, muestra los 10 países líderes en el uso de aplicaciones de usos directos de la geotermia, organizados de acuerdo a energía térmica anual producida, de destacan China cercana a los 50,000 GWh/año térmicos seguida de Estados Unidos que a penas supera los 20,000 GWh/año térmicos, cerca del 30% de la producción capacidad mundial. Estos son seguidos por Suecia, Turquía, Alemania, Francia, Japón, Islandia, Suiza y Finlandia con menos de 15,000 GWh/año térmicos.

Las estadísticas de inversiones para el caso de los usos directos según Bertani, se han reducido entre el 2010 y el 2015, 148 millones al año.

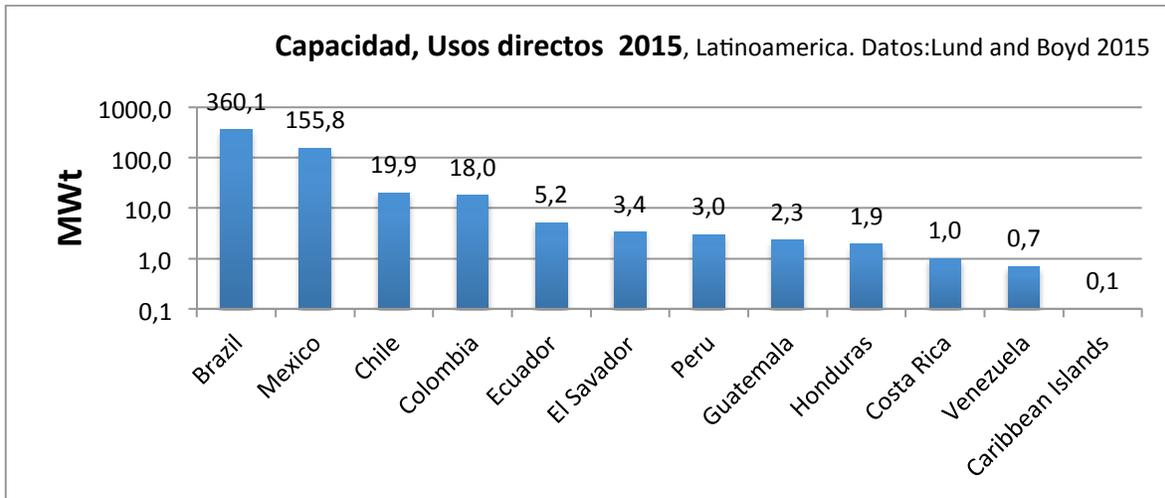


Figura No. 12, En escala logarítmica las capacidades de generación de energía térmica de Latinoamérica

La Figura No. 12, muestra en escala Logarítmica, los países líderes en el uso de aplicaciones de usos directos de la geotermia en Latino américa, organizados de acuerdo a la capacidad de generación de energía térmica, se destacan Brasil y México mayor a los 150 MW térmicos los demás países con capacidades menores a 20 MW térmicos.

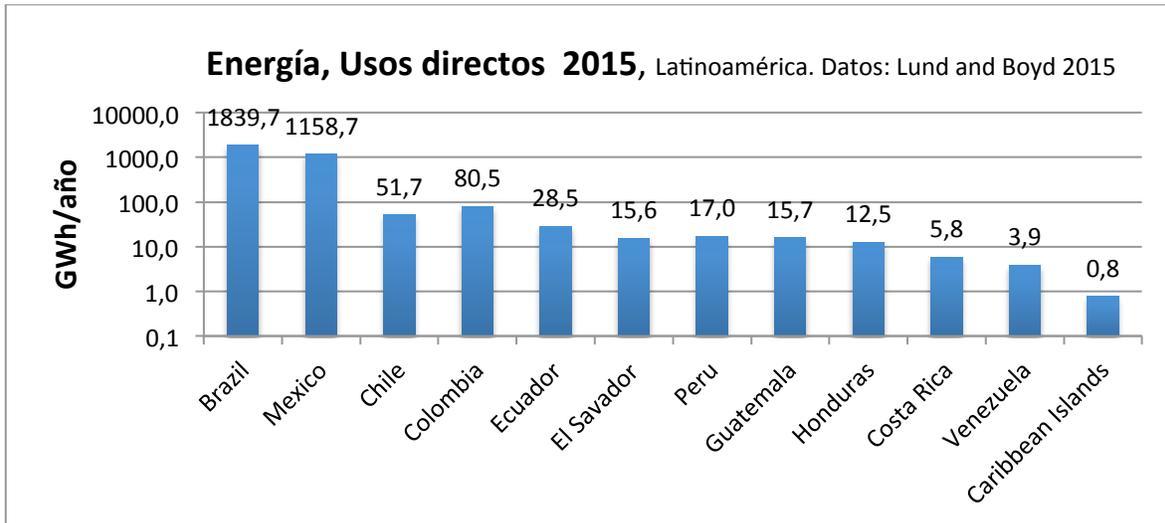


Figura No. 13, En escala logarítmica la producción de energía térmica anual para usos directos de Latinoamérica

La Figura No. 13, muestra en escala Logarítmica, los países líderes en el uso de aplicaciones de usos directos de la geotermia en Latinoamérica, organizados de acuerdo a la generación de energía térmica, se destacan Brasil y México con una utilización mayor a los 1000 GWh/año térmicos los demás países con capacidades menores a 90 GWh/año.

## 5.2 La óptica ambiental

Oduor Jennifer A., 2012, desde la óptica ambiental plantea oportunidades no consideradas para favorecer los desarrollos geotérmicos, referentes a leyes sobre medio ambiente pueden remover barreras a los desarrollos geotérmicos en función de su calidad de fuente renovable de energía y los beneficios locales, por ejemplo: si desde la concepción de los proyectos, las partes interesadas aportan y se integran al proyecto, se reducen riesgos futuros de pérdidas de tiempo e inversiones por inconvenientes sociales y ambientales, facilitando apropiar los proyectos geotérmicos como beneficiosos para valorar sus beneficios y mejorar la calidad de vida de las regiones donde se implementan, aprovechando las diversas posibilidades de uso del recurso, en usos directos denominado aplicaciones en cascada<sup>9</sup> ver *Figura No. 14*.

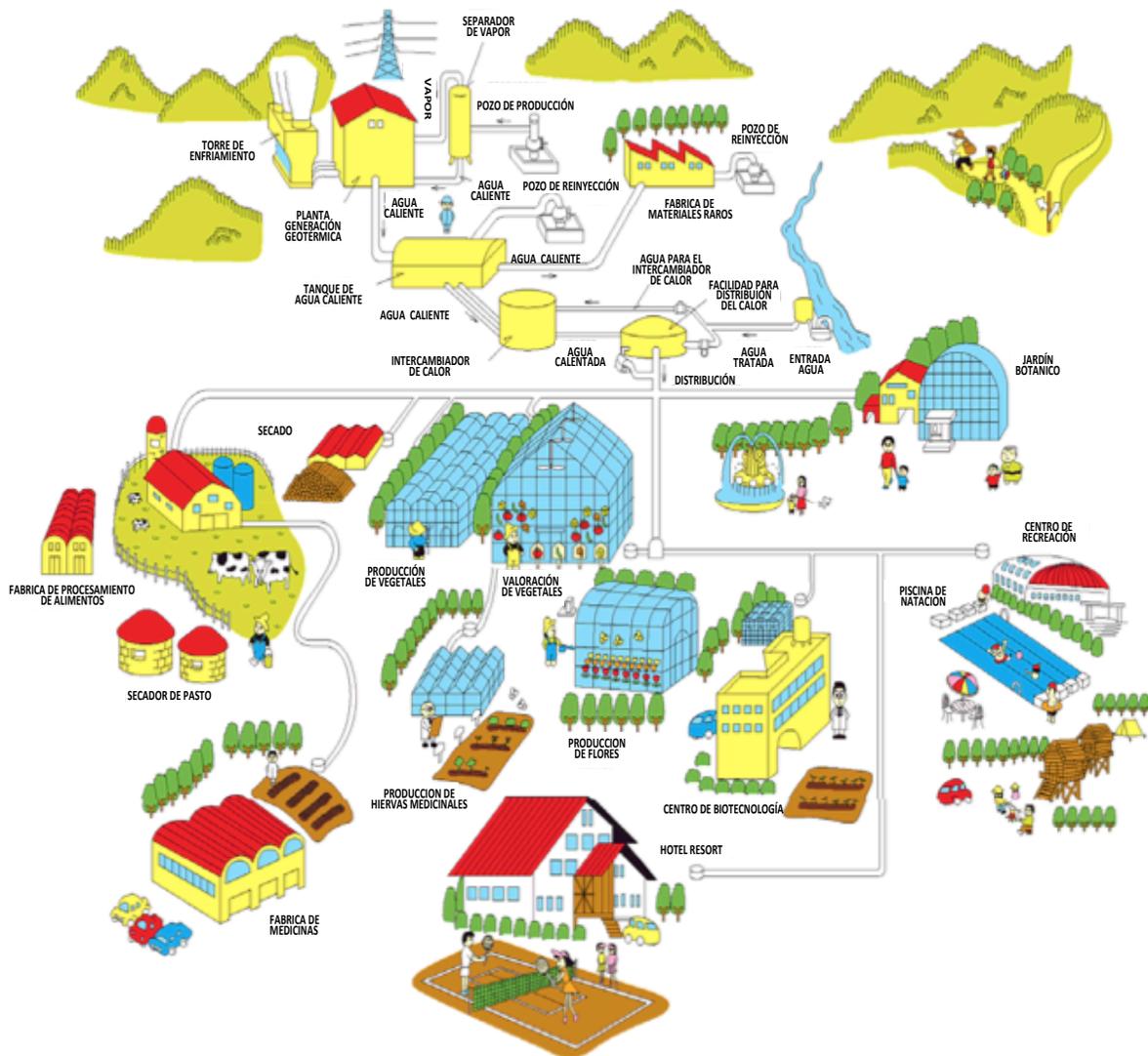


Figura No. 14. Representación esquemática de los usos múltiples de la energía geotérmica

<sup>9</sup> Se ajustaron los nombres al español de la figura de Presentación 2012, Enrique M. Lima Lobato, West JEC, Inc.

### 5.3 Evaluación del potencial

La Guía para la evaluación del potencial energético en zonas geotérmicas, OLADE, 1994, establece una metodología para estimar la magnitud del potencial de un sistema geotérmico considerando observaciones en la superficie y las características de sistemas hidrotermales (realizadas en etapas previas a la factibilidad). Establece que la existencia del sistema geotérmico se asocia con: a) una fuente de calor endógeno, b) fluidos a los que se transfiere el calor desde la fuente profunda y lo transportan a la superficie, c) estructuras geológicas (fallas, fracturas) que sirven de conductos del fluido geotérmico, d) formaciones geológicas permeables donde almacenar los fluidos (el reservorio o yacimiento geotérmico), y e) formaciones poco permeables cubriendo el yacimiento (capa sello) que prevengan o reduzcan el movimiento ascendente de los fluidos geotérmicos y la mezcla de los mismos con aguas subterráneas someras más frías, lo cual permite un mecanismo de aislamiento y conservación del recurso energético.

**Tabla 3, Algunos métodos utilizados para aproximar el potencial geotérmico en etapas muy tempranas.**

Método	Principio	Referentes	Comentario
Flujo Térmico Superficial	Cálculo de la cantidad de calor subterráneo transmitido a la superficie, mediante transferencia térmica por conducción y convección por unidad de tiempo llamada la potencia Térmica Natural (PTN).	(Muffler y Cataldi, 1978), Guis clases diplomado.	Determina la potencia (vatios) térmica liberada por el sistema. Asumiendo factores de recuperación y transformación de energía térmica a eléctrica, estima semicuantitativa la cantidad de electricidad que produciría el sistema
Fractura Planar	Modelo de una fractura plana que recibe calor por conducción de la roca vecina impermeable.	Bodvarsson, 1974	Establece la energía térmica que se puede extraer de la fractura por unidad de área como función de las temperaturas: i) de la roca circundante e ii) inicial y final (después de 25 ó 50 años) del fluido en la fractura.
Calor Magmático o de la Cámara Magmática	La cámara magmática es la fuente térmica, el calor almacenado en el subsuelo se cuantifica para un volumen estimando a una profundidad, edad y temperatura de la cámara, estableciendo la transferencia de calor entre dicha cámara y la superficie.	Smith y Shaw (1975, 1979) y Barberi y Marinelli (1987)	Desarrolla un modelo de la cámara, estima su profundidad, volumen, edad y temperatura inicial y final, luego se calcula la distribución de temperaturas (o del gradiente térmico) en la corteza considerando sólo la conducción.
Volumétrico	El método volumétrico está basado en el cálculo de la energía térmica contenida en el volumen de roca correspondiente a la zona en evaluación.	Nathenson y Muffler (1975), Muffler y Cataldi (1978) y Brook y otros (1979).	Estima la cantidad de energía eléctrica que se podría generar aprovechando los fluidos de sistemas hidrotermales que presentan temperaturas superiores a los 150 °C.

La Tabla 3, de elaboración propia, muestra algunos métodos utilizados para aproximar el potencial geotérmico en etapas muy tempranas, como se puede observar que existe variedad de métodos de primera aproximación para estimar el potencial energético de una zona, de todos el método volumétrico es preferido por considerar datos inferidos de estudios de superficie en las primeras etapas de la exploración, este método será el tratado en este documento.

### 5.3.1 Método Volumétrico

El método volumétrico se basa en el cálculo de la energía térmica contenida en el volumen de roca correspondiente al reservorio de la zona con el potencial. Aquí se describe la metodología desarrollada en la guía de Olade (Brook, 1979), aplicada a sistemas geotérmicos de líquido dominante, utilizando métodos estadísticos, para el caso de sistemas de vapor dominante se puede ajustar la metodología (Narthenson 1975 y Brook, 1979).

Olade 1994, define: a) el Recurso Base Accesible (RBA), el Recurso Geotérmico (RG) y establece el cálculo de la cantidad de electricidad que se podría generar en base al mismo, es conveniente *RESALTAR* que los resultados del método volumétrico son solamente estimativos. Los parámetros utilizados en los cálculos son inferidos, pueden diferir de los que finalmente se obtengan de la perforación de pozos profundos y/o desarrollo y analizando los resultados de sus pruebas y mediciones.

El Recurso Base Accesible (RBA) es la cantidad de calor almacenado en un sistema hidrotermal, es decir en el reservorio (volumen de rocas y fluidos), tomando una temperatura base de referencia, la cual depende del destino final del fluido, es decir las condiciones de reinyección, o necesidades de un ciclo binario o usos directos, de no existir restricciones podría ser la temperatura ambiente promedio anual del lugar o de la región en consideración. Es conveniente tener en cuenta las diferentes características existentes en la corteza en el área de interés, a partir de subvolúmenes particulares, tomando en consideración que la profundidad posible técnica y económica este alrededor de los 3000 m de profundidad.

El RBA considera sólo el calor almacenado sin la recarga térmica existente (por la inexistencia de estos datos y su incertidumbre durante la vida de un proyecto geotérmico). A lo cual se la puede asociar a que es un valor mínimo del calor, el cual se podría aumentar a medida que se cuente con mejor información.

#### 5.3.1.1 Cálculo del Recurso Base Accesible (Qt)

La cantidad de energía térmica almacenada en el reservorio es la energía contenida por la roca y el fluido (Qt), se calcula mediante la siguiente formulación:

Energía en roca y fluido:  $Q_t = Q_r + Q_f$ ,

Donde,

$Q_r$  es la energía extraíble de la contenida en roca  $Q_r = A \cdot h \cdot (\rho_r \cdot C_r \cdot (1 - \phi) \cdot (T_i - T_a))$

$Q_f$  es la energía extraíble de la contenida en los fluidos  $Q_f = A \cdot h \cdot (\rho_f \cdot C_f \cdot \phi \cdot (T_i - T_a))$

Siendo:

A	Área del reservorio	km <sup>2</sup>
h	Espesor del reservorio	m
Cr	Calor específico de la roca	kJ/(kg °C)
Cf	Calor específico del fluido	kJ/(kg °C)
$\phi$	Porosidad de la roca	%
Ti	Temperatura media del reservorio.	°C
Ta	Temperatura de abandono del reservorio	°C
$\rho_r$	Densidad de la roca	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_f$	Densidad del fluido	kg/m <sup>3</sup>

Para el caso de la **estimación del área**, se le asocia la mayor incertidumbre (Brook y otros) en la estimación del potencial debido a que se infiere de datos geológicos, geoquímicos y geofísicos disponibles. Olade, plantea que en zonas geotérmicas con solo una manifestación (o varias en una zona pequeña), se asocia un área de 2 km<sup>2</sup>. En caso de una zona con geología superficial con varias manifestaciones y características químicas similares, que sugiera que provienen del mismo yacimiento, se considera el área interna entre estas.

En algunos casos el área del reservorio se podría inferir a partir del área alterada hidrotermalmente en la superficie, a la extensión de la superficie que presenta flujos o gradientes térmicos o geofísicos (bajas resistividades, gravimetría o magnetometría).

**Cálculo del espesor.**- por facilidad en el calculo del volumen del yacimiento se considera un espesor uniforme. Olade Plantea asumir una profundidad máxima de 3 km (salvo que haya información que indique lo contrario), es decir esa es la profundidad de la base del reservorio. Debido a que solamente con la perforación se ubicará la localización de la cima del reservorio o en caso contrario de resultados de estudios geofísicos, pueden resultar útil registros de la temperatura de los pozos de gradiente. De no existir información, Brook y otros proponen considerar 1.5 km como la profundidad de la cima. En conclusión el espesor inicialmente puede ser 1.5 km, indicando que la incertidumbre del espesor, es mucho menor que la del área del reservorio.

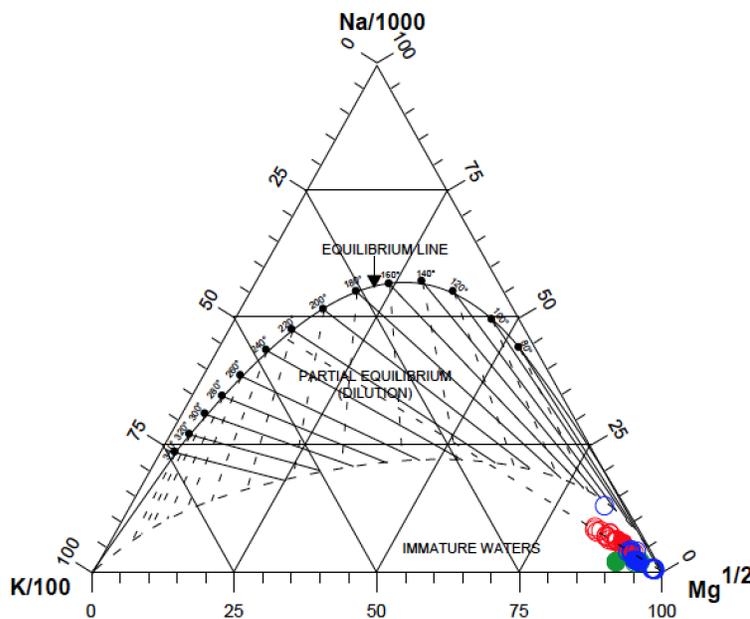


Figura No. 15, Utilización de geotermómetros para estimar la temperatura del reservorio

**Estimación de la temperatura del reservorio**, en las primeras etapas de desarrollo de un proyecto geotérmico la temperatura se estima utilizando geotermómetros químicos. Se fundamenta en el hecho que algunas reacciones químicas entre rocas y fluidos, que dependen de la temperatura y controlan la composición química e isotópica de los fluidos geotérmicos (ver por ej., Henley y otros, 1984; UNITARIUNDP, 1991, recientemente “Best practices guide for geothermal exploration”, IGA, 2014).

La Figura No. 15, muestra el caso publicado por Alfaro et al, de estimación en el sistema geotérmico del Volcán Azufral, Colombia, donde en el diagrama Na-K-Mg (Giggenbach, 1988) establecen una temperatura de reservorio mayor a 200 °C.

El **calor específico de la roca y del fluido** se toman considerando valores característicos para yacimientos geotérmicos, igualmente, Olade, 1994, plantea un rango de valores para la **porosidad** del 10% al 15%, aun cuando Monterrosa (2007), plantea del 5 al 10 % para el área geotermal de San Vicente asociada a roca volcánica. En cuanto a la **temperatura de abandono del reservorio** corresponde a la temperatura mínima a la cual es posible dejar el fluido para su reinyección u otros usos (ciclo combinado, o usos directos) si no existe limitaciones por estas necesidades podría ser la temperatura ambiente promedio anual del lugar.

### 5.3.1.2 Cálculo de la potencia o capacidad de producción de electricidad

La capacidad de producción de energía se calcula mediante la siguiente ecuación considerando el RBA ( $Q_t$ )

Capacidad de la planta  $P = (Q_t * R_f * C_e) / (P_f * t)$

Donde:

P	Potencia o la capacidad a instalar	MWe
R <sub>f</sub>	Factor de recuperación de calor	%
C <sub>e</sub>	Eficiencia de conversión	%
P <sub>f</sub>	Factor de Planta	%
t	Tiempo de vida útil inicial	s

El recurso geotérmico  $Q_{BP}$  es una fracción de la energía térmica del sistema aprovechable  $Q_t$  a nivel boca de pozo, debido a limitaciones físicas, técnicas y económicas.

$Q_{BP}$  para el caso de un sistema de tipo líquido dominante, se calcula utilizando un Factor de Recuperación Geotérmico (**R<sub>f</sub>**), es la eficiencia de la extracción de energía desde el reservorio, que se define como la razón entre la energía que se puede extraer a nivel boca de pozo  $Q_{BP}$  y la energía contenida originalmente en el reservorio ( $Q_t$ ),.

$$R_f = Q_{BP} / Q_t$$

Los modelos de extracción térmica de tipo flujo intergranular o de barrido (Bodvarsson, 1974; Nathenson, 1975) permiten en el caso planteado de líquido dominante estimar  $R_f$ , sin embargo Nathenson y Muffler (1975) y Brook y otros (1979) plantean que se puede tomar en cuenta un comportamiento no ideal del sistema, y utilizar como valor aceptable  $R_f = 0.25$ , aplicable a sistemas no binarios y utilización directa de vapor.

No obstante, el planteamiento anterior, en etapas muy preliminares de la exploración muy preliminar, para el caso de un cálculo conservador, donde la capacidad a instalar dependerá de las eficiencias asociadas a las posibles tecnologías geotérmicas, en cuyo caso un valor conservador utilizado de **R<sub>f</sub> puede ser 0.1**, lo cual está de acuerdo con las investigaciones y propuestas de Colin F. Williams (2007) de la investigación de Monterrosa (2007) en el campo geotérmico de San Vicente, en El Salvador, referencian la utilización de valores de  $R_f$  entre 0,05 y 0,2, también de resultados de diversos campos geotérmicos en los Estados Unidos.

El fundamento radica en que la diferencia de valores de la energía interna del agua por solo cambio de temperatura sin cambio de estado (de líquido de mayor temperatura –

reservorio- a liquido de menor –referencia o abandono del reservorio-). Para casos donde se aproveche el vapor producido por cambios de fase del fluido geotérmico debe mejorarse esta aproximación, lo cual con seguridad ocurrirá en etapas posteriores, con datos de las perforaciones.

Para la conversión final a la energía eléctrica se considera que en los generadores de electricidad **la eficiencia de conversión a electricidad  $C_e$  es mayor a 0.8** cuyo limite inferior (0.8), (Olade, 1994, clases Diplomado 2015) resulta conservador para las primeras aproximaciones del potencial.

Adicionalmente, las plantas de generación requieren de paradas ocasionales y reducciones de los niveles de generación de sus capacidades nominales, por lo cual es necesario utilizar y un factor que indica la disponibilidad real de energía de la planta llamado **Factor de Planta típicamente mayor a 0.8**, (Olade, 1994, clases Diplomado 2015) para las plantas geotérmicas.

Finalmente es necesario considerar el **tiempo de vida del proyecto geotérmico**, el cual típicamente es tomado entre 25 y 30 años, (Olade, 1994, clases Diplomado 2015).

## 5.4 Análisis económico

### 5.4.1 Competitividad de las tecnologías de generación de electricidad

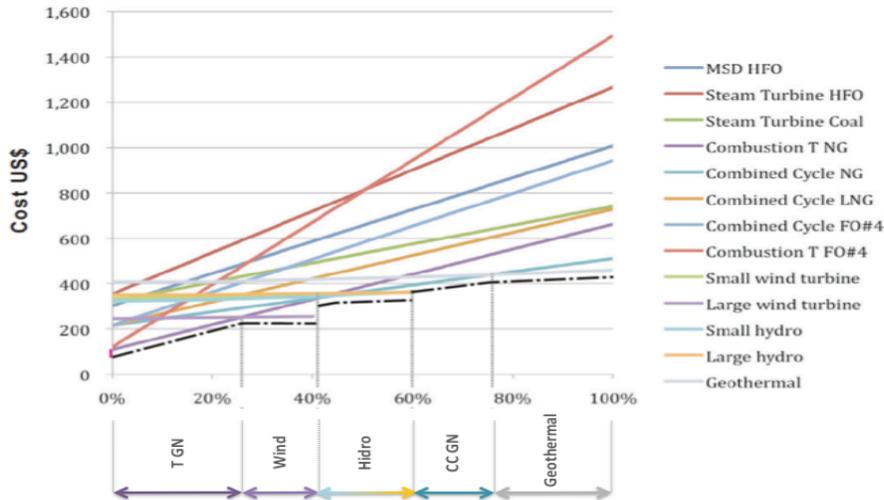
Respecto de la toma de decisión sobre la opción de la generación de electricidad geotérmica, Magnus Gehringer, 2011, realiza un análisis de costos (de capital y de operación y mantenimiento) con diversas alternativas competitivas fuentes renovables (hidráulica, solar y eólica), y no renovables (carbón, gas, petróleo). Muestra como la geotermia compite económicamente (considerando 75US\$/barril de petróleo al año 2010), a pesar de su alta inversión inicial. La Tabla 4 muestra los costos para cada tecnología, así como el costo anualizado de capital (\$/kWh). El precio del petróleo actualmente es menor de 50 US\$ (Octubre, 2015), sin embargo el coste de producción de la geotermia depende de cada proyecto específico y puede ser menor o mayor que el utilizado por el estudio.

**Tabla 4, Características de las opciones de generación**

Plant	Fuel	Capac-ity	Economic Life	Investment Cost w/ IDC		Variable Cost	Fixed Costs	Efficiency/ Heat Rate	
		MW	Years	US\$/ kW	S/kW	US\$/ MWh	US\$/ kw-yr	%	BTU/ kWh
MSD	HFO	20	20	1,900	257	7.5	47	43	7,862
Steam Turbine	HFO	200	25	2,500	321	2.1	34	31	11,006
Steam Turbine	coal	250	25	2,250	289	2.1	34	32	10,663
Combustion T	Nat gas	100	20	730	99	2.4	9.8	28	12,186
Combined Cycle	Nat gas	150	25	1,500	192	1.5	24.5	53	6,438
Combined Cycle	LNG	150	25	1,500	192	1.5	24.5	53	6,438
Combined Cycle	FO #4	150	25	1,500	192	1.5	24.5	53	6,438
Combustion T	FO #4	100	20	800	108	2.5	12	28	12,186
Small Wind Turbine	Wind	0.5	30	2,260	282	4	55		
Large Wind Turbine	Wind	1.5	30	1,700	212	2	35		
Small Hydro	Hydro	20	40	2,500	304	4	20		
Large Hydro	Hydro	500	50	2,800	337	1	15		
Geothermal	Steam	50	30	3,000	374	2	35		

Fuente: Magnus Gehringer, 2011

Al analizar la Tabla 5 y la *Figura No. 16*, Costo analizado de capital y de operación US\$/kW vs el factor de capacidad, la geotermia solamente resulta competitiva para factores de capacidad mayores al 80%, condición que fácilmente puede cumplir. Adicionalmente es una fuente más limpia y fiable de potencia ideal para suplir la carga base. Para lograr el apoyo al desarrollo de un proyecto geotérmico requiere que los recursos involucrados sean económicamente justificados y estos análisis representan una importante referencia.



*Figura No. 16, Costo analizado de capital y de operación US\$/kW vs el factor de capacidad*

Fuente: Magnus Gehringer, 2011

En general, esto puede significar que el proyecto sea integrado como parte de un plan de desarrollo considerando recursos alternativos, los cuales un país puede involucrar dentro del marco de tiempo de planificación. Estos incluyen otras opciones como la térmica con combustible fósil, como el carbón, fuel-oil de diferente calidad y precio, el gas natural y recursos renovables, tales como la energía hidroeléctrica, eólica y solar.

**Tabla 5, Costo analizado de capital y de operación US\$/kW vs el factor de capacidad**

Capacity Factor	0%	20%	40%	60%	80%	100%
MSD HFO	304	445	586	727	868	1,008
Steam Turbine HFO	355	537	720	902	1,085	1,267
Steam Turbine Coal	323	406	490	574	658	742
Combustion T NG	109	220	330	441	552	663
Combined Cycle NG	217	276	335	394	453	512
Combined Cycle LNG	217	319	422	524	627	729
Combined Cycle FO# 4	217	362	508	653	799	944
Combustion T FO# 4	120	395	670	944	1,219	1,494
Small Wind Turbine	337	344	358			
Large Wind Turbine	247	250	257			
Small Hydro	324	331	345	366		
Large Hydro	352	354	358	363		
Geothermal	409	412	419	430	444	461

Fuente: Magnus Gehringer, 2011

La mejor garantía para cualquier proyecto energético es demostrar que puede competir en

un mercado determinado y a los valores de los precios de mercado. En este apartado se realiza un breve recuento de investigaciones realizadas sobre las tecnologías de producción de electricidad y sus costo nivelados de generación ante diversos valores del factor de planta (cociente entre los valores anuales de energía producida en MWh típicamente en la planta, dividido sobre el valor de la capacidad de la planta multiplicada por las horas de año).

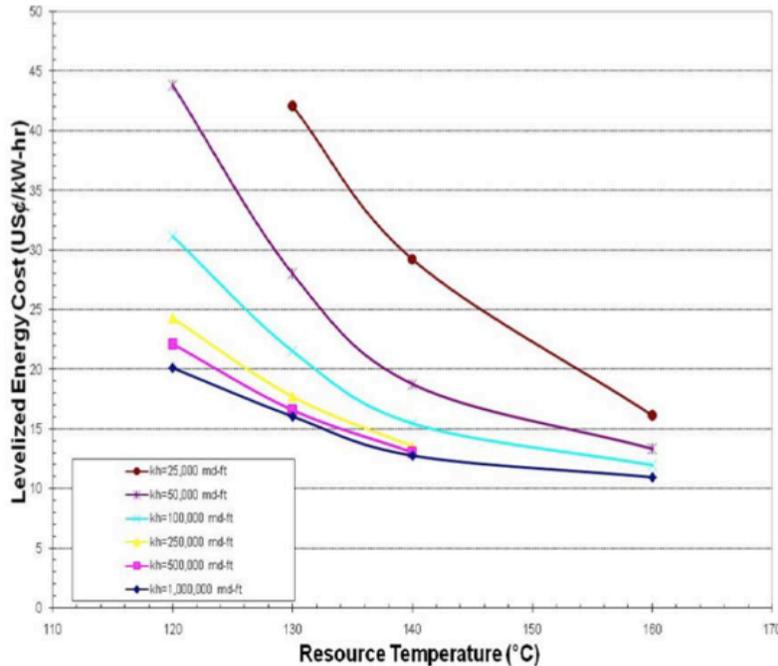


Figura No. 17, Costo nivelado de generación vs temperatura y flujo "kh" (md-ft) del reservorio

Fuente: Sanyal, 2010 (Sanyal and Butler, 2009)

Subir K. Sanyal, 2010, muestra que a partir de información de diversos campos geotérmicos y reservorios en Estados Unidos la *Figura No. 17*, (de Sanyal and Butler, 2009) donde se establece la variación del costo nivelado de generación para sistemas geotérmicos en función de la temperatura del reservorio y de la capacidad recuperación del flujo en el reservorio (en "kh" milidacys-pie). Este es un importante referente para evaluar que tan competitivo es un proyecto geotérmico.

#### 5.4.2 Aspectos del análisis económico en la metodología Olade

A continuación se plantean algunos apartes de la Guía OLADE, 1994 de la sección de análisis económico con el propósito de aportar aspectos que permitan apreciar los beneficios económicos y sociales con el proyecto geotérmico, evaluando dichos beneficios en relación con los costos asociados con su ejecución y comparando el proyecto con las alternativas existentes, visto líneas arriba.

Se requiere un análisis detallado de la demanda de energía eléctrica a nivel local, regional o nacional para establecer posibles aportes a deficiencias del suministro de electricidad en cuanto a restricciones técnicas del sistema interconectado actual o de la generación existente y en construcción. Este análisis es la base para determinar la necesidad del proyecto, para cuantificar los beneficios directos del mismo. La justificación económica de un proyecto geotérmico debe demostrar que el proyecto constituye la solución, de costo mínimo para satisfacer la demanda de energía.

En caso de que el proyecto constituya sólo una parte de un programa más amplio destinado a cubrir la demanda determinada, debe demostrarse que el programa global representa la solución óptima. Además del análisis de costo mínimo antes indicado, deberá efectuarse un análisis costo-beneficio, comparando los beneficios económicos previstos con los costos económicos del proyecto.

Deberá llevarse a cabo una evaluación económica separada para cada componente del proyecto que constituya una unidad técnica y económicamente independiente. Por otra parte, si un proyecto representa sólo una parte de un programa indivisible más amplio (por ejemplo, proyectos de fines múltiples, por ejemplo incluyendo generación de electricidad y usos directos), el análisis económico debe cubrir el programa global.

Para el caso de proyectos de generación de electricidad se compara situaciones hipotéticas que se presentarían al ejecutar el proyecto:

- a. Reemplazar otras formas de energía (por ejemplo, las que utilizan combustibles fósiles) por geotermia.
- b. Satisfacer nuevas demandas de energía.
- c. Una combinación de los objetivos anteriores.

En consecuencia, los beneficios pueden ser:

- a. Ahorro de recursos por fuentes alternativas de energía (petróleo, gas, etc.).
- b. Valor asignado por la demanda para contar con mayor seguridad de suministro de energía.

También plantea la metodología Olade, aspectos a considerar en casos en que el proyecto geotérmico tiene por fin satisfacer nuevas demandas o demandas adicionales de energía (y no sustituir fuentes existentes) y que deben cuantificarse beneficios externos para el sector industrial (en la producción de papel), agrícola (secado de productos agrícolas y forestales y la producción de fertilizantes inorgánicos), acuicultura, los sectores de salud y turismo (balneoterapia, recreacionales).

Finalmente establece, aspectos a incluir en los resultados del: análisis de costo-beneficio y de sensibilidad (costos, beneficios, demanda, precios de combustible, entre otros.), así como de la programación cronológica óptima, diseño óptimo (dimensionamientos del proyecto), distribución de los beneficios en la sociedad y la estructura tarifaria.

## 6 METODOLOGÍA

Se trata de desarrollar la propuesta de hoja de ruta siguiente estableciendo algún indicador que ayude en la toma de decisión, considerando elementos de carácter público disponible:

1. Tomar información de referencia de las metodologías de desarrollo para el proyecto geotérmico a partir de la revisión bibliográfica se establecen barreras y riesgos principales del desarrollo de un proyecto geotérmico. La información anual de la producción de energía nacional y el precio promedio de la energía pueden ser útiles. Capacidades instaladas y producción anual de energía de las plantas geotérmicas una vez implementadas. Potencial volumétrico como aproximación inicial de aprovechamiento.
2. Estimación de costos de la energía eléctrica en el país si se hubiera implementado el proyecto geotérmico para un año determinado, establecimiento de series históricas, asumiendo un despacho en la base en un contexto de mercado competitivo, es decir la planta tomaría simplemente el precio del mercado, típico en el caso de proyectos hidroeléctricos con abundancia del recurso.
3. Establecimiento de diferencia de costos de la energía a nivel nacional, entre el valor histórico y el valor hipotético con la participación de la generación geotérmica.

### 6.1 Revisión de información y clasificación

Estudios de caso en Latinoamérica y el mundo sobre las barreras y riesgos para el desarrollo de la energía geotérmica, a partir de documentos disponibles sobre la temática se establecerá una caracterización de las principales barreras, riesgos y sus soluciones, se buscará, establecer o determinar indicadores de barreras, riesgos y soluciones, que faciliten una valoración de barreras y alternativas de solución.

A partir de los resultados anteriores se buscará la elaboración de una propuesta de hoja de ruta o propuesta Metodología para fomento de desarrollo de proyectos Geotérmicos la cual tendría una visión desde la óptica del Estado.

Adicionalmente se realiza, un estudio de caso de evaluación del potencial geotérmico en una etapa preliminar de un país proyecto geotérmico, a partir de la metodología volumétrica tomando un caso tipo específico, de acuerdo a información disponible públicamente.

## 7 ANÁLISIS DE METODOLOGÍAS (Barreras)

### 7.1 Barreras identificadas

Se realiza un análisis de las metodologías, las cuales se amplían en el anexo 1, solamente se colocan los resultados del análisis de las barreras que cada uno identifica respecto del desarrollo de proyectos geotérmicos.

#### 1) Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) y el Banco Interamericano de Desarrollo BID

##### **Barreras<sup>10</sup>:**

- **Financieras:** Limitado acceso a financiamiento. No existe ninguna cobertura de riesgo a la inversión para desarrollar la geotermia.
- **Políticas:** Se requiere dar mayor seguridad a las compañías desarrolladoras en el tema social a fin de reducir la percepción de riesgo de que las comunidades impida el desarrollo del proyecto. Falta difusión sobre los beneficios de la geotermia dentro de la sociedad y autoridad e de gobiernos locales.
- **Técnicas:** Insuficiencia de especialistas en temas específicos de geotermia en tres niveles: científicos, de ingeniería y técnicos, así como especialistas en evaluación ambiental para proyectos geotérmicos. Falta de empresas de servicios especializados. Falta de oferta educativa relacionada con geotermia.
- **Regulatorias:** No existen criterios estandarizados para la evaluación ambiental de los proyectos geotérmicos. No existen criterios de evaluación técnica (metodología, parámetros y estándares) aplicables a las autorizaciones de exploración. El marco legal actual no contempla la energía geotérmica de baja entalpía

#### 2) Programa de Energía del Sector de Gestión de Asistencia (ESMAP) y el Banco Mundial.

No plantea **barreras particulares o generales**, establece la buena práctica de identificar los riesgos o barreras a partir de la información de los estudios preliminares, y asociado solamente a la exploración:

- El mercado de la energía y los posibles acuerdos de compra de energía (PPA) o tarifa de alimentación.
- Exigencias y posibilidades adicionales / para el uso de la energía geotérmica como distrito o calentamiento de efecto invernadero.
- Problemas de infraestructura (carreteras, agua, comunicación, transmisión).

<sup>10</sup> Presentación "Geotermia en los países de la Región Andina", Dr. Ing. Gabriel Salazar Y, Director de Estudios y Proyectos, OLADE, 2013.

- Problemas de propiedad de los recursos (en algunos países los permisos geotérmicos están bajo la ley minera; en otros casos bajo una legislación específica en geotérmica puede ser considerado una concesión de agua; o no podría existir marco jurídico pertinente).
- Aspectos ambientales y sociales.
- Marcos institucionales y regulatorios.
- La estabilidad política y financiera.
- Recopilación e interpretación de la teledetección disponibles o los datos reconocimiento aéreo.
- La información disponible en todos los sistemas geotérmicos conocidos, incluyendo geologías, hidrologías, y/o afloramientos termales y datos históricos de exploración, e
- Información de exploraciones anteriores o pozos que pueden haber sido perforados en el área de interés

### **3) El Banco Interamericano de Desarrollo (BID) en Conjunto con ISAGEN**

#### **Barreras:**

- Falta de Capacidades locales. Consultoría especializada, para estudios exhaustivos de caracterización y modelamiento del recurso.
- Falta de regulaciones de mercado que reconozcan los aportes de la geotermia a la confiabilidad y firmeza del sistema eléctrico.
- Falta de información y capacitación a la comunidad, sobre beneficios y riesgos de la energía geotérmica (así como de los usos productivos<sup>11</sup>).
- Carencia de infraestructura de conexión a Sistemas de Transmisión Nacional, que requiere de inversiones cuantiosas adicionales al desarrollo geotérmico.
- Falta de apoyo financiero o el acceso a mecanismos para la cobertura de riesgo en etapas de exploración.
- Dificultades de ingreso a mercados competitivos sin visión de mediano y largo plazo, debido a los altos costos de inversión y de la exploración geotérmica.
- Carencia de normatividad específica para el desarrollo geotérmico, y de integración de procedimientos legales que faciliten la reducción de tiempos de realización de las etapas de exploración, desarrollo y aprovechamiento del recurso de una manera armónica y ordenada.

#### **Soluciones:**

Fortalecer, apoyar y ampliar capacidad técnica y científica local mediante planes y programas de capacitación a nivel técnico-científico en las diferentes disciplinas requeridas.

---

<sup>11</sup> Nota agregada por el estudiante, con base en las clases del Diplomado.

#### 4) JICA y West Japan Engineering Consultants, Inc.

##### Barreras:

- Inversión inicial de \$US 10 millones en la perforación de pozos exploratorios (de producción y reinyección) para delinear el reservorio geotérmico; necesaria en el caso de otros desarrollos energéticos renovables.
- Aunque se consiga el financiamiento, se deben tomar en cuenta los riesgos asociados con los recursos del subsuelo.
- La capacidad de desarrollo no puede ser determinada sin pruebas de producción en largo plazo y usando varios pozos de producción exitosa.

#### 5) Asociación Internacional de Geotermia (IGA, sigla en inglés), Guía de las mejores prácticas para la Exploración Geotérmica,

##### Barreras:

Plantea que la gran barrera es el riesgo de la inversión en las primeras perforaciones. Adicionalmente, que la existencia de información de los siguientes aspectos representan las bases para establecer las barreras para el desarrollo de un proyecto geotérmico:

- El mercado de la energía y los posibles acuerdos de compra de energía (PPA) o tarifa de alimentación (FIT en inglés);
- otras exigencias y posibilidades adicionales / para el uso de la energía geotérmica como distrito o de efecto invernadero de calentamiento;
- problemas de infraestructura (carreteras, agua, comunicación, transmisión);
- problemas de propiedad de los recursos (en algunos países los permisos geotérmicos están bajo leyes mineras; en otros lugares puede ser considerado un derecho de agua en virtud de la legislación geotérmica específica, o un marco jurídico pertinente no podría existir);
- las cuestiones ambientales y sociales;
- marcos institucionales y regulatorios;
- cuestiones relativas a la estabilidad política y financiera;
- recopilación e interpretación de la teledetección disponibles o los datos reconocimiento aéreo;
- La información de la literatura disponible en todos los sistemas geotérmicos conocidos, incluyendo geológicas, hidrológicas, datos de fuentes hidrotermales, datos históricos de exploración; e
- información de exploraciones anteriores o pozos que pueden haber sido perforados en el área de interés.

## 6) IRENA<sup>12</sup>

### **Barreras**

- Políticas y regulatorias: Pocas o ninguna regulación específica para abordar geotérmica exploración y explotación. Carencia de redacción regulaciones ambientales - en el puesto de trabajo, intercambio de experiencias, el apoyo de expertos (ex, conflictos territoriales con comunidades nativas). Falta Identificar los mecanismos que impiden que las empresas especulativas en el proceso de concesión de licencias
- Técnicas: Geociencias: perforación, recursos / estimación e ingeniería de reservorios / modelado, operaciones. Geotermica básica, educación de los interesados concertación de medio ambiente. Conocimiento y la experiencia de intercambio, formación en el puesto de trabajo, la retroalimentación e intercambio de expertos. Experiencia del gobierno es baja y puede continuar así a largo plazo (sin la suficiente atención en el sector de la educación). Capacitación para ingenieros de producción y personal de mantenimiento. Empresas parte importando de expertos, parte entrenado dentro del trabajo.
- Financieras: Financiamiento y apoyo para cubrir seguros de perforación, puesta de equipos en la región, diseño de subsidios condicionados, herramientas para absorber los riesgos de la exploración.

## 7) Grupo Bancario KfW

### **Barreras**

- Financieras: Costo de capital más elevado, Bancos comerciales se muestran reticentes en otorgar créditos para ER/ EE, Falta de garantías. Solución: Programas promocionales de financiamiento.
- Falta de conocimiento/ conciencia / tecnología: Gobiernos, Instituciones Financieras, Desarrolladores/ Empresas/ Hogares
- Marcos jurídicos y regulatorios inadecuados: Falta de normas, reglas, leyes. Tarifas subvencionadas. Solución: Asistencia técnica, conciencia e información.
- Falta de fondos públicos: Promoción de programas con tasa de intereses reducida. Asistencia técnica. Solución: Legislación, Normas y Reglas. Estándares técnicos, incentivos tributarios para EE y ER.

---

<sup>12</sup> Tomado de: Presentación IRENA: Capacity Building for Geothermal, Kavita Rai, French Side Event - World Future for Energy Summit, Abu Dhabi, 20th January 2014

## 7.2 Indicadores

De acuerdo a OLADE, 1994, algunos indicadores útiles necesarios para valorar los beneficios de involucrar la energía geotérmica en la canasta de generación de un país pueden ser:

- En lo económico la composición de la matriz energética de generación y el peso de económico de las importaciones.
- Los ahorros de la demanda por reducción del precio de la generación,
- En lo energético: independencia, robustez y seguridad en el suministro energético nacional (ajustado en el presente trabajo).
- En lo ambiental la reducción de gases de efecto invernadero
- En lo social, generación de empleo y mejores condiciones una energía menos costosa y mas confiable.

Sin embargo para el seguimiento de cada etapa de desarrollo del proyecto pueden construirse algunos de los cuales solamente se mencionan a continuación:

Construcción de indicadores para la toma de acciones en lo económico, energético, social, ambiental de acuerdo al contexto de cada país. Ejemplos de indicadores son los siguientes en cada etapa de desarrollo tomando como referencia lo mas recientes de la Agencia Internacional de Geotermia (IGA en Ingles), 2014 y de ESMAP, 2012:

- Indicadores etapas de exploración: Existencia del recurso: existencia de anomalías (fumarolas, hidrotermales, gradiente térmico, aprovechamientos locales del agua caliente)
- Indicadores etapa de prefactibilidad: Existencia del recurso: Existencia de anomalías en tierra (fallas, gravimétricas, magnéticas), agua (químicas), aire (de gases), bases de datos de esta información, existencia de antecedentes de acuerdos y permisos ambientales, sociales, base de datos de partes interesadas (stakeholders, social, ambiental, económico y financiero), locales, regionales, nacionales y globales, conocimiento de procesos y normas y costumbres, condiciones económicas, sociales y políticas de la zona, existencia de programas públicos o privados en ejecución en la zona, útiles para cada etapa del desarrollo geotérmico en lo social y ambiental.
- Indicadores de Factibilidad: cuantificación del recurso, la generación posible y su incertidumbre, existencia de acuerdos y permisos, confluencia de intereses de los principales stakeholders en la realización del proyecto, plan de seguimiento y trazabilidad de procesos y resultados. Existencia de fuentes de financiación aprobadas.
- Indicadores desarrollo de campo de pozos: No. de pozos producción, reinyección, monitoreo y fallidos, y sus capacidades. Los bancos tienen recomendaciones al respecto.

## 8 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

### 8.1 Resumen de Barreras



Figura No. 18, Barreras principales para el desarrollo de la geotermia

La Figura No. 18, muestra las principales barreras encontradas categorizándolas de acuerdo a su incidencia o consecuencia en las demás, en este sentido el conocimiento resulta ser la base para remoción de las barreras, la información y el conocimiento son básicos en cualquier actividad, este rige la organización de los Estados y las normativas e institucionalidades existentes, las cuales a su vez permiten con base en él valorar la necesidad de infraestructuras necesarias en un determinado sector acorde con las prioridades económicas, de no darse un adecuado encadenamiento de estos elementos persistirán riesgos que dificultaran las inversiones. A continuación se exponen cada una de ellas.

#### 8.1.1 Conocimiento

1. Falta de desarrollo de capacidades técnicas, formación y educación local en geotermia (geociencias, financiero, ingenieril, regulatorio, planeamiento, ambiental y político).
2. Falta de bases de datos consolidadas y estandarizadas como repositorios nacionales de datos para fines académicos y productivos. En todas la geociencias, sin perder de vista lo social, cultural, económico y ambiental.
3. Se plantea la Falta de Estándares para las primeras etapas de exploración, que garanticen una mejor trazabilidad de la calidad.

4. Aún cuando en el caso El Salvador actualmente esta superada, cuentan con recurso humano muy capaz, en el caso de la mayoría de países Latino americanos persiste la falta de capacidades y conocimiento. Sin embargo para los pises donde ya existen capacidades la barrera puede relacionarse con temas de tecnologías de punta y de estudios económicos que potencien mas los desarrollos geotérmicos (en geociencias, laboratorios, e investigaciones) y el relevo generacional con iguales o mejores capacidades a las actuales.

### 8.1.2 Marco legal e institucional

1. Marco legal sobre la propiedad y administración del recurso del subsuelo, normativas y procedimientos par el licenciamiento ambiental y el seguimiento y monitoreo ambiental, incluyendo la sostenibilidad del recurso.
2. Marco legal de acompañamiento institucional y campañas educativas con instituciones locales, sobre la energía geotérmica, sus usos productivos posibilidades de generación de empleo e industria, de usos directos (en cascada, ver *Figura No. 14*) y de generación de electricidad.
3. Normativas de incentivos basados en evaluaciones beneficio/costo

### 8.1.3 Infraestructura

Falta de infraestructura y falta de metodologías que determinen los beneficios económicos para la demanda, provenientes de la generación con geotermia.

### 8.1.4 Financiamiento y cobertura de riesgos

1. Inversión y riesgo inicial altos, sin embargo ESMAP aun cuando el riesgo no lo plantea en esta barrera, es necesario tener cuidado para que los resultados de las etapas iniciales sean adecuadamente estudiados, la experiencia en El Salvador muestra por ejemplo en el Campo Geotérmico de Ahuachapán que el riesgo de la perforación ha sido minimizado al limite, lo cual plantea que el riesgo podría relacionarse mas con la falta de calidad de los estudios previos a la perforación la cual desencadenaría una gran perdida en la etapa de las primeras perforaciones, lo anterior puede tener fundamento si se considera que no existen estándares para muchos de los procedimientos de toma de datos en campo y el procesamiento de los mismos de manera certificada. Solamente en los casos donde existe una gran experiencia de campo y procedimientos muy cuidadosamente realizados.
2. Garantía de flujo de caja que garantice cumplimiento de la deuda.

## **8.2 Hoja de ruta**

Se considera recomendable seguir un estándar mas detallado de las fases de el proyecto geotérmico en tal sentido estaría muy bien considerar las fases del royecto propuesta por ESMAP:

Fase 1: Estudio preliminar,

Fase 2: Exploración (Modelo conceptual, No Datos Técnicos Compilación, Estudio de Prefactibilidad),

Fase 3: Prueba de perforación (Actualización del Modelo Conceptual, Modelado Numérico),

Fase 4: Revisión y Factibilidad del Proyecto,

Fase 5: Desarrollo del Campo,

Fase 6: Construcción,

Fase 7: Pruebas de puesta en marcha y

Fase 8: Operación

La hoja de ruta pretende establecer un camino que aun cuando genérico sea claro y justificado de realizar para el desarrollo de un proyecto geotérmico. En tal sentido es necesario establecer dos estados el inicial, donde no existe proyecto geotérmico y el final donde se tiene un proyecto geotérmico en perfecto funcionamiento. La hoja de ruta establece una serie de recomendaciones generales que soportadas en las experiencias previas de desarrollos de proyectos geotérmicos en el mundo e identificadas en las barreras planteadas, en el numeral 8.1, busca para cada etapa de desarrollo aportar una guía de los requerimientos fundamentales que buscan hacer mas fluido el desarrollo para reducir los riesgos de inconvenientes que retrasen el aprovechamiento productivo y eficiente de la energía geotérmica. Es necesario tener como mínimo:

- a. Conocimiento de guías, metodologías y buenas practicas (OLADE, IGA, ESMAP)
- b. Información del recurso.
- c. Normatividad sobre el recurso, social, energética y ambiental aplicable.
- d. Propiedad, derechos. Permisos, licencias , procesos y tiempos
- e. Evaluación de estimación de beneficios y costos
- f. Dimensionamiento de la primera aproximación al tamaño del reservorio y recurso sostenible utilizable, así como de la capacidad posible de producción de electricidad.
- g. Determinación de recursos y costos y fuentes de financiación y aseguramiento.
- h. Establecimiento de estándares existentes aplicables para una trazabilidad de la calidad de los resultados asociados a cada etapa de las guías o metodologías y de los modelos, (útil para los promotores, el gobierno, los inversionistas y las agencias de financiamiento y aseguradoras), esto debe incluir a mediano plazo la

operación y mantenimiento de las plantas geotérmicas, los sistemas de acarreo y la ingeniería de reservorios que se aplica en los campos geotérmicos.

- i. Planeación de la estrategia de implementación del proyecto.

Para poder realizar la hoja de ruta planteada se requiere desarrollar inventarios de la información y conocimiento, una logística para su adquisición en bases de datos adecuadas con control de calidad e indicadores que la califiquen.

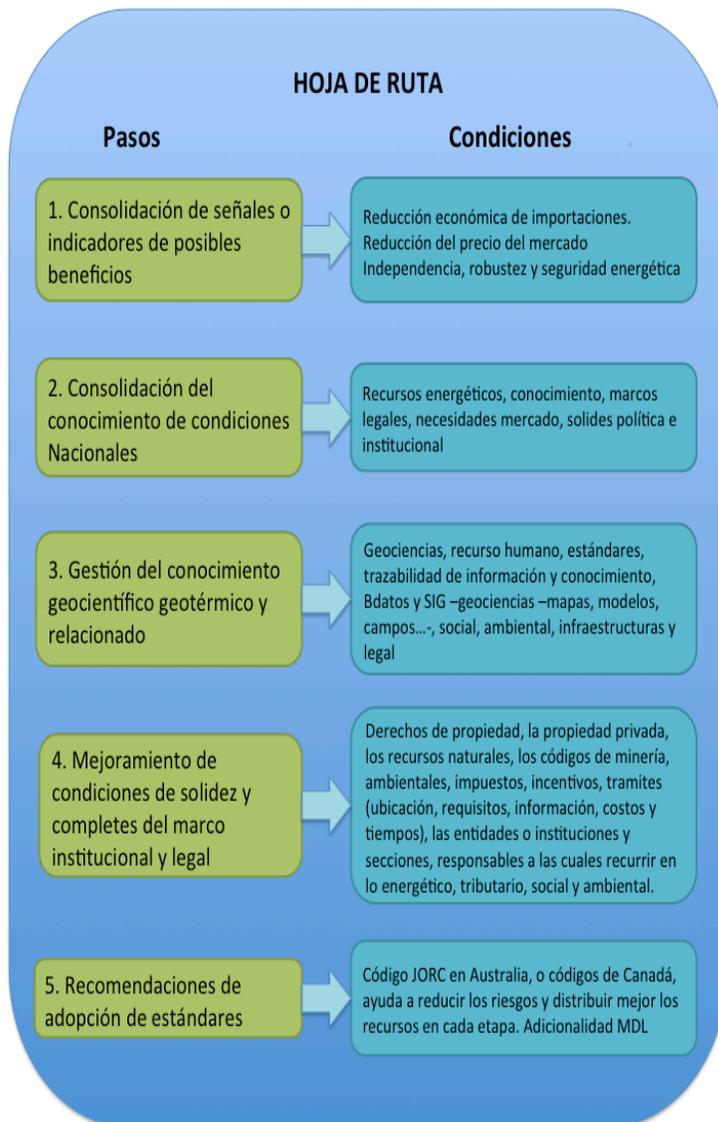


Figura No. 19, Hoja de ruta y condiciones

La *Figura No. 19*, muestra un diagrama con los pasos y la orientación de las condiciones que se buscarían conseguir en cada paso.

La hoja de ruta considera importante tomar como referencia la clasificación de fases del proyecto geotérmico de ESMAP, por ser la mas diferenciada y tener en consideración una actividad explicita de prueba del campo y la planta geotérmica con puesta a punto.

Los desarrollos energéticos de cada país en general dependen de las *condiciones locales de desarrollo, disponibilidad de recursos energéticos, conocimiento, necesidades energéticas, de las reglas de mercado y la solides institucional y política*, lo cual en principio debe coincidir con la visión y estrategia para lograr un mejor futuro económico y de bienestar de cada país, los siguientes son los puntos que se sigue seguir en la hoja de ruta:

### 8.2.1 Consolidación de señales o indicadores de posibles beneficios

Es conveniente realizar con la experiencia local y/o internacional un acercamiento a los beneficios posibles de los proyectos geotérmicos, para el Estado es muy importante contar a la hora de definir planes nacionales energéticos y eléctricos contar con estos referentes ya que viabilizan referentes para la toma de decisión y las acciones a ejecutar y apoyar, a partir de lo cual se soportan inversiones en los siguientes puntos o pasos de la hoja de ruta.

### 8.2.2 Consolidación del conocimiento de las condiciones locales

*Las condiciones locales de desarrollo*, están determinadas por el valor agregado que el país le da sus bienes y servicios y que tan competitivos son en una economía, local y/o global. *La disponibilidad de los recursos energéticos* depende de los precios de mercado y las alternativas existentes de abastecimiento en el país, para el caso del recurso geotérmico de la facilidad de acceso a sus potenciales y de lograr su aprovechamiento de manera competitiva y sostenible para la sociedad en su conjunto<sup>13</sup>.

### 8.2.3 Gestión del Conocimiento geocientífico geotérmico y relacionado

El *conocimiento* es crucial para cualquier desarrollo energético, particularmente para el caso geotérmico, en lo geocientífico i) inicia con las alteraciones hidrotermales y fumarolas seguido individual y colectivamente con la geología, el vulcanismo, la geoquímica y la geofísica, ii) el más crítico de los factores es en el cual reside el conocimiento “el recurso humano” adecuadamente formado en esas temáticas y con experiencia. Debe contarse durante las investigaciones de estándares adecuados en la toma y análisis de datos y muestras, con trazabilidad de la calidad de los procedimientos y sus resultados, los cuales deben ser adecuadamente dispuestos y custodiados en bases de datos e información, asociados o integrados en sistemas de información geográfica, para lo geocientífico, lo social, lo ambiental, lo legal y de infraestructuras, ya que las capacidades de estos sistemas facilita la comparación y e integración de los conocimientos geocientíficos (geología, geoquímica y geofísica) y la realización de los modelos asociados de los sistemas geotérmicos, individualmente o de forma integrada y en tres dimensiones incluyendo la información de los pozos de exploración, producción, reinyección y monitoreo, como la infraestructura propia del proyecto como la externa necesaria.

### 8.2.4 Mejoramiento de condiciones de solidez y completos del marco institucional y legal

*La solides institucional y política*, permiten establecer las condiciones de ejecución en las cuales una vez tomada la decisión se realizará el proyecto en un país determinado, asuntos como los derechos de propiedad, la propiedad privada, los recursos naturales, los códigos de minería, ambientales, impuestos, incentivos, tramites (ubicación, requisitos,

---

<sup>13</sup> Se refiere a que la visión de la producción de energía geotérmica desde el inversor tiene la óptica de la mayor rentabilidad en un plazo de tiempo corto menor a 20 o 30 años, mientras la de la sociedad es de varias generaciones mucho mayor a estos tiempos.

información, costos y tiempos), las entidades o instituciones y secciones, responsables a las cuales recurrir en lo energético, tributario, social y ambiental.

Adicionalmente, conocer los aspectos planteados para los estudios previos, permisos ambientales e instrumentos de posibles acuerdos sociales, se requiere evaluar desde lo energético las condiciones de entrada a la red de transporte de energía eléctrica, en cuanto a las condiciones de calidad de la energía y requisitos técnicos, establecer los posibles precios que en el mercado competitivo podrían remunerar la actividad de producción de energía, tipos de contratos, así como cuales son *Las reglas de mercado y del despacho* como se asigna el precio, las normativas y resoluciones, como se logra constituir como empresa de generación, la liquidación de las ventas con base la medición en las fronteras eléctricas de la planta, los precios promedios de la generación de energía así como las condiciones de entrada y salida del mercado.

Es fundamental tomar como referencia los planes de expansión del sector eléctrico con sus proyecciones de demanda y alternativas de generación actuales y futuras, al igual que tomar nota y consultas de las fuentes de información sectorial en aspectos técnicos (energéticos y ambientales), regulatorios y políticos, lo cual dará cuenta de *las necesidades energéticas*, y de las oportunidades del proyecto.

**Recomendaciones:**

Considerar utilizar o crear un estándar como el Código JORC ya que proporciona normas mínimas para la información pública para asegurar que los inversores y sus asesores tengan toda la información que razonablemente requerirían para formar una opinión fidedigna sobre los resultados y las estimaciones que se informa en el proyecto. Código JORC, Edición 2004. [http://www.jorc.org/docs/jorc2004web\\_v2.pdf](http://www.jorc.org/docs/jorc2004web_v2.pdf)

Utilizar la Herramienta para la Demostración y Evaluación de Adicionalidad, aprobada por la Junta Ejecutiva del MDL de la UNFCCC, puesto que los proyectos de energía geotérmica tienen la oportunidad de demostrar la adicionalidad mediante un análisis de inversión o análisis de barreras.

## **8.2.5 Condiciones para el desarrollo adecuado de la hoja de ruta**

### **8.2.5.1 Información**

- a) Lugares:
  - i) Geociencias: geología (mapas geológicos y escalas, vulcanismo, fallas, etc.), teledetección (campañas aéreas, satelitales, trabajos previos), bases de datos existentes y nivel de acceso (requerimientos costos)
  - ii) Condiciones locales sociales, ambientales, usos del suelo (posibles fuentes de información geológica, física o química del recurso, sinergias en campañas, educativas)
  - iii) Infraestructura de comunicaciones y de energía
  
- b) Política, institucionalidad, normas y regulaciones sectoriales, planes sectoriales
  - i) Social
  - ii) Ambiental
  - iii) Energética

- iv) Transporte
- c) Estándares técnicos aplicables a la geotermia y/o la minería
- d) Metodologías, guías y buenas prácticas en el desarrollo de proyectos geotérmicos de electricidad y para usos directo
- e) Fuentes de financiamiento
  - i) Bancos, fondos, facilidades
  - ii) Inversionistas (agentes sectoriales, gobierno, privados, otros)

#### **8.2.5.2 Logística para desarrollar el ítem de “Información”**

- a) Fuentes de información web y física
- b) Elaborar un directorio de contactos y personas clave del listado de información.
- c) Diseño de una base de datos y un sistema de información geográfico (SIG) para la captura, almacenamiento, custodia y control de calidad y trazabilidad y, procesamientos de información, generación de reportes para decisiones y análisis técnicos y gerenciales.
- d) Establecimiento de un cronograma con agendas para las reuniones de recolección y consulta de información y conocimiento.
- e) Diseño de una estrategia de recolección y consulta de información y conocimiento para cada ámbito o sector.
- f) Diseño y elaboración de formatos de captura de datos, información y conocimiento de las diversas fuentes, metadatos y trazabilidad (y calificación) de su calidad. Debe incluir tiempo real del levantamiento la evaluación y calificación de su utilidad.
- g) Diseño de procesos de la base de datos y del SIG, definición de alcances, entradas, procesos y salidas (reportes, incluyendo indicadores como los planteados en el ítem 3).
- h) Establecimiento de citas y reuniones, ajustes al cronograma y ejecución de mediante jornadas.

#### **8.2.5.3 Indicadores de condiciones favorables o no favorables**

A continuación se establece una propuesta inicial indicadores útiles desde del ámbito del planeamiento, los cuales una vez realizados pueden ser extendidos a todas las etapas o fases del desarrollo de un proyecto geotérmico, incluyendo su la sostenibilidad del recurso.

- a) Locales:
  - i) Existencia del recurso: número de anomalías y rangos (hidrotermales, térmicas, gradientes de temperatura, etc), número de fallas, tipo de formaciones geológicas y profundidades, número de volcanes, etc..
  - ii) Numero y calidad de las actividades económicas en la zona
  - iii) Porcentaje de áreas restringidas o especiales por sector social y ambiental.

b) Sectoriales:

- i) Existencia y cobertura de normativas y regulaciones aplicables calificando vacíos, favorabilidad o no. número de experiencias previas geotérmicas y mineras o energéticas.
- ii) Cercanía a infraestructura de comunicaciones y de transporte de electricidad considerando capacidades, y número normativas (mecanismos) para su construcción por parte de la demanda o del Estado.
- iii) Número de permisos o acuerdos requeridos para la actividad de la generación con geotermia tiempos y costos, Número de procesos tiempos y costos requeridos, mecanismos de apelación o ajustes, sanciones, número de experiencias previas en proyectos geotérmicos.
- iv) Número de instituciones con conocimientos de geotermia (geología, geofísica, geoquímica, vulcanología), Número de personas profesionales con conocimientos en geotermia y calificación por sector energía eléctrica, ambiental, social.

c) Técnicas

- i) Número de estándares aplicables,
- ii) Número de laboratorios y porcentaje de cumplimiento de necesidades para los desarrollos geotérmicos.

d) Sociales

- i) Número de habitantes de la zona,
- ii) Número de empleos de la zona,
- iii) Número de instituciones educativas en la zona, Número de campañas educativas en la zona.

e) Ambientales

- i) Número e intensidad de restricciones.
- ii) Número de procesos para el licenciamiento y Tiempo

- f) Económicas. El valor de los posibles beneficios económicos nacionales, cuentas de carbono, y de mercado en la diversificación de las fuentes de suministro, robustecimiento de la matriz de generación, seguridad energética, mejora de la competitividad del mercado, reducción de importaciones y de generación mas costosa.

Establecer un indicador económico es crucial ya que permite o ayuda a la toma de decisión y a configurar la participación del Estado en la solución de las barreras, este debe cuantificar un posible impacto del proyecto geotérmico en la economía, un ejemplo de indicador a nivel nacional puede construirse a partir de series históricas tanto de producción de electricidad como de su precio (\$/kWh), y puede constituirse como un referente deseable para la toma de decisión, que facilite el apoyo y acompañamiento por parte del Estado al desarrollo geotérmico.

Finalmente, si se establece una hoja de ruta que puede aportar a la toma de decisiones para el desarrollo de los proyectos geotérmicos, soportada

económicamente en un beneficio cuantificado como por ejemplo, en la reducción del precio del kWh. Este beneficio puede superar el coste de la infraestructura de transmisión asociada a la electricidad geotérmica.

#### 8.2.5.4 Ejemplo de indicador económico del beneficio de un proyecto geotérmico hipotético.

En este trabajo realiza un ejercicio inicial donde se ha tomado datos de El Salvador del año 2010 y de Colombia del año 2005, buscando establecer una aproximación metodológica básica, para determinar un indicador de beneficio económico, a partir de datos históricos de la generación de electricidad tanto hidroeléctrica como térmica fósil (MWh) y del precio de la electricidad en el mercado nacional (US\$/MWh).

La metodología es muy sencilla, consiste en considerar un periodo de tiempo determinado T, mínimo un año, donde se cuente con información histórica, mínimo a nivel mensual  $t_i$  (el subíndice "i" se refiere al mes del año: 1 = enero, 2 = febrero, ..., 12 = Diciembre), de la generación de electricidad despachada en el mercado  $g_{ji}$  por las diferentes fuentes de generación, agrupadas por hidroelectricidad, térmicas y otras renovables, si las hay, (por ejemplo, el subíndice "j" puede tomar los valores de h = hidro, t = térmica, g = geotérmica...). Para el caso del precio promedio del mercado para el mes  $t_i$  se denota por  $p_i$  ( $p_1$  correspondería el precio del mercado del mes de enero,  $p_2$  al de febrero y así sucesivamente). De esta manera a cada  $t_i$  le corresponde una generación  $g_{hi}$ ,  $g_{ti}$  y  $g_{gi}$  y un precio  $p_i$ , por ejemplo para el mes de enero: las generaciones  $g_{h1}$ ,  $g_{t1}$  y  $g_{g1}$  son la generación hidro, térmica y geotérmica del mes de enero, a las cuales un único precio promedio de mercado  $p_1$ , precio del mes de enero. La Tabla 6 y al Tabla 7 contienen tienen las generaciones y precios de mercado de El Salvador para el año 2010 y de Colombia para el año 2005, respectivamente.

Tabla 6, Datos de generación total y por fuente y precio medio promedio mensual para el año 2010, El Salvador

#### Caso real El Salvador

	2010	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Total Generación	GWh	470,84	442,12	507,92	481,44	485,18	474,94	501,79	494,82	479,19	490,98	441,53	437,05
Hidro (ghi)	GWh	100,689	95,3652	98,2256	103,724	141,38	245,785	293,974	284,179	265,762	216,582	132,467	100,848
Geotérmica (ggi)	GWh	121,604	94,7195	109,393	120,992	122,783	113,517	126,173	127,4	122,885	127,067	115,337	125,588
Térmica (gti)	GWh	248,549	252,037	300,307	256,72	221,015	115,633	81,6401	83,2441	90,5479	147,327	193,727	210,61

Precio medio del Mercado ( $p_i$ )	US\$/MWh	133	147,61	148,75	152,9	145,84	114,59	97,96	87,91	92,54	118,14	139,17	137,41
máximo precio US\$/MWh		152,9	175,07	187,25	198,95	198,95	188,74	175,27	143,02	131,8	199,91	160,55	190,95
mínimo precio US\$/MWh		87,91	104,34	121,33	116,11	116,11	84,18	61,03	47,72	47	96,75	54,98	94,77
Gen Ter Max MWh		300306,5											
Gen Ter Min MWh		81640,1											
delta precio ( $\Delta p$ ) US\$/MWh		64,99											
delta Gen Ter ( $\Delta g_t$ ) MWh		218666,4											
Razón de cambio $r = \Delta p / \Delta g_t$		0,0002972											

Fuente: Boletín Estadístico, SIGET, 2010

El procedimiento para calcular el indicador de beneficio hipotético tiene los siguientes pasos aplicados al caso de El salvador (ver la Tabla 6) y al final solamente nos referiremos al resultado de Colombia:

1. **Máxima variación de la generación** térmica promedio mensual en el periodo (T=2010). Se establece los valores máximos y mínimo y su diferencia de la generación térmica, max ( $g_{ti}$ ) y min ( $g_{ti}$ ), del periodo de tiempo considerado, para el caso de la Tabla 6 son:

$g_{tmax} = g_{t3} = 300,307 \text{ GWh} = 300306,5 \text{ MWh}$ : es decir que la generación térmica máxima fue la del mes de marzo del año 2010.

$g_{tmin} = g_{t7} = 81,64 \text{ GWh} = 81604,1 \text{ MWh}$ : es decir la generación térmica mínima fue la del mes de julio del año 2010.

Le corresponde una máxima variación de delta de generación  $\Delta g_t = (g_{tmax} - g_{tmin})$

$$\Delta g_t = 300306,5 \text{ MWh} - 81604,1 \text{ MWh}$$

$$\Delta g_t = \underline{\underline{218666,4 \text{ MWh}}}$$

2. **Máxima variación del precio promedio mensual de la energía en el mercado** en el periodo (T=2010). Se establece los valores máximos y mínimo del precio del mercado US\$/MWh, max ( $p_i$ ) y min ( $p_i$ ), del periodo de tiempo considerado, para el caso de la Tabla 6 son:

$p_{max} = p_4 = 152,9 \text{ US\$/MWh}$ : es decir el mayor precio del periodo fue el mes de abril del año 2010.

$p_{min} = p_8 = 87,91 \text{ US\$/MWh}$ : es decir precio el menor del periodo fue el mes de agosto del año 2010.

Le corresponde una máxima variación de delta de precio  $\Delta p = (p_{max} - p_{min})$

$$\Delta p = 152,9 \text{ US\$/MWh} - 87,91 \text{ US\$/MWh}$$

$$\Delta p = \underline{\underline{64,99 \text{ US\$/MWh}}}$$

3. **La razón de cambio del precio en función de la generación térmica.** Se establece una aproximación gruesa inicial mediante una **razón "r"** entre el máximo cambio de precio  $\Delta p$  y el máximo cambio generación térmica  $\Delta g_t$  en el periodo considerado lo que permitiría establecer por lo menos el orden de magnitud de un posible reemplazo de energía térmica fósil por geotérmica:

$$r = \Delta p / \Delta g_t$$

En el caso del ejemplo r sería 0,0002972 (US\$/MWh)/MWh

Tabla 7, Datos de generación total y por fuente y precio medio promedio mensual para el año 2005, Colombia

Caso real Colombia

	Año 2005	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Total Generación	GWh	3.947,88	3.685,78	4.003,21	3.948,28	4.017,60	3.900,35	4.073,54	4.223,06	4.109,05	4.103,68	4.019,02	4.176,11
Hidro (gh)	GWh	3245,71	3022,43	3301,32	3119,19	3411,71	3243,08	3270,17	3211,6	3009,26	3430,78	3413,73	3315,37
Térmica (gt)	GWh	702,17	663,35	701,89	829,09	605,89	657,27	803,37	1011,46	1099,79	672,9	605,29	860,74

Precio medio del Mercado (pi)	U\$/MWh	36,3	32,4	30,2	29,8	30,2	26,3	34,2	37,7	38,5	35,9	25,0	35,5
máximo precio U\$/MWh		38,5	175,07	187,25	198,95	198,95	188,74	175,27	143,02	131,8	199,91	160,55	190,95
mínimo precio U\$/MWh		25,0	104,34	121,33	116,11	116,11	84,18	61,03	47,72	47	96,75	54,98	94,77
Gen Ter Max MWh		1099790											
Gen Ter Min MWh		605290											
delta precio ( $\Delta p$ ) U\$/MWh		13,6											
delta Gen Ter ( $\Delta gt$ ) MWh		494500											
Razón de cambio $r = \Delta p / \Delta gt$		2,745E-05											

Fuente: XM, Informe de Operación y Administración del Mercado, 2005, Colombia, sector eléctrico

Para el caso de Colombia con los datos históricos del año 2005 de la Tabla 7 se realizan los mismos pasos del ejercicio obteniéndose que  $r$  sería 0,00002745 (US\$/MWh)/MWh).

4. El siguiente paso es establecer la **capacidad de la planta geotérmica HIPOTETICA o VIRTUAL**, se asumirá 50MW, que pudieran haber generado en el periodo de tiempo considerado, considerando el caso del El Salvador, asumiendo que sería tomadora de precio en el mercado, entrando en base de la generación, lo cual implicaría el desplazamiento (o reemplazo) de generación térmica mas costosa y la reducción por ende del precio del kWh.
5. Para establecer un **estimado de la reducción del precio del mercado** se toma en consideración la razón de cambio “ $r$ ”, considerando la planta geotérmica HIPOTETICA o VIRTUAL de tamaño pequeño, para el para el caso los 50MW = 0,05GW, la cual es menor al 25% \del parque térmico de El Salvador, con las siguientes hipótesis:
  - i. Se asume que la planta geotérmica generó en el mismo periodo de tiempo considerado un **factor de planta** medio de 0,8
  - ii. La cantidad de **energía térmica se reduce en la misma cantidad generada por la planta geotérmica virtual**, es decir  $\Delta gt = gg$  , por lo tanto la generación térmica será:

$$g'_{ti} = g_{ti} - g_g$$

- iii. El **precio medio de mercado  $p_i$  disminuye** un  $\Delta p_i$  el mes “ $i$ ” de acuerdo al la razón “ $r$ ” y a la reducción generación térmica, en este caso cada mes del año.

$$\Delta p_i = r \Delta g_t = r g_g$$

6. En consecuencia el **precio HIPOTETICO o VIRTUAL** “ $p_i$ ” será:

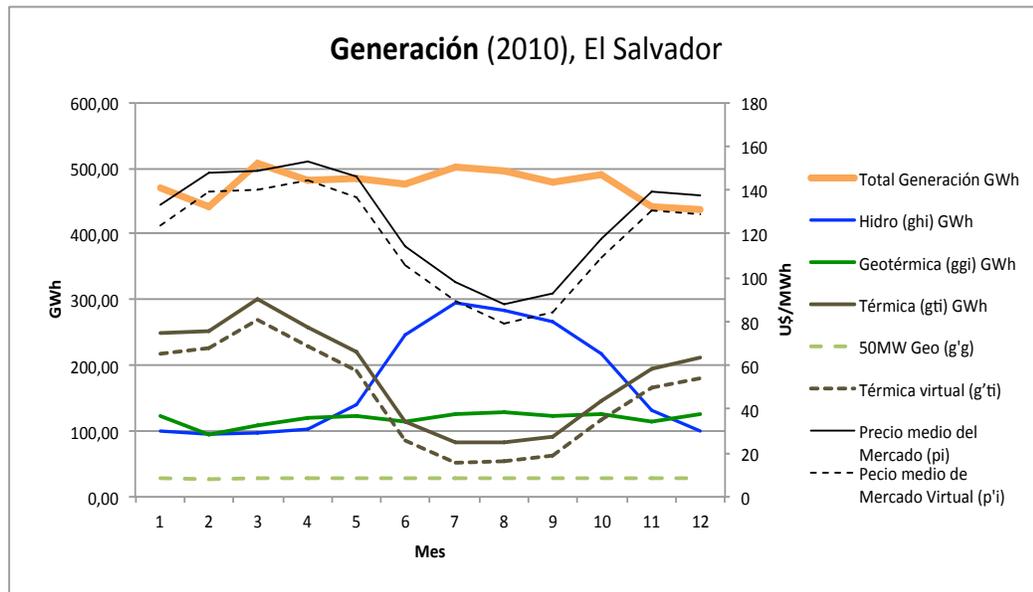
$$p'_i = p_i - \Delta p_i$$

7. **Calculo del Ahorro de la Demanda.** Los resultados para el caso de **El Salvador** aparecen en la
8. Tabla 8 los cuales se muestran gráficamente en la *Figura No. 20*, y la *Figura No. 21* correspondiendo a las hipótesis y aproximaciones planteadas, se calcula una posible **reducción del pago de la demanda nacional anual hipotético de MUS\$ 49,6**, al realizar la suma de los ahorros de la demanda a nivel mensual de la Tabla 8.

Tabla 8, Datos de generación planta geotérmica virtual (50MW) y precio virtual promedio mensual estimado para El Salvador, 2010.

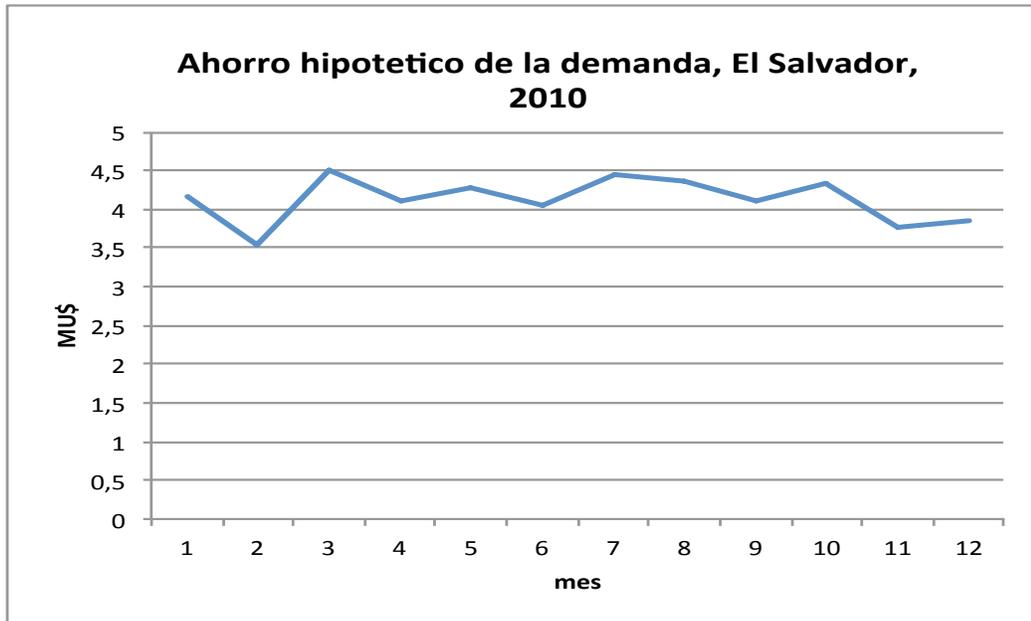
Caso Hipotético El Salvador		Año 2010											
Capacidad planta geotérmica 0,8 FP	GW	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
50MW Geo (g'g)	GWh	29,76	26,88	29,76	28,8	29,76	28,8	29,76	29,76	28,8	29,76	28,8	29,76
Térmica virtual (g'ti)	GWh	218,789	225,157	270,547	227,92	191,255	86,8331	51,8801	53,4841	61,7479	117,567	164,927	180,85
Precio medio de Mercado Virtual (p'i)	US\$/MWh	124,155	139,621	139,905	144,34	136,995	106,03	89,115	79,065	83,9803	109,295	130,61	128,565
Ahorro de la demanda	MUS\$	4,16459	3,53212	4,49259	4,12094	4,29139	4,06529	4,4383	4,37671	4,10175	4,34268	3,77936	3,86566

En la *Figura No. 20* se observa para el caso de El Salvador, año 2010, en líneas continuas la situación real histórica de la generación y del precio del mercado eléctrico, en líneas interrumpidas la situación hipotética virtual, mes a mes.



*Figura No. 20, Caso de comparación de la generación y precio histórico real vs la situación hipotética virtual de 50MW geotérmicos, El Salvador, año 2010.*

En la *Figura No. 21* se observa, para El Salvador en el año 2010, la evolución mensual hipotética del ahorro de la demanda nacional debido a la reducción virtual del precio del mercado de la electricidad, bajo las condiciones planteadas.



*Figura No. 21, Ahorro hipotético de la demanda. Caso de comparación de la generación y precio histórico real vs la situación hipotética virtual de 50MW geotérmicos, El Salvador, año 2010.*

Los resultados del Cálculo del Ahorro de la Demanda, para el caso de Colombia año 2005 aparecen en la

Tabla 9, los cuales se muestran gráficamente en la *Figura No. 22* y *Figura No. 23*, correspondiendo bajo las aproximaciones planteadas a una posible reducción del pago de la demanda nacional anual hipotético de MUS\$ 38,7.

Este resultado en El Salvador al igual que mas adelante el de Colombia, resultan muy importantes, ya que podría soportar, bajo una aproximación mas detallada, acciones concretas de los Estados, para apoyar y financiar con suficiencia, la ejecución de la hoja de ruta y los lineamientos de política planteados para desarrollar los potenciales geotérmicos, dándole la relevancia que merece este recurso en los países que poseen esta fortuna.

Las variaciones de los valores en la generación geotérmica de la Tabla 8, como los de la

Tabla 9, se deben al numero de dias de cada mes, los cuales aparecen la fila superior a cada mes, lo anterior tomando en consideracion que para la planta geotermica virtual se asume constante la generacion.

Tabla 9, Datos de generación planta geotérmica virtual (50MW) y precio virtual promedio mensual estimado para Colombia, 2005.

Caso Hipotético Colombia		GW											
Capacidad planta geotérmica 0,8 FP	0,05	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
	2005 virtual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
50MW Geo (g'g)	GWh	29,76	26,88	29,76	28,8	29,76	28,8	29,76	29,76	28,8	29,76	28,8	29,76
Térmica virtual (g'ti)	GWh	672,41	636,47	672,13	800,29	576,13	628,47	773,61	981,7	1070,99	643,14	576,49	830,98

Precio medio del Mercado Virtual (p'i)	US\$/MWh	35,5229	31,6615	29,3933	28,9818	29,3933	25,4792	33,3338	36,8364	37,7384	35,0851	24,1657	34,6473
Ahorro de la demanda	MUS	3,22475	2,71931	3,26995	3,12104	3,2817	3,08316	3,32739	3,44953	3,24813	3,35201	3,17696	3,41118

En la *Figura No. 22* se observa para el caso de Colombia, año 2005, en líneas continuas la situación real historica de la generación y del precio del mercado eléctrico, en líneas interumpidas la situación hipotetica virtual, mes a mes.

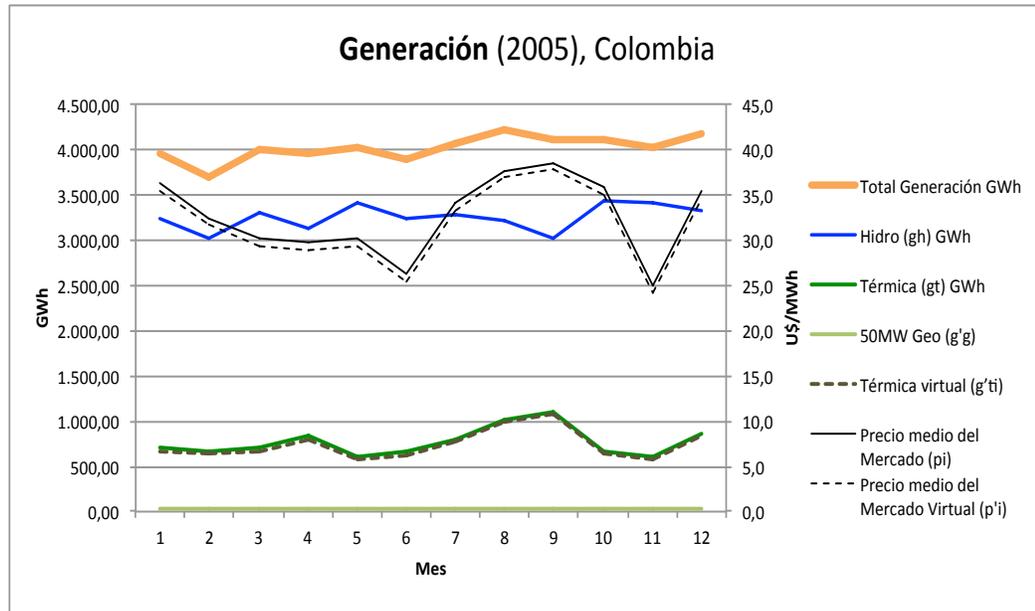
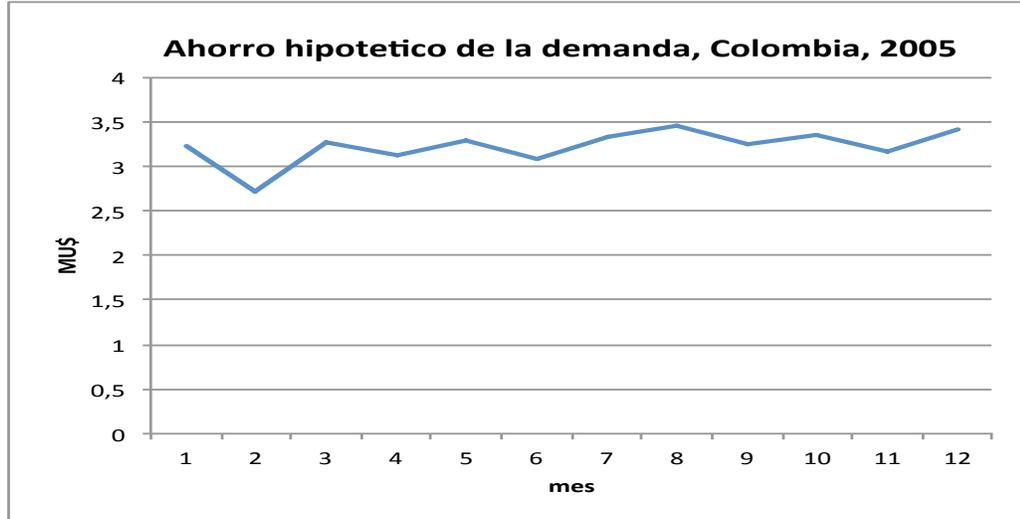


Figura No. 22, Caso de comparación de la generación y precio histórico real vs la situación hipotética virtual de 50MW geotérmicos, Colombia, año 2005.

Finalmente, la *Figura No. 23* se calculan los ahorros obtenidos, por la demanda total o la generación total que se constituirían en un beneficio para la sociedad en general y la competitividad de Colombia.



*Figura No. 23, Caso de comparación de la generación y precio histórico real vs la situación hipotética virtual de 50MW geotérmicos, Colombia, año 2005.*

### 8.2.6 Lineamientos de política

Con la finalidad de lograr un abastecimiento pleno, seguro y sostenible con las oportunidades de las fuentes renovables y competitivas (geotérmica, solar, eólica, biomásica, entre otras) cumpliendo con el principio de costo mínimo económico, social y ambiental, en condiciones de competencia. Las instituciones de planeamiento deben con ayuda de los servicios geológicos, entidades del medio ambiente y partes interesadas de cada sector (energético, financiero, ambiental, social, entre otros) establecer los beneficios principales de una generación con geotermia, igualmente generar las condiciones de capacidades locales y nacionales para su aprovechamiento oportuno, eficiente y eficaz, óptimo y sostenible. Se debe favorecer el conocimiento, las capacidades institucionales, debido a que se constituyen en una barrera al desarrollo de los proyectos por que dilata los plazos (por ejemplo por falta de conocimiento de los pobladores una protesta puede desencadenar impactos sobre los plazos y contratos), con fuertes repercusiones en costos, retardando y en un caso extremo inviabilizando un proyecto geotérmico, lo cual genera un detrimento para la sociedad y la economía por demora o pérdida de oportunidades de aprovechamiento de un recurso plenamente competitivo (ver análisis del indicador de beneficio económico del apartado anterior relacionado con los ahorros de la demanda: para el caso de El Salvador del orden de MUS\$ 50 al año y en caso de Colombia del orden de MUS\$ 40 al año).

### 8.3 Calculo de potencial con el método de volumétrico mediante una aplicación básica de Crystal Ball.

Tomando en consideración la dificultad de definir el tamaño del recurso como otro indicador a continuación se realiza una aplicación de estimación del potencial, a partir de una aplicación del conocimiento geocientífico o de ingeniería geotérmica, aplicado a un caso de Colombia.

#### 8.3.1 Búsqueda de referentes de caso para Colombia

Para realizar la aplicación del método volumétrico se buscó sobre Colombia información que permitiera un mínimo de elementos básicos para establecer una identificación gruesa del potencial, dado el interés como estudiante colombiano. Luego de una lectura de publicaciones relacionadas facilitadas por el Director del proyecto e investigaciones disponibles en La Internet (Congreso Internacional de Geotermia IGA 2015, Olade, Isagen-BID, Universidad Nacional, Servicio Geológico Colombiano) sobre estudios de exploración geotérmica en Colombia, de los consultados se establece que solamente existen estudios superficiales sin perforación profunda<sup>14</sup> (Alfaro et al, IGA 2015).

En “A Preliminary Conceptual Model of Azufral Geothermal System, Colombia” (Alfaro y Ponce et al. 2015), también presentada en el IGA 2015, se presenta un modelo conceptual inicial para el Volcán Azufral, el cual se seleccionó para realizar el ejercicio de estimación de potencial geotérmico. El Volcán se ubica en Departamento de Nariño, extremo suroeste de Colombia (Figura No. 24)

Los funcionarios del Servicio Geológico Colombiano, muestran resultados de los estudios realizados en superficie en cuanto a geología, geoquímica y geofísica, concluyendo la existencia de recursos geotérmicos con temperatura de reservorio entre 250°C y 280°C, establecen un área del reservorio de 21 km<sup>2</sup> y muestran los mapas de fallas, gravimetría, magnetometría y de resistividad de los estudios geoelectricos.

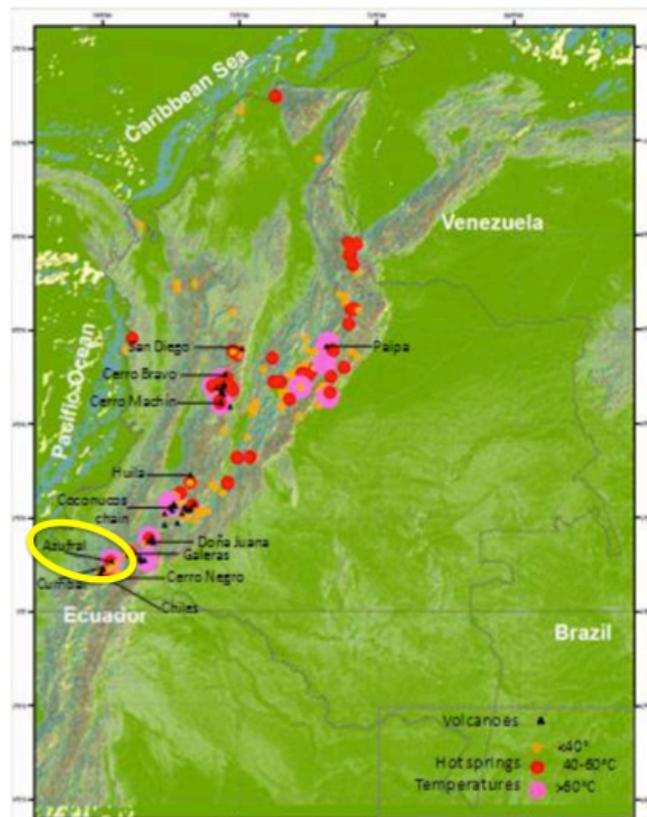


Figura No. 24, Ubicación del Volcán Azufral, Alfaro et al 2015

<sup>14</sup> Se plantea un pozo fallido en el Nereidas, Volcán Nevado del Ruiz, sin ningún avance posterior en cuanto a perforación, aun cuando se mencionan avances obtenidos por empresas colombianas de generación de electricidad, como son ISAGEN y EPM.

### 8.3.2 Determinación de parámetros para el modelo de para una aproximación al reservorio del Volcán Azufral

Para estimar preliminarmente el potencial de generación de electricidad, se establece valores o estimaciones de las variables y parámetros de entrada del Modelo Volumétrico descrito en el marco teórico: área del reservorio, espesor del reservorio, calor específico de la roca, calor específico del fluido, porosidad de la roca, temperatura media del reservorio, temperatura de abandono del reservorio, densidad de la roca, densidad del fluido, factor de recuperación de calor, eficiencia de conversión, factor de planta y el tiempo de vida útil inicial. Asimismo, se busca comprender la situación del contexto de la información con la finalidad de apropiar a el conocimiento y comprender la fenomenología a partir de los referentes aprendidos durante el Diplomado, en tal sentido es necesario aclarar que se trata de un ejercicio académico sin comprometer por sus interpretaciones al Diplomado ni al Servicio Geológico Colombiano (SGC), aclarado esto se procedimiento de la siguiente manera:

#### 8.3.2.1 Estudio del modelo conceptual.

Se estudian los antecedentes y el modelo planteado por Alfaro et al. En la *Figura No. 25* se puede ubicar la zona de interés geotérmico entre el Volcán Azufral y el Municipio de Túquerres.

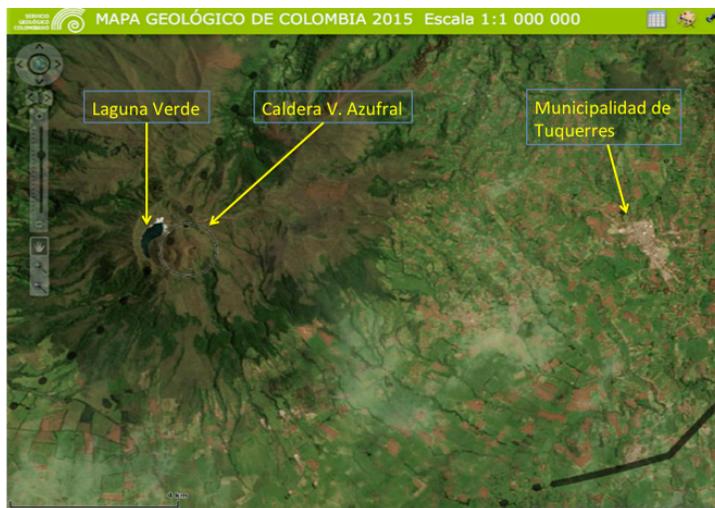


Figura No. 25, Vista de la zona del Volcán Azufral.  
[www.SGC.gov.co](http://www.SGC.gov.co)

En cuanto a los antecedentes, desde el estudio realizado en 1982 (OLADE, ICEL y Geotérmica Italiana), relacionado con la zona, solamente se tiene conocimiento que el SGC ha continuado hacia los estudios de pre factibilidad (mapa geológico y estructural, los estudios magnéticos y gravimétricos, campañas geoelectricas, alteración hidrotermal superficial y análisis de geoquímica de fluidos). Los investigadores, Alfaro et al, del SGC han integrado a lo anterior la información sísmica del programa de vigilancia de la actividad volcánica, mediante geotermómetros han inferido la temperatura los fluidos geotérmicos en 220°C, los cuales son dominados por la actividad del volcán y las fallas de la zona, encuentran un gradiente geotérmico superior a 120°C / km, y estiman que el reservorio se encuentra a una profundidad entre 2 a 2,5 km.

Los investigadores establecen el modelo conceptual de la *Figura No. 26*, en el cual se plantea que los fluidos geotérmicos en su ascenso desde la fuente de calor se mezclan (a lo largo de su trayectoria a través de las fallas) con aguas superficiales poco profundas generando manifestaciones superficiales de aguas termales y zonas de alteración hidrotermal, las cuales tienen las trazas de la isotopía de la precipitación local y de las aguas termales.

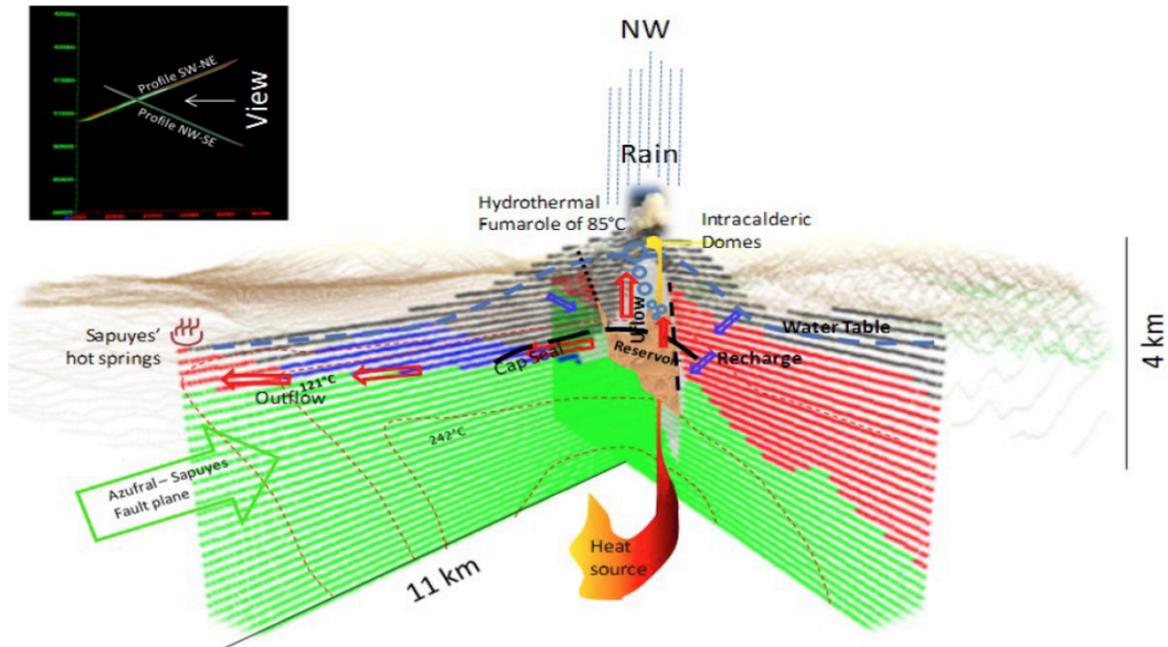


Figura No. 26, Modelo conceptual del sistema geotérmico del Volcán Azufra, Alfaro et al 2015

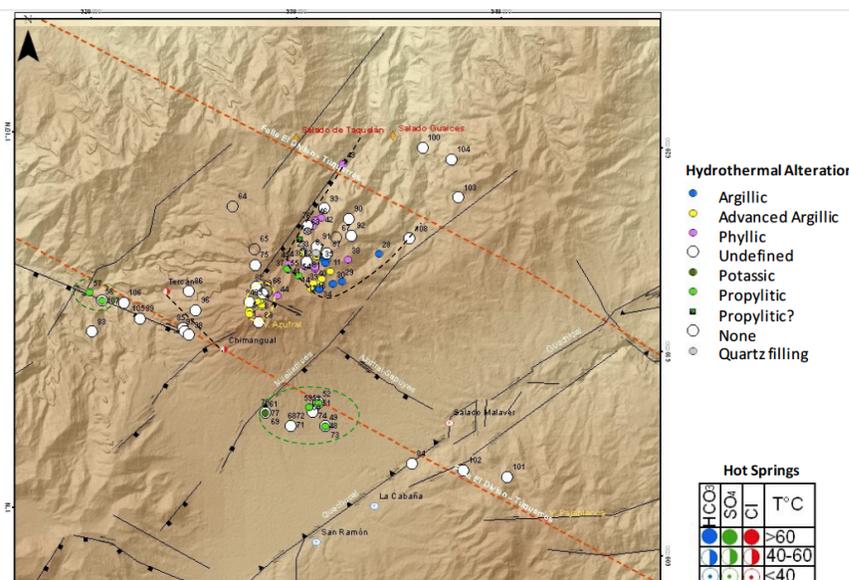


Figura No. 27, Fallas y alteraciones hidrotermales en la cercanía del Volcán Azufra (Fuente: Alfaro et al., 2015)

La zona de ascenso y ebullición, identificada por la alteración arcillosa, se relaciona con los actuales afloramientos de líquidos sulfato ácidos, en fumarolas y aguas termales, que ubica la zona de flujo ascendente, en la cumbre del volcán, por Laguna Verde (ver *Figura No. 25*). El modelo de la *Figura No. 26*, muestra un corte del cuadrante ilustrado en la parte superior izquierda de la figura, donde el



### 8.3.2.3 Determinación del espesor del reservorio

Con base en el registro geo eléctrico (Alfaro y et al, 2015) de la *Figura No. 29* donde se establece distribuciones de capas resistivas del subsuelo, la sección SW-NE (ver corte

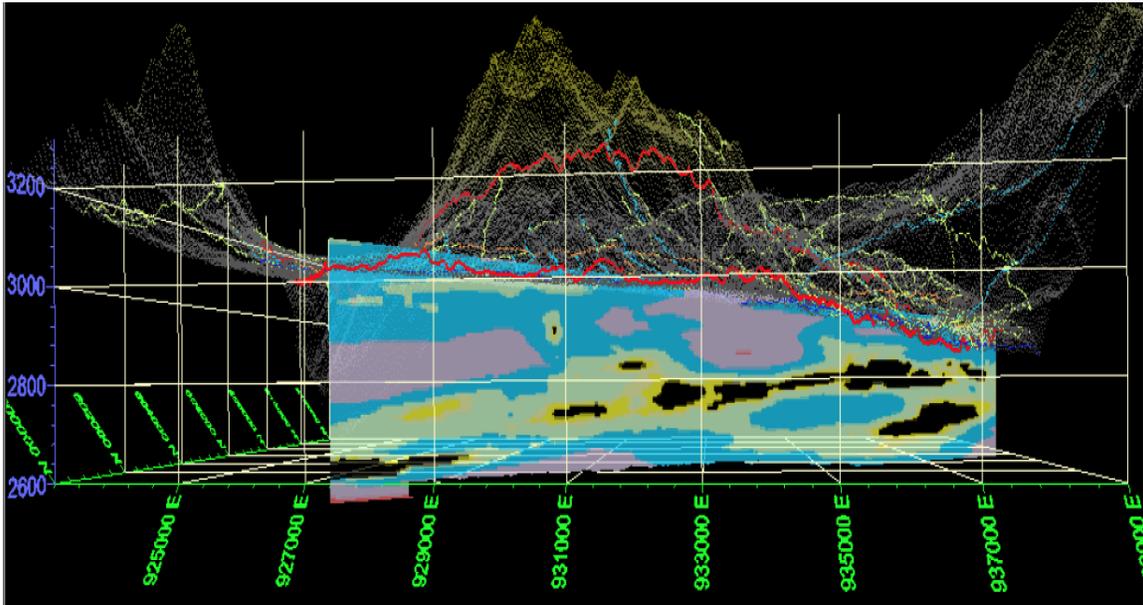


Figura No. 29, Perfil geoelectrico paralelo a Guachucal, ubicada cerca de 10 km al sureste del Volcán Azufra.

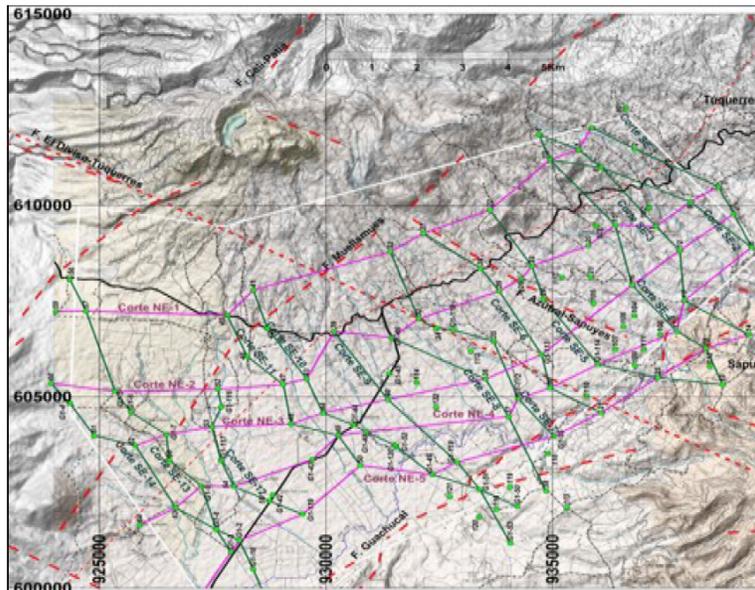


Figura No. 30, Mapa de los sondeos geoelectricos, (ver Corte NE5).

NE 5, *Figura No. 30*) semi-paralela a la Falla Guachucal, para identificar la falla también ver la *Figura No. 27*, esta ubicada cerca de 10 km en dirección al sureste del cráter Volcán Azufra, inmediaciones de los afloramientos termales San Ramón y la Cabaña, igualmente en la *Figura No. 28*, es la línea blanca que sale del Municipio Guachucal en dirección noreste.

Según Alfaro 2015, de acuerdo con la interpolación Voxler 3D (Franco, 2012) el perfil geoelectrico indica la capa

conductora menor a 16  $\Omega$ .m en color amarillo, relacionada con la circulación de fluido de poca profundidad y en color rosado resistividades asociadas a lavas o ignimbritas soldadas sobre los fluidos geotérmicos de circulación.

De la Figura No. 29 se puede establecer “espesores de reservorios” entre 100 y 200 m lo cual asociado a la gravimetría asociada al “Corte NE 5” (Figura No. 30) semi-paralelo a la Falla Guachucal, en el mapa gravimétrico de la Figura No. 28, la falla es línea blanca saliendo del Municipio de Guachucal, la cual sirve de referencia establecer que dado que la gravimetría en el área seleccionada del reservorio es menor los espesores del reservorio son mayores, por lo cual se proponen espesores de reservorio de 300 m.

Los investigadores el SGC plantean que la capa sello, se compone de sobretensiones y flujos piroclásticos con alteración hidrotermal (fílico o alteración arcillosa) o bajos niveles de permeabilidad de lava andesítica. Las principales rutas de flujo ascendente son fallos (Cali - Patía y Tercan - Fallos Chimangual) ver Figura No. 27. La zona de ebullición actual situado por encima del flujo ascendente principal está marcado en la superficie por las manifestaciones activos ácidos hidrotermales (fuentes termales y fumarolas), donde está registrada alteración arcillosa avanzada.

Para los demás parámetros se toman valores típicos para la porosidad propuestos por OLADE, 1994.

#### **8.3.2.4 Factor de recobro o de recuperación de calor $R_f$**

Watson y Maunder (1983) en su artículo “Geothermal resource assessment for power station planning” plantean valores típicos de factores de recuperación utilizados en el caso de reservorios de líquidos dominantes  $R_f$  puede asumirse inicialmente como 0,25, plantea que los investigadores Nathenson (26, 1975) y Muffler y Cataldi (27, 1977) han establecido este valor de  $R_f$  como conclusión, implícitamente éste incluye la recuperación de la temperatura del reservorio, que depende del flujo másico del agua extraída que altera la temperatura del reservorio.

Colin F. Williams (2007), Monterrosa (2007), Monterrosa (1993) referencian evidencias de otros investigadores donde son validos valores de  $R_f$  entre 0,05 y 0,2 y hace referencias a las evidencias de diversos campos geotérmicos en los Estados Unidos.

Para el caso del ejercicio conservador se asume un valor bajo de  $R_f = 0,1$

#### **8.3.2.5 Variables o parámetros de entrada al modelo**

A continuación en la tabla se resumen los parámetros y variables tomadas en cuenta para la corrida del Crystal Ball, los demás parámetros se toman valores hipotéticos típicos de acuerdo las recomendaciones de Olade 1994 y utilizadas durante el diplomado.

**Tabla 10, Variables o parámetro respecto del reservorio**

<i>Variables o parámetro</i>		<i>Mínimo</i>	<i>Probable</i>	<i>Máximo</i>	<i>Desv Est</i>	<i>Unidad</i>	<i>Fuente</i>
Área	A	5	10	15		km <sup>2</sup>	Alfaro et al 2015
Espesor del reservorio	h		300		70	m	Alfaro et al 2015
Calor específico de la roca	Cr		0,9		0,2	kJ/kg °C	Olade 1994, Diplomado
Calor específico del fluido	Cf		4,2		0,5	kJ/kg °C	Olade 1994, Diplomado
Porosidad de la roca	phi	0,06	0,1	0,12		%	Olade 1994, Watson y Maunder (1983) Diplomado
Temperatura media del reservorio.	Ti	200	230	250		°C	Alfaro et al 2015
Temperatura de abandono del reservorio	Ta		140		10	°C	Diplomado, posibles problemas con la generación de depósitos de Si en la reinyección
Densidad de la roca	rhor	2650	2700	2700		kg/m <sup>3</sup>	Olade 1994, Diplomado
Densidad del fluido	rhof	702	820	840		kg/m <sup>3</sup>	Olade 1994, Diplomado

Para el caso de la porosidad de la roca se toma el valor de OLADE, 1994 y Monterrosa 2007, las densidades, calores específicos, eficiencia de conversión, el factor de planta y el tiempo de vida útil, de los valores típicos utilizados en las clases del Diplomado de Geotermia 2015, en la temática de ingeniería de reservorios.

**Tabla 11, Parámetros de la Planta Geotérmica**

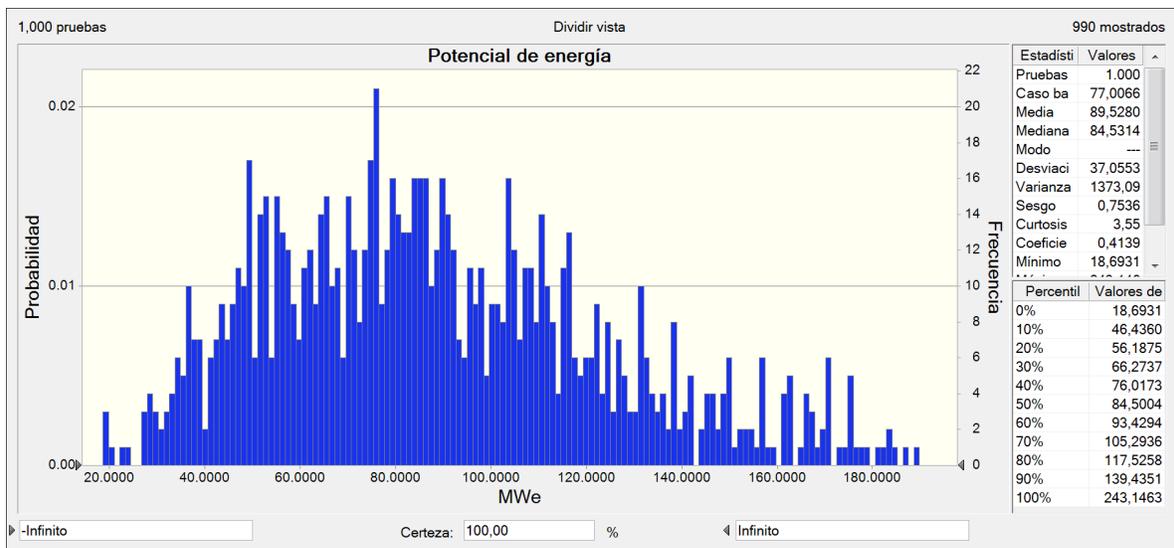
<i>Variable o parámetro</i>		<i>Mínimo</i>	<i>Probable</i>	<i>Máximo</i>	<i>Unidades</i>	<i>Fuente</i>
Potencial de energía	P		770066		MWe	Calculada
Factor de recuperación de calor	Rf	0,1	0,1	0,15	%	Colin F. Williams (2007), Monterrosa (2007)
Eficiencia de conversión	Ce	0,8	0,8	0,9	%	Olade 1994, Diplomado
Factor de Planta	Pf	0,8	0,9	0,95	%	Olade 1994, Diplomado
Tiempo de vida útil inicial	t	20	25	30	Años	Olade 1994, Diplomado

### 8.3.2.6 Cálculo de potencial y resultado del modelo

El Cálculo del Potencial o la capacidad de la planta posible de instalar se evalúa en función de la energía almacenada ( $Q_t$ ) en el reservorio, es decir en la roca y el fluido:

$$Q_t = Q_r + Q_f, \quad y \quad P = (Q_t \cdot R_f \cdot C_e) / (P_f \cdot t)$$

Finalmente, establecidas y soportadas las variables de ingreso al Crystal Ball se realizó el reconocimiento del uso de Crystal Ball, se ingresaron las variables estableciendo la característica de variable continua a cada uno de los parámetros, mediante el asociar de valores mínimos y máximos con distribuciones de tipo triangular que emularan criterios relativos a las incertidumbres propias de cada variable, o en caso contrario distribuciones normales asociando una desviación estándar, estableciendo 1000 iteraciones aleatorias con valores dentro de las incertidumbres asociadas cada parámetro o variable, la Figura No. 31 muestra los resultados obtenidos.



**Figura No. 31, Resultado Crystal Ball de Probabilidad y frecuencia de Capacidades de potencia del caso base.**

Al analizar los valores obtenidos en los estadísticos se encuentra que la capacidad posible de instalar es de 77 MWe según el caso base, sin embargo al utilizar el programa llamado "Crystal Ball" donde se involucran incertidumbres asociadas en los 12 parámetros necesarios para su cálculo, a partir de las cuales el programa aleatoriamente asigna valores para cada parámetro dentro del intervalo posible de la incertidumbre y con 1000 muestras aleatorias realiza el cálculo para cada caso obteniendo los resultados de la Figura No. 31, donde al estudiar las estadísticas asociadas, el promedio obtenido es mayor que el caso base, estableciendo una capacidad posible de 89,5 MWe un 16% por encima del caso base, entrando dentro del percentil 60%, mientras el valor del caso base está en el percentil 50%. La desviación estándar obtenida es de 37 MW, la cual considerando el valor promedio incluye el caso base. Finalmente, el percentil 10

## 9 CONCLUSIONES

- i. Se logra una aproximación a las barreras para implementar proyectos geotérmicos. Las principales barreras para el desarrollo la geotermia radican en la falta de: conocimientos como experiencias, de técnicas y tecnologías, estrategias de acercamiento a las comunidades y autoridades –locales y medioambientales-, por otra parte, vacíos normativos –desconocimiento institucional de la geotermia en cuanto a sus beneficios y costos en cada etapa del desarrollo-, dificultades de financiamiento en etapas de perforación, acompañamiento institucional inicial, entre otros.
- ii. No obstante la existencia de diversas guías para el desarrollo de proyectos geotérmicos en Latinoamérica los desarrollos geotérmicos continuarán siendo riesgosos y sensibles aun cuando los avances tecnológicos y geocientíficos contribuyan en su reducción, lograr mejorar las condiciones de entorno mediante marcos ambientales y regulatorios así como con medidas de promoción adecuadas, aportará a que de manera competitiva se reconozcan y valoren bajo reglas más claras e imparciales los beneficios y restricciones de las energías renovables.
- iii. Se aprende a utilizar el software Cristal Ball y se realiza una aproximación mediante el método de MonteCarlo al potencial geotérmico asociado al sistema geotérmico del Volcán Azufra en Colombia, para una capacidad de generación inicial promedio de 89,5 MWe.
- iv. Se establece una propuesta de hoja de ruta preliminar para el desarrollo de un proyecto geotérmico, la cual junto con los indicadores y logística de recolección de información ayuda a identificar y/o reducir riesgos o vacíos.
- v. Se logra establecer una metodología simple para cuantificar un indicador del beneficio económico de la geotérmica, aplicada a el caso de El Salvador.
- vi. El indicador económico aportaría un criterio para la toma de decisión de parte del Estado, sobre la oportunidad de apoyar facilitar inversiones para lograr estrategias y recursos institucionales, humanos y financieros para las diversas etapas del proyecto geotérmico incluyendo la interconexión.
- vii. La aplicación de la propuesta de hoja de ruta puede aportar a la trazabilidad de los resultados para facilitar hacer bancable un proyecto, y reducir de riesgos, barreras y costos desde las primeras fases del desarrollo, plantea desde el inicio es estratégica la trazabilidad de la calidad de la información y de los resultados de cada etapa de desarrollo.
- viii. Se propone indicadores cuyo análisis ayuda a medir y establecer las condiciones del entorno para el desarrollo de la fases del proyecto.
- ix. La propuesta del indicador económico simple, aplicado al caso de una hipotética nueva planta geotérmica de 50MW establece -mediante datos mensuales de precio del kWh de mercado y de generación (discriminada por fuentes), de un año determinado- que los ahorros hipotéticos mensuales la demanda de electricidad serian del orden de algunos millones de dólares mensuales.
- x. **Encontrar un beneficio como el planteado ahorro en la demanda de orden de millones de dólares mensuales, aporta un criterio para la toma de decisión de parte del Estado, el cual podría generar una mayor relevancia para priorizar el desarrollo de la geotermia en los países con potencial para usos de generación de electricidad como para los usos directos. Reduciendo los riesgos y apalancando inversiones.**

- xi. Este trabajo puede ser un referente para el gobierno, inversionistas o desarrolladores de proyectos y académicos que busquen aportar al desarrollo de proyectos geotérmicos.

## 10 RECOMENDACIONES

- i. En general los resultados obtenidos deben ser mejorados y profundizados, a partir de la relevancia que cada uno tenga desde la óptica del Estado o de ejecutores o promotores de este tipo de proyectos.
- ii. La hoja de ruta es una aproximación, es necesario mejorarla mediante encuestas y lograr una validación y complementación. Igualmente aplica al caso de los indicadores consultarlos, particularmente la evaluación del indicador beneficio.
- iii. En el caso de ejercicio de estimación del potencial geotérmico en el Volcán Azufra, desde los mapas de gravimetría y magnetometría se establecen otras zonas de interés donde coinciden bajos valores de estas mediciones, donde sería necesario aplicar y mejorar la metodología aplicada a estas nuevas zonas.
- iv. Es pertinente considerar el conocimiento y experiencia del El Salvador, siendo “La falta de conocimiento” la madre que encadena todas y cada una de las barreras, también resulta su solución. La escuela y experiencia obtenida en el Programa de Regional de Entrenamiento Geotérmico (PREG) esta aportando decididamente a removerla.
- v. Es muy conveniente apoyar y expandir el PREG, ya que los beneficios de la geotermia solo se dará mediante el reconocimiento de camino autóctono latinoamericano, recorrido ya por los países centroamericanos, de no aprovecharlo, se dilataran los tiempos y retrasarán los beneficios demostrados inicialmente con el indicador del ejemplo de este documento.

## 11 AGRADECIMIENTOS

*A Dios por dame la oportunidad y condiciones de crecer y aceptar retos que de hay se derivan....*

*A mi familia por el apoyo incondicional en toda mi vida y por haber resistido las pruebas del crecimiento, sin lo cual no seria el ser actual...*

*A mis compañeros de la UPME y el Ministerio de Minas y Energía, desde el mas sencillo hasta a nuestros jefes Marco y Ricardo, a nuestro Director General de la UPME, por apoyarme y permitirme aprovechar esta oportunidad de formación en Geotermia...*

*A Claudia Alfaro y Dora Castaño por su empeño y liderazgo y apoyo incondicional en estos temas energéticos y particularmente de la geotermia...*

*A mis compañeros del diplomado por su apoyo y aportes grandes y pequeños curriculares o no...*

*A todos los docentes del diplomado por su siempre disposición a aportar al crecimiento de la geotermia y por su paciencia y persistencia...*

*A los organizadores académicos y logísticos quienes con su silencioso pero efectivo trabajo permitieron la culminación y el cumplimiento de los objetivos buscados de promocionar el conocimiento y la experiencia de la geotermia, planteados desde el Consejo Nacional de Energía, la Universidad de El Salvador, La GEO y los Fondos Nórdico para el Desarrollo y el Banco Interamericano de Desarrollo...*

*Finalmente, A toda la familia de La Geo que permitieron una estancia con un calor humano latino inolvidable, enriquecedora y cordial como a los importantes y grandes aportes en información, orientación, paciencia y experiencia de mi tutor, Licenciado Francisco Montalvo...*

*Para todos Muchas Gracias...larga vida sana en continuo crecimiento y aportes al bienestar de la sociedad en Latinoamérica y el Caribe.*

## 12 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) OLADE & BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO, Guía para la Etapa de Desarrollo de un Proyecto Geotérmico, 1993
- 2) OLADE & BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO, Guía para estudios de factibilidad Geotérmica, 1993
- 3) OLADE & BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO, Guía para la evaluación de impacto Ambiental de explotaciones Geotérmicas con fines energéticos , 1993
- 4) "LUIS C.A, Gutierrez-Negrin y Arturo González Salazar, Preliminary Geothermal Assessment of the Macizo Volcánico del Ruiz, Colombia, 1995"
- 5) "Mary H. Dickson y Mario Fanelli, Traducción en español: Alfredo Lahsen, Universidad de Santiago, Chile, ¿Qué es la Energía Geotérmica? , 2004"
- 6) "The Joint Ore Reserves Committee of The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Australian Institute of Geoscientists and Minerals Council of Australia (JORC), Código Australiano para reportar resultados de exploración de recursos minerales y Oro, 2004"
- 7) XM, Expertos en Energía, Informe de Operación y Administración del Mercado, 2005, Colombia, Sector Eléctrico, 2005
- 8) José Luis Quijano León, Manual de Geotermia, ciencias de la tierra e Ingeniería de Reservorios, 2007
- 9) M. Monterrosa, Geothermal Resource Assessment of Central American Countries: El Salvador, 2007
- 10) Guillermo LLOPIS TRILLO y Vicente RODRIGO ANGULO, Guía de la Energía Geotérmica, 2008
- 11) Kristján Saemundsson ISOR – Iceland GeoSurvey, Geothermal Systems in Global Perspective, 2009
- 12) ODUOR Jennifer A, Kenya, Environmental and Social Considerations in Geothermal Development, 2010
- 13) "Ruggero Bertani
- 14) Enel Green Power, via Dalmazia 15 – 00198 Roma (Italy), Geothermal Power Generation in the World 2005–2010 Update Report, 2010"
- 15) John W. Lund, Derek H. Freeston, et al, Direct Utilization of Geothermal Energy 2010 Worldwide Review, WGC2010
- 16) Subir K. Sanyal, GeothermEx, Inc., Thirty-Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Future of Geothermal Energy, 2010
- 17) "Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones. Gerencia de Electricidad, Boletín de Estadísticas Eléctricas N° 12, 2010.
- 18) KANEKO MASAHIKO, Presentación Barreras, Contramedidas y Rol de los Gobiernos, 2011.
- 19) Magnus Gehringer, Senior Energy Specialist, ESMAP / World Bank, Washington DC, Economic Cost Comparison of Geothermal and Other Technologies, 2011.
- 20) Barry Goldstein, Gerardo Hiriart, et al, Great Expectations for Geothermal to 2100 – Messages for Now, 2011.
- 21) Rüdiger Hartmann, Perspectivas sobre los Riesgos y Oportunidades de Inversión en el Sector Eléctrico en la Región ALyC. KfW, 2011.
- 22) The Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP), Geothermal Handbook: Planning and Financing Power Generation, 2012
- 23) West Japan Engineering Consultants, Inc. Koichi TAGOMORI, Significado del

- Desarrollo de la Energía Geotermal y Flujo General de Desarrollo, 2012
- 24) West JEC, Enrique M. Lima Lobato, Presentación: Refuerzo de Capacidades Para el Desarrollo Geotérmico en Centro y Sudamérica Usos Múltiples, 2012.
  - 25) ISAGEN – BID, 3, Notas de Investigación y desarrollo de proyectos geotérmicos en Colombia, 2012.
  - 26) "ESMAP, Drilling Down on Geothermal Potential: An Assessment for Central America, 2012
  - 27) Natacha C. Marzolf, BID-ISAGEN, Emprendimiento de la Energía Geotérmica en Colombia, 2014
  - 28) IGA, Best Practices Guide for Geothermal Exploration, 2014
  - 29) IRENA\_OLADE, Capacity Building for Geothermal. Presentacion Geothermal Energy Initiative in the Andes, 2014
  - 30) Jens Wirth, GEOLAC, KfW , Geothermal Development Facility for Latin America, 2014.
  - 31) Juliana Glenn and Benjamin Matek, The Status of Geothermal Power in Emerging Economies, 2014
  - 32) "Marietta Sander, IGA, Geothermal Energy Development in Latin America and the Caribbean and the Role of International Development Partners, 2015, Bochum, Germany.
  - 33) C. Alfaro, SGC, Improvement of Perception of the Geothermal Energy as a Potential Source of Electrical Energy in Colombia, Country Update, 2015
  - 34) John W. Lund and Tonya L. Boyd, Direct Utilization of Geothermal Energy 2015 Worldwide Review, 2015
  - 35) Claudia ALFARO, Patricia PONCE, et al, A Preliminary Conceptual Model of Azufral Geothermal System, Colombia, 2015
  - 36) F. Montalvo, Current Status of Geothermal Resources Development in Central America, 2015
  - 37) E S M A P M I S S I O N, Geothermal Handbook: Planning and Financing Power Generation, 2012
  - 38) Shatei IRI, Presentacion: Estudios Ambientales para el Desarrollo de la Energia Geotermica, 2007.

## 13 ANEXOS

### 1. Anexo de metodologías

El anexo transcribe grandes apartes de algunas de la metodologías, por lo cual se solicita permiso a los autores.

#### a. Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) y el Banco Interamericano de Desarrollo BID

Realizan varios aportes significativo mediante guías y proyectos en algunos países para orientar en Latinoamericanos, sobre la búsqueda de alternativas de suministro de energía mediante desarrollos geotérmicos, durante el periodo de 1978 a 1994 se pueden enumerar las siguientes guías:

- i. Metodología de Exploración Geotérmica para las Fases de Reconocimiento y Prefactibilidad, 1979
- ii. Metodología de la Exploración Geotérmica para la Fase de Factibilidad
- iii. Metodología de Exploración y Explotación Geotérmica para las Fases de Desarrollo y Explotación, 1980.
- iv. Metodología de la Explotación Geotérmica, 1986.

OLADE y el BID apoyaron su aplicación en países como Haití, Ecuador, Perú, República Dominicana, Grenada, Guatemala, Jamaica, Colombia y Panamá, se realizó solamente la etapa de reconocimiento en parte de sus territorios para Nicaragua, Panamá, Ecuador-Colombia, Haití y Guatemala.

Posteriormente en los 90 se actualizaron publicando 6 guías:

- i. Estudios de Reconocimiento,
- ii. Estudios de Prefactibilidad,
- iii. Exploración de Factibilidad,
- iv. Evaluación del Potencial Energético (con base en la información recopilada en las fases de reconocimiento y prefactibilidad),
- v. Operación y Mantenimiento de Campos y Plantas Geotérmicas, y
- vi. Preparación de Proyectos de Inversión en Plantas Geotérmicas.

Todas estas guías han resultado invaluable, facilitando el conocimiento necesario para el desarrollo de proyectos de geotermia en Latinoamérica, no obstante hoy la existencia de bases de datos e información virtual, la barrera del conocimiento aun persiste, en razón a que estas guías no es posible conseguirlas digitalmente o gratuitamente, en la web de OLADE o institución alguna en línea, aun cuando si en medio impreso en bibliotecas especializadas en el tema<sup>15</sup>.

<sup>15</sup> Como el caso del Centro de documentación de La GEO, en San Salvador, El Salvador

## BARRERAS<sup>16</sup>:

### Financieras:

- Limitado acceso a financiamiento
- No existe ninguna cobertura de riesgo a la inversión para desarrollar la geotermia.

### Políticas

- Se requiere dar mayor seguridad a las compañías desarrolladoras en el tema social a fin de reducir la percepción de riesgo de que las comunidades impida el desarrollo del proyecto.
- Falta difusión sobre los beneficios de la geotermia dentro de la sociedad y autoridad e de gobiernos locales.

### Técnicas

- Insuficiencia de especialistas en temas específicos de geotermia en tres niveles: científicos, de ingeniería y técnicos, así como especialistas en evaluación ambiental para proyectos geotérmicos.
- Falta de empresas de servicios especializados.
- Falta de oferta educativa relacionada con geotermia.

### Regulatorias

- No existen criterios estandarizados para la evaluación ambiental de los proyectos geotérmicos.
- No existen criterios de evaluación técnica (metodología, parámetros y estándares) aplicables a las autorizaciones de exploración.
- El marco legal actual no contempla la energía geotérmica de baja entalpía

## **b. Programa de Energía del Sector de Gestión de Asistencia (ESMAP) y el Banco Mundial.**

Proporcionan una guía práctica de estrategias para el desarrollo de proyectos geotérmicos de gran escala, cubriendo temas de política y desarrollo de proyectos en países en desarrollo. La metodología busca orientar sobre los factores que han obstaculizado el desarrollo de los recursos geotérmicos, relacionados principalmente con los altos costos iniciales y el riesgo en la exploración, incluida la perforación, aporta para los países de Latinoamérica con recurso geotérmicos las siguientes 8 fases para el desarrollo de proyectos geotérmicos involucrando los riesgos:

- Fase 1: Estudio preliminar
- Fase 2: Exploración

---

<sup>16</sup> Presentación “Geotermia en los países de la Región Andina”, Dr. Ing. Gabriel Salazar Y, Director de Estudios y Proyectos, OLADE, 2013.

- Fase 3: Prueba de perforación
- Fase 4: Análisis y Planificación de Proyectos
- Fase 5: Desarrollo del Campo
- Fase 6: Construcción
- Fase 7: Puesta en marcha y puesta en marcha
- Fase 8: Operación y Mantenimiento

Plantea estrategias de desarrollo del sector eléctrico a partir de la Geotermia, sin ser una guía técnica de mayor detalle como las de OLADE, proporciona elementos para la toma de decisiones y el desarrollo de proyectos sobre cómo configurar, diseñar e implementar un programa de desarrollo de la energía geotérmica.

Tabla 12, Algunas ventajas y desventajas de la geotermia según OLADE

VENTAJA	DESVENTAJA
Recursos inagotables (renovable)	El agotamiento del recursos puede ocurrir a nivel de un reservorio individual
Baja emisión / insignificante de CO <sub>2</sub> y contaminantes atmosféricos locales	El sulfuro de hidrógeno (H <sub>2</sub> S), e incluso el contenido de CO <sub>2</sub> es elevada en algunos reservorios
Bajo requerimiento de la tierra	Puede tener inconvenientes por el uso del suelo en el derecho de paso de las vías de acceso y líneas de transmisión.
Ninguna exposición a la volatilidad del precio del combustible o necesidad de importarlo	Geotérmica "combustible" es no transable y la ubicación restringida
Energía estable de carga base (sin intermitencia)	Capacidad limitada de la planta geotérmica de seguir de carga / responder a la demanda
Relativamente bajo costo por kWh	Riesgo alto de recursos, el alto costo de inversión, y el ciclo de desarrollo de largo proyecto
Tecnología / madura probada	Campos de vapor geotérmico requieren un mantenimiento sofisticado
Escalable a tamaño utilidad sin ocupar mucho la tierra / espacio	Se requieren extensivas perforaciones para una planta geotérmica grande

## **BARRERAS:**

Los principales riesgos sobre el recurso en la energía geotérmica están asociados a no encontrar la temperatura (o entalpía) y la transividad (o permeabilidad de grosor), que en conjunto determinan la capacidad de generación y la sostenibilidad de la producción de pozos, ya que afectan el cierre financiero del proyecto.

No plantea barreras particulares o generales, establece la buena practica de identificar los riesgos o barreras a partir de la información de los estudios preliminares, y asociado solamente a la exploración:

- El mercado de la energía y los posibles acuerdos de compra de energía (PPA) o tarifa de alimentación.
- Exigencias y posibilidades adicionales / para el uso de la energía geotérmica como distrito o calentamiento de efecto invernadero.
- Problemas de infraestructura (carreteras, agua, comunicación, transmisión).
- Problemas de propiedad de los recursos (en algunos países los permisos geotérmicos están bajo la ley minera; en otros casos bajo una legislación específica en geotérmica puede ser considerado una concesión de agua; o no podría existir marco jurídico pertinente).
- Aspectos ambientales y sociales.
- Marcos institucionales y regulatorios.
- La estabilidad política y financiera.
- Recopilación e interpretación de la teledetección disponibles o los datos reconocimiento aéreo.
- La información disponible en todos los sistemas geotérmicos conocidos, incluyendo geologías, hidrologías, y/o afloramientos termales y datos históricos de exploración, e
- Información de exploraciones anteriores o pozos que pueden haber sido perforados en el área de interés.

Todos estos factores deben tenerse en cuenta con el fin de identificar las posibles barreras al desarrollo o posibles obstáculos que podrían descarrilar o desaceleración un programa de desarrollo. En base a los resultados de estos estudios preliminares, el explorador o desarrollador podrá decidir proceder a la fase de exploración. La obtención de las recursos de financiamiento y/o socios para compartir los riesgos y los gastos de esta fase también puede ser necesario.

### **c. El Banco Interamericano de Desarrollo (BID) en Conjunto con ISAGEN**

El Banco Interamericano de Desarrollo (BID) en Conjunto con ISAGEN han realizado un documento que busca aportar al desarrollo de proyectos geotérmicos en Colombia, no es muy detallado el documento como el en caso de las Guías de Olade, sin embargo plantea las siguientes fases para el desarrollo de un proyecto geotérmico:

Fase	Objeto	Actividades
<b>Fase 1. Reconocimiento</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Establecer las zonas con potencial geotérmico.</li> <li>Delimitar las áreas para los estudios técnicos y ambientales de prefactibilidad.</li> <li>Planear los estudios de prefactibilidad.</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Identificación de zonas potenciales.</li> <li>Análisis de viabilidad preliminar de un desarrollo geotérmico.</li> <li>Análisis de restricciones ambientales.</li> <li>Planeación de la ejecución de los estudios de prefactibilidad.</li> </ol>
<b>Fase 2. Prefactibilidad</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Determinar la potencial existencia del recurso geotérmico, la posible localización de la fuente de calor y el reservorio (Modelo Geotérmico Conceptual).</li> <li>Establecer la viabilidad técnica y ambiental del desarrollo de un campo geotérmico.</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Estudios de geología, geofísica, geoquímica e hidrogeología.</li> <li>Gradiente térmico.</li> <li>Elaboración de modelos geotérmicos.</li> <li>Selección de sitios de perforación.</li> <li>Diseño de perforaciones exploratorias.</li> <li>Elaboración del Estudio de Impacto Ambiental para perforaciones exploratorias.</li> <li>Trámite de la licencia ambiental para perforaciones exploratorias.</li> </ol>
<b>Fase 3. Factibilidad</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Localizar y llegar hasta el reservorio, obtener fluidos y evaluar la calidad y cantidad disponible del recurso para generación de energía.</li> <li>Realizar los análisis de viabilidad técnica, económica y ambiental del proyecto geotérmico.</li> <li>Realizar los diseños requeridos y planear el desarrollo del campo geotérmico y la planta de generación.</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Perforaciones exploratorias.</li> <li>Evaluación del yacimiento.</li> <li>Análisis de viabilidad técnica y económica del desarrollo de un proyecto geotérmico.</li> <li>Diseño de la planta y planeación del desarrollo del campo.</li> <li>Ejecución del Plan de Manejo Ambiental para las perforaciones exploratorias.</li> <li>Realización del Estudio de Impacto Ambiental para el desarrollo del campo, construcción y operación de la planta de generación.</li> <li>Trámite de la licencia ambiental para el desarrollo del campo, construcción y operación de la planta.</li> </ol>
<b>Fase 5. Construcción de la Planta y Puesta en Operación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Puesta en operación de la planta y el campo geotérmico.</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Construcción de la planta y obras asociadas (líneas de conducción de agua y vapor, vías de acceso, subestación, línea, etc.).</li> <li>Alistamiento de la planta y el campo.</li> <li>Puesta en operación comercial.</li> <li>Ejecución del Plan de Manejo Ambiental para la operación de la planta y el campo geotérmico.</li> </ol>

Tabla No. 1 Fuente (Notas de Investigación y desarrollo de proyectos geotérmicos en Colombia, ISAGEN – BID, 2012)

### BARRERAS:

- Falta de Capacidades locales. Consultoría especializada, para estudios exhaustivos de caracterización y modelamiento del recurso.
- Falta de regulaciones de mercado que reconozcan los aportes de la geotermia a la confiabilidad y firmeza del sistema eléctrico.
- Falta de información y capacitación a la comunidad, sobre beneficios y riesgos del la energía geotérmica (así como de los usos productivos<sup>17</sup>).
- Carencia de infraestructura de conexión a Sistemas del Transmisión Nacional, que requiere de inversiones cuantiosas adicionales al desarrollo geotérmico.
- Falta de apoyo financiero o el acceso a mecanismos para la cobertura de riesgo en etapas de exploración.
- Dificultades de ingreso a mercados competitivos sin visión de mediano y largo plazo, debido a los altos costos inversión y de la exploración geotérmica.
- Carencia de normatividad específica para el desarrollo geotérmico, y de integración de procedimientos legales que faciliten la reducción de tiempos de realización de las etapas de exploración, desarrollo y aprovechamiento del recurso de una manera armónica y ordenada.

<sup>17</sup> Nota agregada por el estudiante, con base en las clases del Diplomado.

## SOLUCIONES:

Fortalecer, apoyar y ampliar capacidad técnica y científica local mediante planes y programas de capacitación a nivel técnico-científico en las diferentes disciplinas requeridas.

### d. JICA y West Japan Engineering Consultants, Inc.

JICA y West Japan Engineering Consultants, Inc. Asimismo, plantean realizar la exploración en 4 etapas

1. Aproximación preliminar, busca establecer el planeamiento de la exploración y una estrategia de desarrollo, incluye la revisión y estudio de información existente (Análisis de sensores remotos –imágenes satelitales y fotos aéreas-, estudio geológico regional –mapeo de fracturas y alteraciones hidrotermales-, estudio hidroquímico –muestreo de aguas y gas, y análisis de isotopos-, estudio de gravimetría -estructura del basamento, fallas y estructura de elevación y base).
2. Aproximación detallada, busca establecer áreas de estudio detalladas de orden de 25km<sup>2</sup> (involucra estudios: Geológicos –alteración hidrotermal y mapeo de fallas-, Geoquímicos –análisis detallado de componentes químicos y geotermometría-, Medición del flujo de calor –calor en el pozo perforado y temperatura de profundidad-, Microsísmica –distribución de fallas y detección de fracturas-, Magmetotelurica MT–mapas de resistividad a diversas profundidades-)
3. Selección de sitios promisorios en áreas de 5 km<sup>2</sup> (involucra estudios: geológicos detallados, geoquímica –mapas de mercurio, CO<sub>2</sub> -, Resistividad DC –Schulumberger y dipolo/dipolo-, CSAMT –MT-, Medio ambiente – evaluación de impactos-
4. Ubicación de pozos, 4 a 5 perforaciones exploratorias (Muestreo y análisis de muestras de recortes y núcleos, mediciones y pruebas de pozos, pruebas de producción y monitoreo y, Estudios geofísicos adicionales), conducente a la evaluación adecuada de reservorios en el estudio de factibilidad.

Se plantea para lograr pozos de producción exitosa, los objetivos de la exploración para el desarrollo de la Energía Geotérmica deben ser:

- Delinear un modelo de estructura geotermal
- Localizar puntos para perforación basándose en el modelo del reservorio geotermal.

Tres aspectos claves en la determinación de los sitios de exploración son altas temperaturas mayores a 220 C, zona permeable (falla o capas porosas) y un medio de transporte del calor (Vapor o agua). Lograrlo reduce los costos de desarrollo e incrementa la viabilidad financiera del Proyecto.

## BARRERAS:

- Inversión inicial de \$US 10 millones en la perforación de pozos exploratorios (de producción y reinyección) para delinear el reservorio geotérmico; necesaria en el caso de otros desarrollos energéticos renovables.
- Aunque se consiga el financiamiento, se deben tomar en cuenta los riesgos asociados con los recursos del subsuelo.
- La capacidad de desarrollo no puede ser determinada sin pruebas de producción en largo plazo y usando varios pozos de producción exitosa.

#### **BENEFICIOS:**

Para los países en desarrollo beneficios de la geotermia son:

- Reducción de impactos a la economía y competitividad relacionados con fluctuaciones en precio de combustibles.
- Fuente de energía local sin dependencia del aspectos climáticos.
- Alta disponibilidad de la generación de electricidad.
- Bajos impactos ambientales.
- Contribuye al desarrollo económico local y la electrificación rural.
- Independencia y seguridad energética (no incluido pero a juicio de este documento resulta estratégico, para la toma de decisión del Estado.

Para el Japón

- Ganancia de derechos de emisión de CO<sub>2</sub> derivados de Proyectos CDM.
- Contribución a la cooperación Internacional basada en tecnologías de Japón.
- En Japón: Proyectos de Cooperación Internacional de JICA, JBIC etc.

Alta prioridad debido a su gran capacidad de generación de electricidad base del despacho.

“La Energía Geotérmica puede ser una fuente financieramente viable con mucho tiempo de vida útil, ya que no requiere combustibles durante la operación y la inversión inicial siempre es finalmente recuperada”.

#### **e. Asociación Internacional de Geotermia (IGA, sigla en ingles), Guía de las mejores practicas para la Exploración Geotérmica,**

Establece 8 fases de desarrollo para el proyecto geotérmico

Fase 1: Estudio preliminar

Fase 2: Exploración

Modelo conceptual

No Datos Técnicos Compilación

Estudio de Pre-factibilidad

Fase 3: Prueba de perforación

Actualización del Modelo Conceptual

Modelado Numérico

Fase 4: Revisión y Factibilidad del Proyecto

Fase 5: Desarrollo del Campo

Fase 6: Construcción

Fase 7: Pruebas de puesta en marcha

Fase 8: Operación

Los alcances de la guía son los siguientes:

- I. Establece las mejores practicas aplicables a las dos fases iniciales. Llega hasta la conclusión de la fase de exploración.
- II. Presenta un set de herramientas de exploración y recomendaciones para reducir el riesgo financiero para recaudar fondos para la Fase de Perforación de prueba.
- III. Solamente trata la perforación de pozos poco profundos para la medición del gradiente de temperatura o de flujo de calor.
- IV. Realiza un barrido de los aspectos mas importantes para el desarrollo de la geotermia en el mundo.
- V. Plantea la inexistencia de estándares que soporten los informes de potencial de los recursos geotérmicos<sup>18</sup>,
- VI. Realiza una clasificación de seis tipologías de sistemas geotérmicos, y las practicas recomendadas de estrategias de exploración.
- VII. Plantea que el manual de geotermia de ESMAP (Gehring y Loksha, 2012), es un documento que debe acompañar la guía ya que se ocupa de la política, los marcos normativos y de planificación, o la economía del proyecto.
- VIII. Los consejos de esta guía pueden no ser del todo adecuado para la exploración de recursos geotérmicos de baja temperatura para uso directo, la evolución de la temperatura ultra alta, u otros desarrollos geotérmicos menos convencionales o no convencionales.
- IX. La Guía es de uso limitado a los gobiernos, bancos de desarrollo y otros organismos internacionales de financiación para el diseño de programas de promoción de las inversiones en energía geotérmica.

Fase 1: Estudio preliminar

Se debe tener un conocimiento profundo de los aspectos legales, sociales, ambientales y geológicos en el que el proyecto tiene que operar. Se tiene la licencia legal y social para pasar a la fase de exploración del proyecto, que permitirá el desarrollo de ser descubierto un recurso geotérmico viable. Todos los datos anteriores sobre la cuestión de la obra geotérmica se han recopilado y evaluado, revelando vacíos de datos clave e incertidumbres geológicas que son

---

<sup>18</sup> Solamente Australia y Canadá poseen Estándares propios aplicados a sus condiciones particulares.

críticos. La fase de exploración debe minimizar con eficiencia y eficacia las incertidumbres geológicas llenando los vacíos encontrados.

### **BARRERAS:**

Plantea que la gran barrera es el riesgo de la inversión en las primeras perforaciones. Adicionalmente, que la existencia de información de los siguientes aspectos representan las bases para establecer las barreras para el desarrollo de un proyecto geotérmico:

- El mercado de la energía y los posibles acuerdos de compra de energía (PPA) o tarifa de alimentación (FIT en inglés);
- otras exigencias y posibilidades adicionales / para el uso de la energía geotérmica como distrito o de efecto invernadero de calentamiento;
- problemas de infraestructura (carreteras, agua, comunicación, transmisión);
- problemas de propiedad de los recursos (en algunos países los permisos geotérmicos están bajo leyes mineras; en otros lugares puede ser considerado un derecho de agua en virtud de la legislación geotérmica específica, o un marco jurídico pertinente no podría existir);
- las cuestiones ambientales y sociales;
- marcos institucionales y regulatorios;
- cuestiones relativas a la estabilidad política y financiera;
- recopilación e interpretación de la teledetección disponibles o los datos reconocimiento aéreo;
- La información de la literatura disponible en todos los sistemas geotérmicos conocidos, incluyendo geológicas, hidrológicas, datos de fuentes hidrotermales, datos históricos de exploración; e
- información de exploraciones anteriores o pozos que pueden haber sido perforados en el área de interés.

### **f. IRENA19**

#### **BARRERAS**

##### Políticas y regulatorias

- Pocas o ninguna regulación específica para abordar geotérmica exploración y explotación
- Carencia de redacción regulaciones ambientales - en el puesto de trabajo, intercambio de experiencias, el apoyo de expertos (ex, conflictos territoriales con comunidades nativas)
- Falta Identificar los mecanismos que impiden que las empresas especulativas en el proceso de concesión de licencias

---

<sup>19</sup> Tomado de: Presentacion IRENA: Capacity Building for Geothermal, Kavita Rai, French Side Event - World Future for Energy Summit, Abu Dhabi, 20th January 2014

### Técnicas

- Geociencias: perforación, recursos / estimación e ingeniería de reservorios / modelado, operaciones.
- Geotérmica básica, educación de los interesados concertación de medio ambiente
- consentimiento, y la experiencia de intercambio, formación en el puesto de trabajo, la retroalimentación e intercambio de expertos.
- Experiencia del gobierno es baja y puede continuar así a largo plazo (sin la suficiente atención en el sector de la educación).
- Capacitación para ingenieros de producción y personal de mantenimiento. Empresas parte importando de expertos, parte entrenado dentro del trabajo.

### Financieras

- Financiamiento y apoyo para cubrir seguros de perforación, puesta de equipos en la región, diseño de subsidios condicionados, herramientas para absorber los riesgos de la exploración.

## 2. Anexo metodología de Clasificación de la información

Para la clasificación de la información se ha realizado una clasificación y siglas con un ejemplo líneas abajo con la finalidad de organizar la información por temáticas principales acordes con los objetivos del presente trabajo, lo cual a permitido renombrar los archivo de manera que facilite su consulta y referencia, a continuación se realizan dos clasificaciones de nomenclatura por tema y subtema y se asocia las posibles entidades participantes, esta nomenclatura forma parte del las primeras letras del nombre del archivo:

**Tabla 13, Nomenclatura de siglas de clasificación de temas generales de la geotermia**

	Tema	Sigla
1	Ambiental y social	AS
2	Aplicaciones	AP
3	Evaluación	E
4	Experiencias o casos	EC
5	Financiamiento	F
6	Metodologías	M
7	Regulaciones	R
8	Tecnología	T
9	Investigación	I
10	Conceptos	C

Igualmente asociado al nombre del archivo se colocara un segundo apellido relacionado con los siguientes subtemas

**Tabla 14, , Nomenclatura de siglas de clasificación de temas específicos de la geotermia**

	Subtema	Sigla
1	Alta, Media o Baja entalpia	AE,ME o BE
2	Barreras	B
3	Beneficios	Be
4	Costos	C
5	Desarrollo-Implementación	DI
6	Exploración	E
7	Políticas	P
8	Potencial	Po
9	Recurso	Re
10	Riesgos	R
11	Geocientífico	G

Finalmente se puede colocar la institución que apoya y los países (ej: Col. Colombia o SV El Salvador y año de la publicación.

**Tabla 15, Nomenclatura de siglas de entidades, que**

**apoyan desarrollos en la geotermia**

	<b>Organización</b>	<b>Sigla</b>
1	Banco Interamericano de Desarrollo	BID
2	Banco Mundial	BM
3	Department of Energy, USA	DOE
4	Empresa Publica	E
5	Geothermal Energy Association	GEA
6	Global Envioment Facility	GEF
7	Gobierno	G
8	Japan International Cooperation Agency	JICA
9	Orgaizacion Latinoamericana de Energía	OLADE

Un ejemplo de lo anterior es el siguiente ejemplo:

**Tabla 16, Ejemplo de uso de Nomenclatura de siglas para la clasificación de los documentos consultados de la geotermia**

<b>Titulo</b>	<b>Autor</b>	<b>Año</b>	<b>Observaciones</b>	<b>Nombre con siglas de Clasificación</b>
Guía para la Etapa de Desarrollo de un Proyecto Geotérmico.	OLADE & BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO	1993	Se presenta un marco general del proyecto geotérmico relacionado principalmente en las etapas para su desarrollo, Reconocimiento y prefectibilidad, haciendo referencia de la etapa de factibilidad	M_E_Olade_1993_Guía para la Etapa de Desarrollo de un Proyecto Geotérmico

**3. Transcripción de un documento de internet de el diario EL TIEMPO sobre los usos directos de la energía geotérmica en Colombia  
“..... UNA EMBARRADA SALUDABLE**

Es un artículo que realiza un inventario de spa de usos directos de las aguas geotérmicas de baja temperatura, en cuanto a Limpieza y rejuvenecimiento de la piel, regulación de las funciones digestivas, mejoramiento del sistema circulatorio, disminución de las dolencias artríticas y relajación del cuerpo y de la mente. Los plantea como beneficios que proporciona un baño en aguas termales. Realizado por XIMENA OSPINA Redactora de EL TIEMPO, 23 de noviembre de 1997.

#### 4. Anexo Resumen de Barreras al desarrollo de la geotermia

Barreras o Riesgos								
	OLADE (1994- 2014)	ESMAP(2012)	JICA-WEST JEC (2015)	ISAGEN-BID(2012)	KfW(2011-2014)	IRENA(2014)	IGA (2014)	CONCLUSIONES
Financiamiento y cobertura de riesgos	Limitado acceso a financiamiento		Inversión inicial de \$US 10 millones en la perforación de pozos exploratorios (de producción y reinyección para delimitar el reservorio geotérmico; necesaria en el caso de otros desarrollos energéticos renovables.	Falta de apoyo financiero o el acceso a mecanismos para la cobertura de riesgo en etapas de exploración.	Costo de capital más elevado Bancos comerciales se muestran reacios en otorgar créditos para ERV EE. Falta de garantía	Financiamiento y apoyo para cubrir seguros de perforación, puesta de equipos en la región, diseño de subterráneos condicionados, herramientas para absorber los riesgos de la exploración.	Plantea que la gran barrera es el riesgo de la inversión en las primeras perforaciones. Alto riesgo de la perforación inicial	Inversión y riesgo inicial Alto, sin embargo ESMAP aun cuando el riesgo no plantea esta barrera, es necesario tener cuidadosos en casos adecuadamente estudiados, como el de Aguachapán en el Salvador el riesgo de la perforación ha sido minimizado al punto, lo cual plantea que el riesgo podría relacionarse más con la falta de calidad de los estudios previos a la perforación que desencadenaría una gran pérdida en la etapa de las primeras perforaciones, algo puede tener fundamento si se considera que no existen estándares para muchos de los procedimientos de toma de datos en campo y el procesamiento de los mismos de manera certificada. Solamente en los casos donde existe una gran experiencia de campo y procedimientos muy cuidadosamente realizados.
	No existe ninguna cobertura de riesgo a la inversión para desarrollar la geotermia.	El mercado de la energía y los posibles acuerdos de compra de energía (PPA) o tarifa de alimentación.	Aunque se otorga el financiamiento, se deben tomar en cuenta los riesgos asociados con los recursos del subsuelo.		Promoción de programas con tasa de intereses reducida			Garantía de flujo de caja que garantice cumplimiento de la deuda.
Conocimiento	Insuficiencia de especialistas en temas específicos de geotermia en tres niveles: científicos, de ingeniería y técnicos, así como especialistas en evaluación ambiental para proyectos geotérmicos.	Recopilación e interpretación de la teledetección disponibles o los datos reconocimiento aéreo.	La capacidad de desarrollo no puede ser determinada.	Falta de Capacidades locales. Consultoría especializada, para estudios exhaustivos de caracterización y modelamiento del recurso.	Falta de conocimiento/ conciencia / tecnología Gobiernos Instituciones Financieras Desarrolladores/ Empresas/ Hogares	Geotécnicas; perforación, recursos / estimación e ingeniería de reservorios / modelado, operaciones.	Falta de conocimiento en los gobiernos y entidades de financiamiento.	Falta de desarrollo de Capacidades técnicas, formación y educación local en geotermia (geotécnicas, fractura, ingeniería, regulatorio, planeamiento, ambiental y político
	Falta de empresas de servicios especializados.	- La información disponible en todos los sistemas geotérmicos conocidos, incluyendo geología, hidrología, y/o afloramientos termales y datos históricos de exploración, e			Falta de Asistencia Técnica	Geotermia básica, educación de los interesados concentración de medio ambiente	deficiencias de calidad y en recopilación e interpretación de la teledetección disponibles o los datos reconocimiento aéreo;	Falta de bases de datos consolidadas y estandarizadas como repositorios nacionales de datos para fines académicos y productivos. En todas la geotécnicas, sin perder de vista lo social, cultural, económico y ambiental.
	Falta de oferta educativa relacionada con geotermia.	- Información de exploraciones anteriores o pozos que pueden haber sido perforados en el área de interés.				consentimiento, y la experiencia de intercambio, formación en el puesto de trabajo, la actualización e intercambio de expertos	las cuestiones ambientales y sociales; - marcos institucionales y regulatorios, - cuestiones relativas a la estabilidad política y financiera;	En el caso de aun cuando en un comienzo fue una barrera actualmente en El Salvador la prueba está superada, cuentan con recurso humano muy capaz, en el caso de la mayoría de países Latino americanos persiste la falta de capacitables y conocimiento.
	No existen criterios estandarizados para la evaluación ambiental de los proyectos geotérmicos.					Experiencia del gobierno es baja y puede continuar así a largo plazo (sin la suficiente atención en el sector de la educación).	- Falta de acceso a la información de la literatura disponible en todos los sistemas geotérmicos conocidos, incluyendo geológicas, hidrologías, datos de fuentes hidrotermales, datos históricos de exploración; e - Información de exploraciones anteriores o pozos que pueden haber sido perforados en el área de interés	Se plantea la Falta de Estándares para las primeras etapas de exploración, que garanticen una mejor trazabilidad de la calidad.
No existen criterios de evaluación técnica (metodología, parámetros y estándares) aplicables a las autorizaciones de exploración.						Capacitación para ingenieros de producción personal de mantenimiento. Empresas parte importando de expertos, parte entrenado dentro del trabajo.	Falta de estándares para los reportes de potencial	
Marco legal institucional	El marco legal actual no contempla la energía geotérmica de baja entalpía	- Problemas de propiedad de los recursos (en algunos países los permisos geotérmicos están bajo la ley minera; en otros casos bajo una legislación específica en geotermia puede ser considerado una concesión de agua o no podría existir marco jurídico pertinente).	- Falta de regulaciones de mercado que reconozcan los aportes de la geotermia a la confiabilidad y firmeza del sistema eléctrico.	- Marcos jurídicos y regulatorios inadecuados	Marco jurídico y regulatorio inadecuados	Pocos o ninguna regulación específica para abordar geotérmica exploración y explotación	Desconocimiento de los marcos legales e institucionales.	Marco legal sobre la propiedad y administración del recurso del subsuelo, normativas y procedimientos par el licenciamiento ambiental y el seguimiento y monitoreo ambiental, incluyendo la sostenibilidad del recurso.
	Se requiere dar mayor seguridad a las compañías desarrolladoras en el tema social a fin de reducir la percepción de riesgo de que las comunidades impida el desarrollo del proyecto.	- Aspectos ambientales y sociales.		Carencia de normatividad específica para el desarrollo geotérmico, y de integración de procedimientos legales que faciliten la reducción de tiempos de realización de las etapas de exploración, desarrollo y aprovechamiento del recurso de una manera armónica y ordenada.	Falta de normas, reglas, leyes		Carencia de redacción regulaciones ambientales - en el puesto de trabajo, intercambio de experiencias, el apoyo de expertos (ex. conflictos territoriales con comunidades nativas)	Marco legal de acompañamiento institucional y campañas educativas con instituciones locales, sobre la energía geotérmica, sus usos productivos posibilidades de generación de empleo e industria, de usos directos y de generación de electricidad.
	Falta difusión sobre los beneficios de la geotermia dentro de la sociedad y autoridad de gobiernos locales.	- Marcos institucionales y regulatorios.		- Dificultades de ingreso a mercados competitivos sin visión de mediano y largo plazo, debido a los altos costos inversión y de la explotación geotérmica.	tarifas subvencionadas		Falta identificar los mecanismos que impiden que las empresas especulativas en el proceso de concesión de licencias	Normativas de incentivos basados en evaluaciones beneficio/costo
		- La estabilidad política y financiera.		Falta de información y capacitación a la comunidad, sobre beneficios y riesgos de la energía geotérmica (así como de los usos productivos[1]).				- problemas de propiedad de los recursos (en algunos países los permisos geotérmicos están bajo leyes mineras; en otros lugares puede ser considerado un derecho de agua en virtud de la legislación geotérmica específica, o un marco jurídico regulatorio no podría existir).
Infraestructura		- Exigencias y posibilidades adicionales / para el uso de la energía geotérmica como distrito o calentamiento de efecto invernadero.	[1] Nota agregada por el estudiante, con base en las clases del Diplomado.				ESMAP	
		- Problemas de infraestructura (carreteras, agua, comunicación, transmisión).	Carencia de infraestructura de conexión a Sistemas de Transmisión Nacional, que requiere de inversiones cuantiosas adicionales al desarrollo geotérmico.		Falta de fondos públicos			- problemas de infraestructura (carreteras, agua, comunicación, transmisión); Falta de infraestructura y falta de metodologías que determinen los beneficios económicos de la generación con geotermia.