

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
ESCUELA DE POSGRADO**

**UNIDAD DE POSGRADO DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**



**“MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO
GEOTÉRMICO PARA LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD MEDIANTE LA
INSTALACIÓN DE UNA CENTRAL TERMOELÉCTRICA EN LA ZONA
PINAYA REGIÓN DE PUNO”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN
INGENIERÍA ELÉCTRICA CON MENCIÓN EN SISTEMAS DE ENERGÍA
ELÉCTRICA**

AUTOR: LUIS ALBERTO ZAPATA OJEDA

**Callao, 2019
PERÚ**

PÁGINA DE RESPETO

HOJA DE REFERENCIA DEL JURADO Y APROBACIÓN

MIEMBROS DEL JURADO

DR. MARCELO NEMESIO DAMAS NIÑO : PRESIDENTE

MGS. JULIO CÉSAR BORJAS CASTAÑEDA : SECRETARIO

MGS. CESAR AUGUSTO SANTOS MEJÍA : MIEMBRO

MGS. HUGO FLORENCIO LLACZA ROBLES : MIEMBRO

DR. FERNANDO JOSÉ, OYANGUREN RAMÍREZ: ASESOR

N° DE LIBRO : 01

ACTA FOLIO N° : 068

FECHA DE APROBACIÓN : Abril 05, 2018

RESOLUCIÓN DIRECTORAL : 015-2018-UPG-FIEE

DEDICATORIA

Esta tesis la consagro a Dios quién supo guiarme por el camino doctrinario de la investigación científica, de igual manera, por darme fuerza para seguir adelante y no desvanecer sin perder la dignidad ni declinar en el intento de la solución de los problemas objetos de investigación, existentes en la Generación de una central Termoeléctrica.

Concretamente, dedico esta tesis a mi futuro hijo , a mi esposa y mis padres por sus inmovibles sustentos y están percibiendo mis objetivos alcanzados, por ser génesis permanente de la andragopedagogía que se define como la “investigación permanente del hombre”, en busca de soluciones epistemológicas a los problemas dimensionales del modelamiento y simulación del potencial energético geotérmico para la generación de electricidad mediante la instalación de una central termoeléctrica en la zona Pinaya región de Puno"

AGRADECIMIENTO

Éticamente agradezco al Dr. Fernando José, Oyanguren Ramírez , por sus contribuciones en esta investigación científica multidisciplinaria, primordialmente en la hermenéutica sobre la generación de energía eléctrica de energía renovables como la geotermia, por su experiencia teorizante en el modelamiento utilizando el método de análisis volumétrico es el más accesible por los datos que presentan y que sirvió para concluir sobre el potencial eléctrico del yacimiento y recomendar acerca de su explotación. En la recolección de datos se obtuvieron los siguientes datos de temperaturas, en la Zona Geotermal de Pinaya (ZGP).

De igual manera, corresponder al Dr. Marcelo Nemesio Damas Niño y al Mg. Julio César Borjas Castañeda por sus aportes en la fundamentación ontológica, metodológica y epistemológica de solución al problema objeto de estudio, que en lo doctrinario se instaura el “cómo debe de ser” la generación de energía mediante recursos renovables realizando un modelado y simulación para la explotación de las energías renovables o no convencionales en esta región, por lo tanto, tiene un beneficio energético, técnico y social para la región y porque no, para todo el sur del país , y finalmente Dr. Cesar Augusto Santos Mejía por su gran aporte en el análisis de la hipótesis y resultados de esta tesis .

El Autor

ÍNDICE

CARÁTULA	i
PÁGINA DE RESPETO	ii
HOJA DE REFERENCIA DEL JURADO Y APROBACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE	6
ÍNDICE DE TABLAS	9
ÍNDICE DE IMÁGENES	10
RESUMEN	12
ABSTRACT	13
INTRODUCCIÓN	14
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
1.1 Descripción de la realidad problemática	17
1.2 Formulación del problema	21
1.2.1 Problema general	23
1.2.2 Problemas específicos	23
1.3 Objetivos	23
1.3.1 Objetivo general	23
1.3.2 Objetivos específicos	23
1.4 Limitantes de la investigación	24
1.4.1 Teóricas	24
1.4.2 Temporales	25
1.4.3 Espaciales	26
II. MARCO TEÓRICO	27
2.1 Antecedentes	27
2.1.1 Antecedentes de tesis de maestría N°01	27

2.1.2	Antecedentes de tesis de maestría N°02	29
2.1.3	Antecedentes de tesis de maestría N°03	31
2.2	Bases teóricas	33
2.2.1	Fundamentación ontológica	34
2.2.2	Fundamentación metodológica	36
2.2.3	Fundamentación Epistemológica	37
2.3	Conceptual	38
2.3.1	Antecedentes geotérmicos en el Perú	38
2.3.2	Eje volcánico sur del Perú	41
2.3.3	Recursos Energéticos Renovables	45
2.3.4	Potencial energético de energías renovables	48
2.3.5	Geotérmica y manifestaciones	52
2.3.6	Aplicaciones y tipos de Energía Geotérmica	63
2.3.7	Tipos de técnicas geotérmicas	66
2.4	Definición de términos básicos	94
III. HIPÓTESIS Y VARIABLES		101
3.1	Hipótesis	101
3.1.1	Hipótesis general	101
3.1.2	Hipótesis específicas	101
3.2	Definición conceptual de variables	102
3.2.1	Operacionalización de variable	102
IV. DISEÑO METODOLÓGICO		103
4.1	Tipo y diseño de investigación	103

4.2	Método de Investigación	103
4.2.1	Modelo Volumétrico	109
4.2.2	Modelo Termodinámico	113
4.2.3	Descompresión Gradual	114
V.	RESULTADOS	122
5.1	Resultados descriptivos	122
VI.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	131
6.1	Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados	131
6.2	Contrastación de los resultados con otros estudios similares	132
	CONCLUSIONES	142
	RECOMENDACIONES	143
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	144
	ANEXOS	146
-	Matriz de Consistencia	146
-	Archivo de macros en Excel	147
-	Imágenes sobre software leapfrog para la simulación	149
-	Fotografías sobre recolección de datos en la zona Pinaya	154
-	Estudio geoquímico de las fuentes termales de la zona geotermal	
-	de Pinaya, santa lucia (puno)	158

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1.1 Diagrama de esfuerzos en la zona geotérmica de Pinaya	20
Tabla N° 1.2 Desmembración lógica mental de la ingeniería eléctrica	22
Tabla N° 2.1 Emisiones de dióxido de carbono co2 con diferentes fuentes de energía en una vivienda-tipo de 150 m2.	35
Tabla N° 2.2 Principales usos de la energía geotérmica en función de la temperatura	64
Tabla N° 2.3 Clasificación y uso de la energía geotérmica	65
Tabla N° 3.1 Operacionalización de variable	102
Tabla N° 4.1 Composición química (mg/l) de las manifestaciones geotermales de la zona geotermal de Pinaya	107
Tabla N° 4.2 Datos necesarios para el modelo volumétrico	113
Tabla N° 5.1 Cálculo del potencial geotérmico-I	124
Tabla N° 5.2 Cálculo del potencial geotérmico-II	125
Tabla N° 5.3 Cálculo del potencial geotérmico-III	126
Tabla N° 5.4 Cálculo del potencial geotérmico-IV	127
Tabla N° 5.5 Cálculo del potencial geotérmico-V	128
Tabla N° 5.6 Cálculo del potencial geotérmico-VI	129
Tabla N° 5.7 Cálculo del potencial geotérmico-VII	130
Tabla N° 6.1 Fuentes de electricidad en Japón	133
Tabla N° 6.2 Diferenciación del precio internacional del petróleo	134
Tabla N° 6.3 Manifestaciones de dióxido de carbono (CO2)	136
Tabla N° 6.4 Plan de expansión de la generación 2006-2015	137
Tabla N ^a 6.5 Mezcla de la generación de electricidad	137
Tabla N° 6.6 Estructura de la generación de electricidad	138
Tabla N° 6.7 Abastecimiento de energía y tasa de autosuficiencia	139
Tabla N° 6.8 Suministro de energía en Perú	139
Tabla N° 6.9 Autosuficiencia de petróleo y de gas	141
Tabla N° 6.10 Comparación de la generación térmica y geotérmica	141

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen N° 1.1	Mapa de ubicación, geología de Pinaya	19
Imagen N° 2.1	Mapa geotérmico del Perú	40
Imagen N° 2.2	Mapa de regiones geotermales en el Perú	42
Imagen N° 2.3	Ubicación de lotes y áreas geotérmicas en la región V	44
Imagen N° 2.4	Ubicación del yacimiento de camisea y sistema de transporte del gas natural y líquidos	49
Imagen N° 2.5	Estructura interna de la tierra	53
Imagen N° 2.6	Fumarolas	56
Imagen N° 2.7	Aguas termales	57
Imagen N° 2.8	Volcán de fango	58
Imagen N° 2.9	Géiser Fly Ranch situado cerca de Gerlach en nevada (EE.UU)	59
Imagen N° 2.10	Acantilado de más de 200 m de altura con manantiales de aguas termales en pamukkale	60
Imagen N° 2.11	Planta de extracción de boro	61
Imagen N° 2.12	Turbogenerador de 250 kw	63
Imagen N° 2.13	Diferentes tipos de energía geotérmica	66
Imagen N° 2.14	Aprovechamiento del calor de la tierra	67
Imagen N° 2.15	Red de captadores horizontales de polietileno antes de ser enterrada	70
Imagen N° 2.16	Diagrama esquemático de un sistema geotérmico en forma de un doblete acuífero profundo	73
Imagen N° 2.17	Utilización del calor en aguas subterráneas	75
Imagen N° 2.18	Utilización del calor en aguas termales	76
Imagen N° 2.19	Campo de sondas geotérmicas	78
Imagen N° 2.20	Cestas geotérmicas	80
Imagen N° 2.21	Sondas geotérmicas verticales	81
Imagen N° 2.22	Geoestructura geotérmicas	82
Imagen N° 2.23	Tubos intercambiadores de calor	83
Imagen N° 2.24	Muros de contención con 90 pilotes geotérmicos	84

Imagen N° 2.25 Extracción de calor de rocas cristalina	85
Imagen N° 2.26 Principio de funcionamiento Geotermico	87
Imagen N° 2.27 Sonda geotérmica vertical	88
Imagen N° 2.28 Sistema de calor desde sótano	89
Imagen N° 2.29 Calefacción y refrigeración	91
Imagen N° 2.30 Túneles de drenaje	92
Imagen N° 4.1 Visualización e idealización yacimiento geotérmico	116

RESUMEN

Este proyecto de investigación rescata la importancia de la modelización y adicionalmente una simulación para obtener el potencial geotérmico para la instalación de una central geotérmica en Pinaya en una región específica ubicada en Puno, por lo tanto, tiene un beneficio energético, técnico y social para la región y porque no, para todo el sur del país. Este proyecto ayudará al yacimiento durante la etapa de exploración inicial antes de invertir en la perforación de pozos.

Esto requiere una información geológica mínima que será proporcionada , en nuestro caso en la zona geotermal de Pinaya en Puno se obtuvieron los datos actualizados de tipo geológicos , geoquímicos y geofísicos aplicables del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) es un organismo público técnico especializado, adscrito al Ministerio de Energía y Minas del Perú, cuya labor es la investigación de la geología básica, los recursos del subsuelo, los riesgos geológicos y el geoambiente en Perú, con esta información se planteará una metodología apropiada para lograr una adecuada estimación con un modelo conceptual del yacimiento llamada Análisis Volumétrico y tener un aceptable nivel de confianza en las estimaciones del potencial disponible en el reservorio. Aplicando criterios técnicos de evaluación del yacimiento y obtener un gran margen de seguridad y se logrará el potencial energético que se tiene en el yacimiento de la central electrotermia en la región Puno.

Palabras claves Geotermia, Entalpia, Modelo Volumétrico, Potencia, yacimiento, Energía en roca, Energía en fluidos, Calor específico, Porosidad, Eficiencia de conversión, Factor de Planta.

ABSTRACT

This research project rescues the importance of modeling and additionally a simulation to obtain the geothermal potential for the installation of a geothermal power station in Pinaya in a specific region located in Puno, therefore, it has an energy, technical and social benefit for the region and why not, for the whole south of the country. This project will help the reservoir during the initial exploration stage before investing in well drilling.

This requires a minimum geological information that will be provided, in our case in the geothermal area of Pinaya in Puno we obtained the updated geological, geochemical and geophysical applicable data from the Geological, Mining and Metallurgical Institute (INGEMMET) is a specialized technical public body , assigned to the Ministry of Energy and Mines of Peru, whose work is the investigation of basic geology, the resources of the subsoil, the geological risks and the geoenvironment in Peru, with this information an appropriate methodology will be proposed to achieve an adequate estimation with a conceptual model of the reservoir called Volumetric Analysis and have an acceptable level of confidence in the estimates of the potential available in the reservoir. Applying technical criteria to evaluate the deposit and obtain a large margin of safety and achieve the energy potential that is in the reservoir of the electrothermal plant in the Puno region.

Keywords Geothermal energy, Enthalpy, Volumetric model, Power, deposit, Energy in rock, Energy in fluids, Specific heat, Porosity, Conversion efficiency, Plant factor

INTRODUCCIÓN

La presente tesis de investigación se refiere a modelar y simular el potencial energético geotérmico para la generación de electricidad mediante la instalación de una central termoeléctrica en la zona Pinaya región de Puno"

La característica principal de este tipo de métodos para modelar un yacimiento geotérmico requiere de un conocimiento profundo de los parámetros físicos de la zona de estudio o campo, tales como permeabilidad, porosidad, temperatura a la que se encuentra el recurso, así como propiedades termodinámicas del fluido, entre otros.

La investigación de esta problemática es modelar y simular el potencial para generar energía renovable y que se realizó por el interés del comportamiento en el yacimiento en Pinaya zona de exploración y que en futuro pueda tener su explotación, además resulta de vital importancia e interés para la solución de problemas prácticos, y la posterior toma de decisiones en etapas de prefactibilidad, implementación de una instalación de un central geotérmica y que sea capaz de utilizar el recurso en la superficie, para la generación de electricidad.

Profundizar el tipo de método a utilizar se tuvo en cuenta factores tecnológicos, factores económicos y factores ligados al marco institucional, así como fundamentos teóricos necesarios para precisar sus resultados, su complejidad como fue la toma decisión en la elección del modelo de análisis volumétrico .En el marco de la metodología sobre el análisis volumétrico se tuvo que realizar los cálculos y se utilizaron las formulas sobre el análisis volumétrico en la plataforma de Microsoft Excel (macros), para definir las propiedades correspondientes a cada estado sobre el potencial geotérmico y el tiempo de explotación y durante la simulación de la explotación del yacimiento geotérmico.

El objetivo de la presente tesis es modelar y simular el potencial energético geotérmico para generar electricidad mediante la instalación de una central termoeléctrica en la zona Pinaya en la región de Puno y analizar la cantidad de potencial geotérmico que se podría tener para una central termoeléctrica, así como también diferenciar las características del lugar en situ y de acuerdo a los datos que se tomaron por el Ingemmet en el lugar para la obtención de potencial geotérmico. Finalmente se define el potencial geotérmico cuando se ajusta la potencia instalada para el yacimiento de tal forma que éste alcance las condiciones de abandono que serán definidas previamente, en el tiempo establecido para la vida útil del proyecto.

La tesis se encuentra dividida en siete capítulos teniendo en un principio con el planteamiento del problema, ¿De qué manera se podría realizar el modelamiento y simulación del potencial energético geotérmico, para la generación de electricidad mediante la instalación de una central termoeléctrica en la región de Puno-Pinaya?

El segundo capítulo denominado como marco teórico y comprende los antecedentes donde se muestra una serie de proyectos relacionados con la tesis a nivel internacional y nacional, también se tiene un marco teórico en donde se enfoca lo siguiente conceptualmente:

Primero, un análisis filosófico sobre la investigación amparándose en tres ejes filosóficos como son: Ontológico, metodológico y epistemológicos.

Segundo, se visualiza los antecedentes geotérmicos en el Perú, y los recursos energéticos renovables, como también la definición de la geotermia y sus manifestaciones y los tipos de técnicas geotérmicas

En el tercer capítulo, se refiere a las hipótesis donde presentamos las posibles soluciones de modelar y simular el potencial geotérmico.

En el cuarto capítulo se tiene el diseño metodológico donde se realiza una recopilación y evaluación de los métodos actuales de exploración geotérmica, como se sabe, los recursos geotérmicos se encuentran a diversas profundidades en el subsuelo y no siempre existen evidencias superficiales de su presencia, por lo que es preciso llevar a cabo métodos indirectos para tratar de encontrarlos y evaluarlos de manera preliminar.

Para ello se tienen diferentes modelos conceptuales para evaluar el potencial energético, en nuestro caso en la zona geotermal de Pinaya en Puno se obtuvieron los datos actualizados de tipo geológicos, geoquímicos y geofísicos aplicables del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) es un organismo público técnico especializado, adscrito al Ministerio de Energía y Minas del Perú, cuya labor es la investigación de la geología básica, los recursos del subsuelo, los riesgos geológicos y el geoambiente en Perú.

Finalmente, con esta información se planteó una metodología apropiada para lograr una adecuada estimación con un modelo conceptual del yacimiento llamada "Análisis Volumétrico" y tener un aceptable nivel de confianza en las estimaciones del potencial disponible en el reservorio, para esto se tomaron en cuenta factores geológicos y físicos, factores tecnológicos, factores económicos, factores ligados al marco institucional para la elección de la metodología adecuada y finalmente se adiciona en este capítulo una serie de definiciones de términos básicos.

En el quinto capítulo se muestran los resultados de la evaluación del potencial geotérmico en la zona de Pinaya en Puno, donde se estimó el potencial geotérmico instalable probable para la zona de estudio mediante el modelo de análisis volumétrico.

En el sexto capítulo se refiere a la contratación de hipótesis con los resultados descriptivos.

CAPÍTULO I

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción de la realidad problemática

El Perú es un país que cuenta con un gran potencial de recursos geotérmicos que de ser explotados correctamente, ayudarían a diversificar nuestra matriz energética, así mismo los usos directos como la balneología en turismo, y utilización del calor para para invernaderos y calefacción de hogares en las zonas alto andinas para mitigar el friaje, sin embargo actualmente no existen muchas investigaciones para dar mayor información de esta riqueza geotérmica , una de ellas está ubicada en la región de Puno en la zona de Pinaya, , lo cual nos da muchos temas más para investigar y aplicar criterios técnicos para obtener el potencial energético disponible.

Pinaya, ubicada en el distrito de Santa Lucía, fue catalogada como una zona geotérmica promisorio en la región Puno (JICA, 2012). Según los geotermómetros, los reservorios geotérmicos podrían alcanzar temperaturas entre 181° a 193°C (Huamaní, 2001) considerados dentro del rango de alta entalpía, por esto se puede utilizar para múltiples usos y hasta energía eléctrica (Llopis, 2008).

Para ello se estará planteando una metodología apropiada y lograr una adecuada estimación con un modelo conceptual del yacimiento y tener un aceptable nivel de confianza en las estimaciones del potencial disponible en el reservorio

En este sector no existe vulcanismo reciente, sólo lavas andesíticas dacíticas del Grupo Sillapaca con dataciones radiométricas de 13.6 Ma (Klinck et al., 1986), cortado por el sistema de falla regional Lagunillas.

De acuerdo a las metodologías establecidas en los manuales de OLADE (1994) e IGA (2013), en una etapa de exploración geotérmica, el ambiente

geológico debería ser menor de 3 o 5 Ma. Del mismo modo Moeck (2013), determina que los recursos geotérmicos pueden encontrarse controlados de acuerdo a la variedad de ambientes geológicos conectados por evolución geodinámica, sedimentaria, magmática y/o tectónica.

En un contexto geológico, el área de estudio se ubica entre la Cordillera Occidental y el Altiplano, 90 km al noreste del arco volcánico activo y 80 km al norte del volcán activo Ubinas.

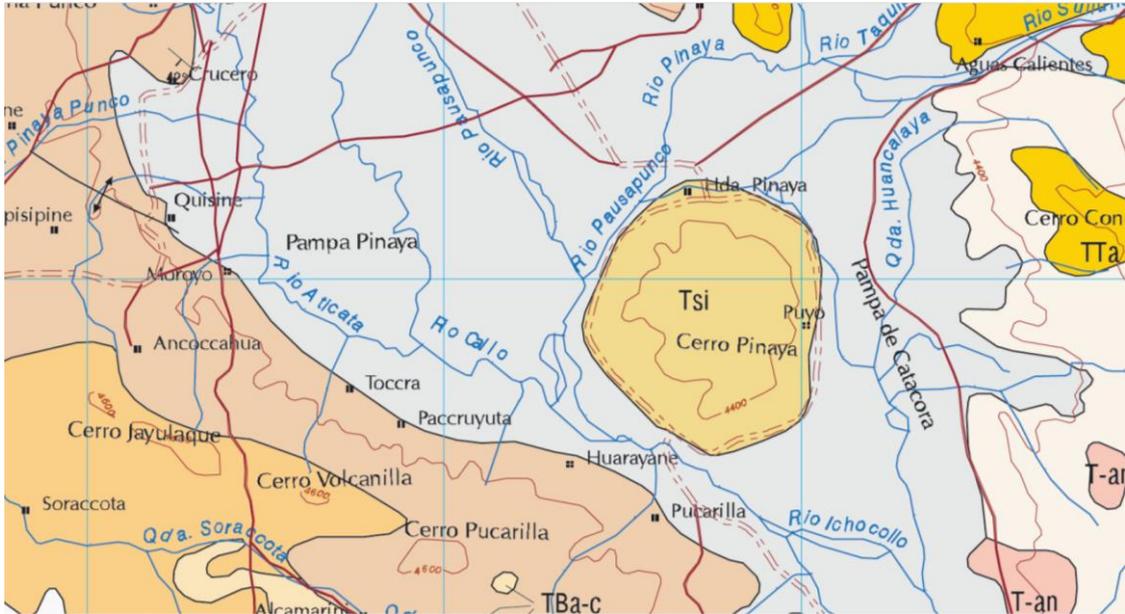
Además, afloran rocas sedimentarias de areniscas cuarzosas y calizas del Cretácico (Formación Hualhuani y Arcurquina) y secuencias plegadas de areniscas rojas y conglomerados del Eoceno-Oligoceno (Grupo Puno).

La descripción de Zonas con manifestación termal en la zona geotérmica Pinaya presenta manifestaciones termales de tipo fuente termal ubicada en los centros poblados de Pinaya, Atecata, Jaraña-Jarpaña y caserío Collpuyo (véase la figura N 1.1 en la página 19)

En Pinaya afloran tres fuentes termales: En el centro poblado de Pinaya a 36°C, en el cerro Aguas Calientes afluentes entre 65 a 83°C, presentan precipitaciones calcáreas reciente, entre su composición se identifica el yeso y calcita. En Collpuyo, las temperaturas superficiales oscilan entre 44-46°C, las precipitaciones consisten en capas con buzamiento 20° al sur, los minerales presentes son halita, cuarzo y calcita.

Imagen N° 1.1

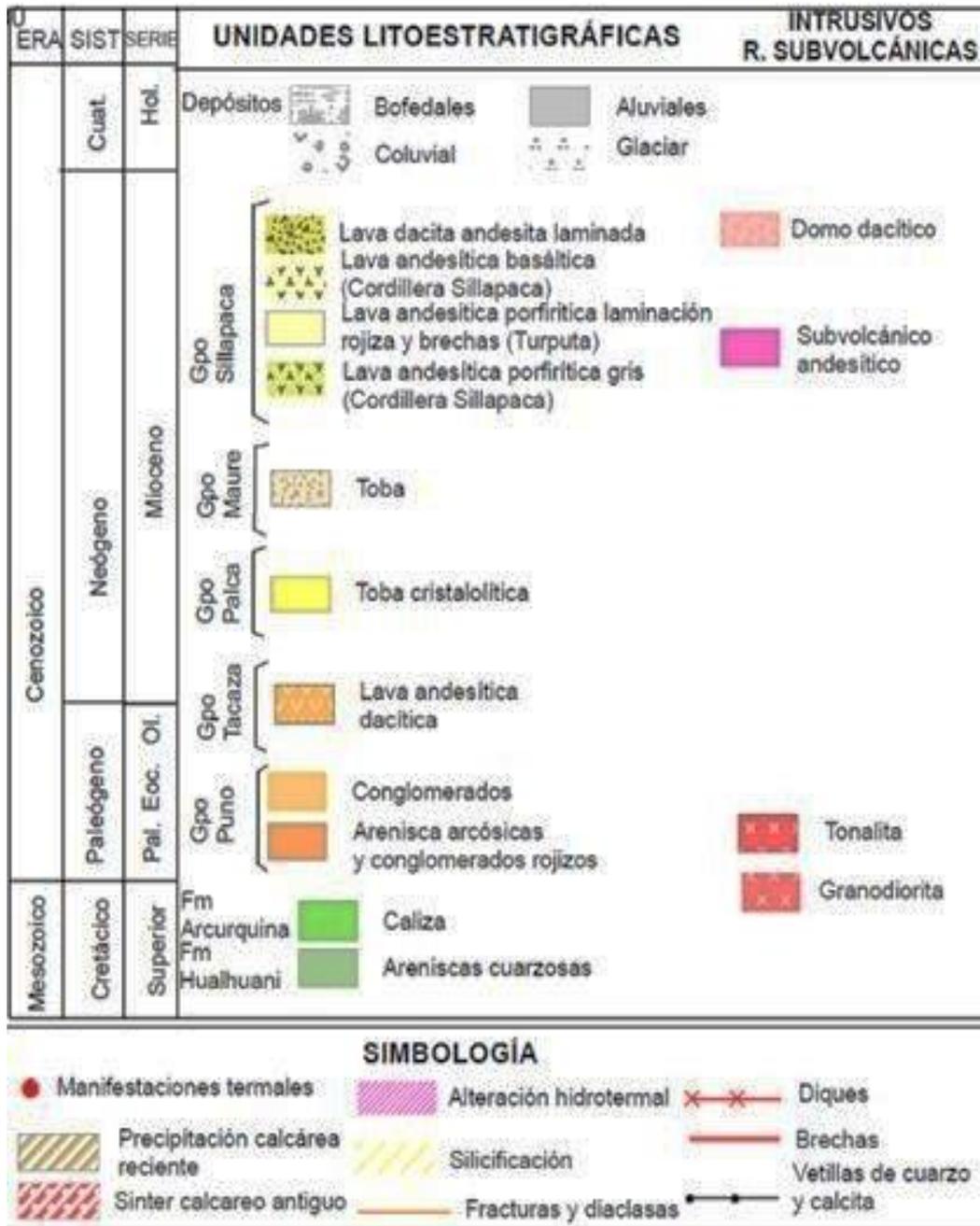
MAPA DE UBICACIÓN, GEOLOGÍA DE PINAYA



Fuente: Ingemmet, 2016

Tabla N° 1.1

TABLA DE ESFUERZOS EN LA ZONA GEOTERMICA DE PINAYA



Fuente: Ingemmet, 2016

Finalmente se concluye que no existen muchos aportes e investigaciones para tener propuestas como alternativas y dar futuras soluciones para la autorización de exploración en esta área de conservación, ya que la

industria geotérmica constituiría una significativa opción para el desarrollo de las comunidades, mediante proyectos para generación eléctrica a cargo de las empresas geotérmicas que podrían dinamizar la economía local promoviendo articulaciones de proyectos de desarrollo

Asimismo, se necesita motivar a los desarrolladores de proyectos geotérmicos a reconocer que las áreas de conservación regional son importantes y valiosas para la región Puno, tanto para la vida actual como para la futura. El problema lo podemos describir desde el punto de vista de los hechos, generalizaciones empíricas, datos e información estadística recopilada para este fin. A continuación, plantearemos el problema enfocándolo desde esos puntos de vista:

1.2 Formulación del problema

El reconocimiento o formulación del problema objeto de investigación, primordialmente se refiere a la selección general del problema enmarcado en las dimensiones epistemológicas que gobiernan las ciencias de la ingeniería eléctrica, consecuentemente, del problema general se ha desmembrado en problemas específicos a ser investigados con sus correspondientes sub objetivos y sub hipótesis de solución a dichos problemas.

Como colofón planteado la selección general del problema objeto de investigación, se justifica desmembrar o fragmentar de forma lógica mental en problemas específicos coherentes a las dimensiones que gobiernan las Ciencias de la Ingeniería Eléctrica, correspondientes en:

- Programas de Investigación
- Sub Programas de Investigación y en
- Líneas de Investigación

De igual manera, esta desmembración lógica mental metodológica de las Ciencias de la Ingeniería Eléctrica, ha sido desarrollada y validada en el Posgrado de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica el año 2013 por los Ph. D. Doctores en Ingeniería Eléctrica, Maestros en Ingeniería

Eléctrica, Doctores y Maestros en Metodología de la Investigación Científica y Docentes Doctores expertos en investigaciones científicas en la Facultad de Ingeniería Eléctrica e Ingeniería Electrónica, de la Universidad Nacional del Callao.

TABLA N° 1.2
DESMEMBRACIÓN LÓGICA MENTAL DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA

DESMEMBRACIÓN LÓGICA MENTAL DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA		
PROGRAMAS	SUB PROGRAMAS	LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN
I. Generación de Energía Eléctrica	A. Convencionales	a. Hidráulicas
		b. Térmicas
		c. Nucleares
		d. Geotérmicas
		e. A Gas
		f. Diessel
		g. Microcentrales
	B. No Convencionales	a. Biomasa
		b. Paneles solares
		c. Centrales eólicas
		d. Parques eólicas
		e. Mareomotrices
		f. Parques fotovoltaicos

Fuente: Tesis del Dr. Marcelo Nemesio Damas Niño y del Dr. Coloníbol Torres Bardales

1.2.1 Problema General

¿De qué manera se podría realizar el modelamiento y simulación del potencial energético geotérmico, para la generación de electricidad mediante la instalación de una central termoeléctrica en la región de Puno-Pinaya?

1.2.2 Problemas Específicos

- ¿Qué criterios se pueden aplicar en el modelo del potencial energético geotérmico, para la generación de electricidad mediante la instalación de una central termoeléctrica en la región de Puno-Pinaya?
- ¿Qué modelación es el apropiado para plantear el potencial energético geotérmico, para la generación de electricidad mediante la instalación de una central termoeléctrica en la región de Puno-Pinaya?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo General

- Realizar una modelación y simulación del potencial energético geotérmico para la generación de energía eléctrica y lograr la instalación de una central electrotermia en la región Puno.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Plantear una metodología para determinar el potencial apropiada y lograr una adecuada estimación con un modelo conceptual del

yacimiento para tener un aceptable nivel de confianza en las estimaciones del potencial disponible en el reservorio

- Aplicar criterios técnicos de evaluación del yacimiento y obtener una gran margen de seguridad y lograr la potencia eléctrica que se tiene en el yacimiento de la central termoeléctrica en la región Puno.

1.4 Limitantes de la Investigación

1.4.1. Teóricas

Como limitaciones teóricas se establece que debido a que no se cuenta con fuentes de información suficiente que trataran sobre el tema de metodología para obtención de potencial geotérmico en el Perú, tuve que realizar visitas a bibliotecas presenciales y virtuales en algunas universidades donde pude solo visualizar muy poca información.

Además es bueno considerar que en este apartado mencionar que cuando busque información sobre fuentes informativas como libros, artículos o sitios de internet fueron insuficientes para continuar con el desarrollo de la investigación, es necesario estar consciente de que muchas veces se tendrá que acudir hasta el lugar en donde se encuentra la información que se necesita, por lo que también es importante contar con tiempo disponible, organización y recursos financieros que sustenten los gastos del lugar al que se tenga que acudir, así como una buena dosis de paciencia a la hora de establecer contactos.

En nuestro país, no hay muchos investigadores sobre el tema de energías renovable en generación de energía geotérmica, ya que no contamos con ninguna central geotérmica.

1.4.2. Temporales

En cuanto a limitaciones temporales que se presentaron durante el desarrollo de la investigación de esta tesis, fue en primer lugar, el lidiar con la cita para llevar a cabo la entrevista con un miembro de El Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), ya que se tuvo que realizar varias llamadas y a la vez ir haciendo contactos e indagar quien resultaba la persona más indicada que pudiera brindar la información sobre los datos geológicos , así como mapas para la geolocalización de la zona geotermal de Pinaya en Puno, que se requería hasta que finalmente se logró el contacto con la Sra. Vicentina Cruz, quien es una especialista e investigadora del Ingemmet que realizó un estudio geoquímico de las fuentes termales de la zona geotermal de pinaya, santa lucia (puno); a pesar de ello, el “trámite” de la cita llevó poco más de dos meses para que se llevará a cabo, debido a las múltiples actividades y compromisos de la ingeniera. Se tenía contemplada también una reunión con un representante del Colegio de Ingenieros del Perú en Puno, pues mientras se establecían los contactos, se llegó a tener comunicación con un especialista Ing. Mario Ramos Herrera en donde quien se encargaba de realizar visitas continuas al cerro pinaya , pero lamentablemente no pudimos encontrarnos ya que tenía muchos urgencias en ese momento pero pudimos contactarnos por las redes sociales en donde gracias a él se pudo tomar datos superficiales en situ , ya que el realiza investigaciones sobre investigaciones en geotermia .

Con este apartado, simplemente se quiere dar a entender que para la realización de una investigación que requiera métodos

cualitativos, es necesario estar consciente de que muchas veces el poder llevar un ritmo adecuado o ir avanzando en el proyecto de tesis, no siempre va a depender uno, ya que muchos de los procedimientos cualitativos como la entrevista en profundidad sobre el tema, siempre van a tener una desventaja básicamente a causa del tiempo y disposición que tenga la gente con la que se planea contar. Por ello, es importante planear este tipo de acciones con tiempo y encontrar el momento adecuado para llevarlas a cabo, con el fin de evitar que circunstancias ajenas a uno, sean las causantes de impedir avances y resultados exitosos en el desarrollo del proyecto de tesis.

1.4.3. Espaciales

El proyecto de investigación se encuentra situado en el departamento de Puno en el distrito de Pinaya, ubicada en el distrito de Santa Lucía, fue catalogada como una zona geotérmica, sin embargo, para la toma de información se tuvo que viajar para realizar algunas tomas de datos y es un poco alejado de la misma ciudad de Puno.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

En el “estado del arte de búsqueda de la información” para el desarrollo de la presente investigación, se ha acopiado informaciones relevantes, relacionadas con la parte doctrinaria del modelado inicial para yacimientos geotérmicos, conjuntamente con los principios epistemológicos que gobiernan dimensionalmente las Ciencias de la Ingeniería Eléctrica.

2.1.1 Antecedentes de Tesis de Maestría N° 01

Martínez Juárez, Eduardo (2016) Universidad Nacional Autónoma De México

Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, Maestría en Ingeniería Energía – Economía De La Energía,” Evaluación De La Regulación De Los Recursos Geotérmicos en México”

❖ Objetivo:

Analizar el régimen jurídico de los recursos geotérmicos en México, especialmente recursos de baja entalpia

❖ Metodología:

Este modelo tiene como base la metodología desarrollada por Hiriart y Sánchez (1985), donde se resuelven las ecuaciones de conservación de masa y energía en función de las propiedades termodinámicas del fluido (agua-vapor), se plantean las ecuaciones diferenciales que simulan el comportamiento de un yacimiento geotérmico, considerándolo como un recipiente con permeabilidad infinita.

❖ Conclusiones:

México tiene una capacidad instalada de energía geotérmica de 985 MWe, sin embargo, algunos estudios estiman que el potencial

geotérmico del país puede llegar a más de 9000 MW, considerando la geotermia de alta, media y baja entalpía. La reciente reforma energética del país, promovió una reforma específica para impulsar el desarrollo de la geotermia, no sólo al cambiar el régimen de propiedad de la industria eléctrica, sino promoviendo el cambio en la Ley de Aguas Nacionales y una ley específica para la energía geotérmica. Sin embargo, la mayor parte de los proyectos que se pretende impulsar con la reforma energética no consideran el desarrollo de la geotermia de baja y media entalpía, que tiene un potencial muy importante para el desarrollo local y regional. En esta tesis se presentó un resumen de la importancia y desarrollo de este tipo de proyectos para México.

La hipótesis original del trabajo sustentaba que México requiere un cambio regulatorio para la promoción de la geotermia de baja y mediana entalpía. En el transcurso del desarrollo de la tesis, se aprobaron cambios constitucionales y de nuevas leyes que significan un cambio al régimen de producción de la energía, en particular la energía geotérmica. Bajo esta nueva premisa, se analizaron los principales cambios en la regulación energética y su aplicación para la energía geotermia de baja y media entalpía.

Bajo este esquema se encuentra el marco regulatorio actual, el cual permite implementar los proyectos de baja y media entalpía, solicitando los permisos y concesiones pertinentes durante el proceso si así fuera el caso. La claridad de esta homologación en los permisos por parte de la Secretaría de Energía, fue un logro de esta tesis. Sin embargo, es deseable la adecuación la Ley de Energía Geotermia para explicitar las concesiones de desarrollo de la geotermia de baja y media entalpía.

2.1.2 Antecedentes de Tesis de Maestría N° 02

Arcos Marcatinco Ofélia; Zegarra Elmer Francisco; Soto Quispe Oscar; Torres Soto Luis David (2017) Universidad Esan-Peru , Tesis del programa de la Maestría en Gestión de la Energía , "Evaluación de la Viabilidad del desarrollo Geotérmico del campo Chivay-Pinchollo en la región Arequipa para generación eléctrica con el fin de diversificar la matriz energética del Perú "

❖ Objetivo:

Objetivo General

- Estimar el potencial del recurso geotérmico de baja entalpía en la comuna de Colina, Región Metropolitana.

Objetivos Específicos

- Aplicar métodos de estimación del potencial geotérmico de baja entalpía en la comuna de Colina.
- Evaluar los métodos de estimación del potencial del recurso geotérmico en la comuna de Colina.
- Zonificar el recurso geotérmico de baja entalpía en la comuna de Colina.
- Proponer los posibles usos relacionados con la geotermia de baja entalpía en el área de estudio, en base a factores técnicos y económicos

❖ Metodología:

- La principal ventaja de la presente memoria es que se desarrolló y evaluó una metodología para la estimación del PGBE, permitiendo conocer las potencialidades del recurso geotérmico y al mismo tiempo, la factibilidad económica para su aprovechamiento. Por lo cual, esta metodología puede ser replicada en diferentes territorios del país con el objetivo de cuantificar el PGBE, incentivando el uso de esta energía limpia y renovable.

❖ Conclusiones:

- ✚ Mediante la realización de la presente memoria se concluyó que en la comuna de Colina existe un PGBE promedio por pixel de $17,69 \pm 3,69$ [kW]. En relación a los métodos utilizados para estimar este potencial se determinó que el método del volumen es la metodología más adecuada para cuantificar el PGBE de la comuna de Colina, dado que los resultados estimados con el método del flujo térmico superficial presentan una alta dispersión estadística y no son posibles de espacializar. Por otro lado, en cuanto a la estimación de las temperaturas del agua subterránea en profundidad el método que resultó ser el más adecuado fue la Ley de Fourier.

- ✚ Además, de las cuatro zonas establecidas en el presente trabajo el cluster 2 se da con mayor intensidad la actividad antrópica ya sea residencial o agroindustrial, presentando un PGBE promedio de $18,29 \pm 1,01$ kW y una profundidad promedio de la napa subterránea de $56,15 \pm 16,19$ [m]. El mayor PGBE se encuentra en el cluster 4 ($26,77 \pm 2$ kW) en éste se encuentran ubicadas las dos termas existentes en el área de estudio y esta zona posee un uso residencial nulo.

- ✚ En base a los resultados de la factibilidad técnica se recomienda utilizar las bombas de calor horizontal o vertical con fines de climatización residencial. En relación a la factibilidad económica se concluyó que existe una mayor rentabilidad en proyectos que utilicen las bombas de calor horizontal que las bombas de calor vertical.

- ✚ Respecto al análisis de sensibilidad las viviendas pertenecientes a los niveles socioeconómicos E y ABC1 presentan una mayor rentabilidad económica cuando utilizan las bombas de calor

(vertical u horizontal) en comparación con utilizar kerosene o gas licuado para calefacción. En cambio, cuando se compara con la electricidad los 3 escenarios socioeconómicos (E, C2, ABC1) resultan con alta probabilidad de ser rentable utilizar las bombas de calor.

2.1.3 Antecedentes de Tesis de Maestría N° 03

César Godínez Huerta (2013) de la Universidad Nacional Autónoma de México de la facultad de Ingeniería se realizó la Tesis Titulada, "Factibilidad De Un Proyecto Geo termoeléctrico Para La Zona De San Marcos Jalisco".

❖ Objetivo:

Determinar la factibilidad de poner en operación un campo geotérmico en la zona de San Marcos Jalisco, mediante la estimación del potencial geotérmico y evaluación económica, definiendo el costo nivelado de generación.

❖ Metodología:

Existe una metodología llamada Costo Nivelado de Generación (CNG) que es un indicador comparativo entre tecnologías de generación el cual permite cuantificar el costo unitario de la electricidad generada en kWh.

❖ Conclusiones:

- ✚ La energía geotérmica es una de las fuentes renovables disponibles en México, que se puede utilizar con muchas ventajas económicas y ambientales. Su exploración y desarrollo requiere de una serie de estudios técnicos y científicos que involucran a distintas disciplinas, además de una inversión considerable. En México La energía geotérmica juega un papel importante al contar

con zonas estratégicas para el aprovechamiento de este recurso a gran escala. Actualmente México cuenta con bastante experiencia en la generación geotérmica.

- ✚ La creación de un proyecto geotérmico es muy compleja, por tanto, se requerirá de estudios a detalle que permitan conocer las características de la zona en cuestión y de esta manera la toma de decisiones será acertada.
- ✚ Por otra parte, también se deberán considerar los aspectos medioambientales y sociales que pudieran afectar de una u otra forma las poblaciones de la zona.
- ✚ Los costos de generación geotérmica a nivel mundial se encuentran entre 5 y 10 ¢USD/kWh. Para el caso de México, específicamente para el campo de Los Azufres en Michoacán y Cerro Prieto en Baja California: Reportan costos de generación de entre 8.84 y 9.24 ¢USD/kWh. Estos costos son altamente dependientes de las características del área a explotar.
- ✚ El costo calculado para la zona de San Marcos Jalisco es de 7.13 ¢USD/kWh para una planta de generación geotérmica con una potencia instalada de 21 MW, siendo este un valor que se encuentra dentro del rango reportado para la energía geotérmica y a opinión de los expertos en materia un valor aceptable y realista.
- ✚ El costo nivelado al cual se llegó sin duda es un valor estimado que debe ser considerado, sin embargo, no se puede tomar como exacto pues los costos pueden variar. Por otro lado, es necesario considerar las externalidades para la generación ya que estos también influyen en el resultado. Para tener una idea de qué podría pasar si se elevan o bajan los costos, se deberá realizar un

análisis de sensibilidad para hacer una comparación y saber en qué casos el proyecto dejaría de ser viable.

- ✚ La potencia geotérmica posible a instalar será de 21 MW, para tener una idea más apegada al potencial se deberán realizar más estudios en la zona. Sin embargo, este potencial siempre será una estimación aproximada debido a que la parte de exploración geotérmica de donde se toman los datos para la evaluación tiene su grado de incertidumbre y es muy difícil saber qué es lo que se encuentra y ocurre a grandes profundidades.
- ✚ Se puede concluir de acuerdo a este estudio que la construcción y puesta en marcha de una planta de generación geotérmica para la zona de San Marcos Jalisco, es técnica y económicamente viable.

2.2 Base Teóricas

La presente investigación es de suma importancia, por tratarse de la modelamiento y simulación del potencial energético geotérmico para la generación de electricidad mediante la instalación de una central termoeléctrica en la zona Pinaya región de Puno.

Amparándose en tres ejes filosóficos como son: en lo ontológico sobre la concepción del ser humano generando el compromiso de asumir fundamentalmente nuevas fuentes de generación de energía mediante la utilización de recursos renovables ,de igual manera, en lo metodológico aplicando nuevos métodos, técnicas y/o estrategias para la solución total de los problemas y en lo epistemológico que trata la parte doctrinaria que toda investigación tiene y que se concibe en el “cómo debe de ser” la solución al problema objeto de investigación.

2.2.1 Fundamentación Ontológica

En la presente investigación experimental aplicada, vulnerable y transversal, la ontología como parte de la filosofía trata sobre el “universo del ser” para valorar la existencia y realidad de la calidad del producto eléctrico en beneficio de los usuarios industriales, comerciales y residenciales (Onto = ser, ente. Logo = estudio, ciencia, teoría), y como la principal responsabilidad del investigador científico es conocer, entender y sistematizar el problema objeto de estudio sobre la generación de energía geotérmica es prioritaria en la matriz energética del país, dado que se cuenta con otros recursos, como la hidroelectricidad.

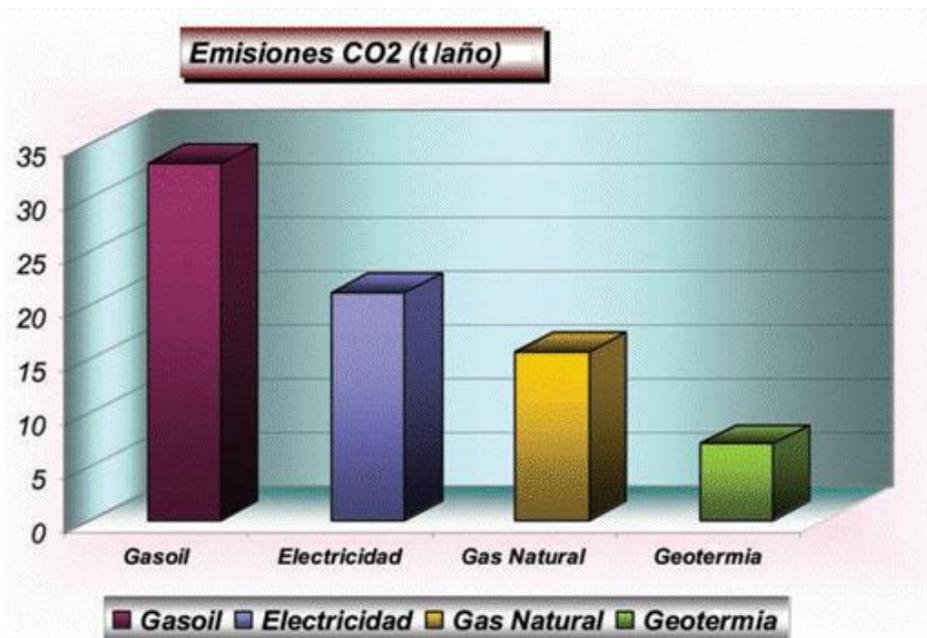
Por lo que la etapa de la exploración está en pleno desarrollo y está a cargo del sector privado y se espera que sigan apostando, a pesar del riesgo, finalmente el Perú posee un gran potencial para el desarrollo de la Energía Geotérmica en el sur del país (2860 MWe), según el Plan Maestro. Concluyentemente, aplicar Criterios del potencial energético disponible, potencia eléctrica requerida y la eficiencia energética. Plantear una metodología utilizando los parámetros del calor y del subsuelo y la profundidad de extracción de la fuente energética, Determinar el costo que implica la aplicación del modelamiento matemático y los costos de explotación y del recurso energético.

La energía renovable es mucho más limpia que los combustibles fósiles. Mientras que tanto la minería del carbón y la explotación del petróleo tienen desechos tóxicos como por ejemplo el mercurio y otros metales pesados que contaminan tanto el agua como el aire. La gasolina, que es un derivado del petróleo también contamina el ambiente y provoca lluvia ácida que destruye a los ecosistemas además de agotar la capa de ozono.

Las centrales geotérmicas producen muy poca contaminación ambiental. Las emisiones de CO₂ de una central geotérmica son aproximadamente 1/6 de las emisiones de una central térmica a gas por Kwh producido. Además, varios estudios sugieren que el potencial eléctrico de los recursos geotérmicos es de 10 a 100 veces la generación actual.

El potencial de uso directo tiene múltiplos similares al uso actual. Si bien la estimación del potencial de energía geotérmica es difícil, el consenso de la industria es que el crecimiento no se verá restringido por los recursos durante el próximo medio siglo.

Tabla 2.1
EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO CO₂ CON DIFERENTES FUENTES DE ENERGÍA EN UNA VIVIENDA-TIPO DE 150 M².



Fuente: Calor Natural. Ruiz J. 2007

El vapor usado por las centrales geotérmicas incluye gases incondensables tales como CO₂ (Dióxido de carbono), H₂S (Hidrogeno de sulfuro), NH₃ (Amoníaco), CH₄ (Metano), N₂ (Dinitrógeno) y H₂ (Dihidrógeno) en valores entre 2,5 y 47 gramos de contaminante por kg de vapor. El ácido sulfídrico H₂S es el contaminante de mayor preocupación en las centrales geotérmicas, ya que afecta corrosivamente a los equipos eléctricos.

2.2.2 Fundamentación Metodológica

En la presente investigación la fundamentación metodológica, se refiere al “universo del hacer”, para tener un aceptable nivel de confianza en las estimaciones del potencial disponible en el reservorio, se recurre a la aplicación de los distintos métodos de evaluación del yacimiento, cada una con distintas simplificaciones y diferente grado de complejidad, lo que da un gran margen de seguridad en los resultados:

- Calor remanente GEOCOST
- Análisis Volumétrico.
- Modelo Termodinámico
- Modelo USGS con Simulación de Montecarlo
- Descompresión gradual

Con anterioridad se ha tratado de realizar la predicción del comportamiento de un yacimiento geotérmico ante la instalación de una central de generación.

Finalmente se presenta la discusión de los resultados obtenidos al tener la información recolectada in situ, definiendo que el método de análisis volumétrico es el más accesible por los datos que presentan y que sirvió para concluir sobre el potencial eléctrico del yacimiento y recomendar acerca de su explotación.

En la recolección de datos se obtuvieron los siguientes datos de temperaturas, en la Zona Geotermal de Pinaya (ZGP). Para que un recurso geotérmico pueda ser explotado económicamente se necesita verificar su existencia y localización en suelos, rocas o acuíferos y posteriormente determinar sus características al objeto de estimar su potencial energético.

La amplitud y complejidad de los estudios previos que hay que llevar a cabo serán de mayor o de menor envergadura dependiendo del tipo de recurso que se tenga intención de explotar. Tal y como se encuentran en la Tierra los recursos geotérmicos no pueden ser aprovechados por el hombre. Para ello es necesario convertirlo en una forma de energía directamente utilizable.

El concepto de Metodología hace referencia al plan de investigación que permite cumplir ciertos objetivos en el marco de una ciencia, por lo tanto, puede entenderse a la metodología como el conjunto de procedimientos que determinan una investigación de tipo científico o marcan el rumbo de una exposición doctrinal. El vocablo Metodología es generado a partir de tres palabras griegas: meta = más allá, odós = camino y logos = estudio, sin embargo, es importante la distinción entre el método (nombre que recibe cada plan seleccionado para alcanzar un objetivo) y la metodología (rama que estudia el método).

2.2.3 Fundamentación Epistemológica

Este proyecto de investigación tiene como finalidad una simulación para la explotación de energías renovables o no convencionales en una región específica ubicada en Puno, por lo tanto, tiene un beneficio energético, técnico y social para la región y porque no,

para todo el sur del país. Este proyecto ayudará al yacimiento durante la etapa de exploración inicial antes de invertir en la perforación de pozos.

Esto requiere primero una información geológica mínima que será proporcionada por INGEMMET, que es una institución estatal responsable de realizar investigaciones geoquímicas en sitios de exploración geotérmica en diferentes partes del país, segundo con esta información un modelo de un depósito geotérmico específico que proporciona información sobre el comportamiento de lo mismo y eso también nos permite predecir o estimar el tiempo que puede ser explotado; tercero teniendo en cuenta aspectos como: reinyección, transferencia de calor transferido desde la roca al fluido, presión, volumen idealizado del depósito y porosidad, se llevará a cabo una simulación 3D, que es una herramienta de software que ofrece un entorno para visualizar la magnitud del proyecto y un desarrollo integrado para la ejecución de datos preliminares en el diseño de estrategias de exploración en depósitos de simulación dinámica.

2.3 Conceptual

2.3.1 Antecedentes geotérmicos en el Perú¹

La evaluación del potencial geotérmico en el Perú se inició en los años 70 con el inventario de fuentes termales a nivel de todo el territorio peruano (Ingemmet). Estos estudios fueron realizados por el Servicio Geológico del Perú, Ingeomin -posteriormente Ingemmet. Luego se emprendieron varios trabajos específicos relacionados a la

¹ Cruz Paucara, Vicentina. Vargas Rodríguez, Víctor. Cacya Dueñas, Lourdes. Geodinámica e ingeniería geológica –Caracterización y evaluación del potencial geotérmico de la región Moquegua; Boletín N° 58:12. agosto 2014

evaluación del potencial geotérmico del Perú, tanto por iniciativa privada, pública y a través de la Cooperación Técnica Internacional.

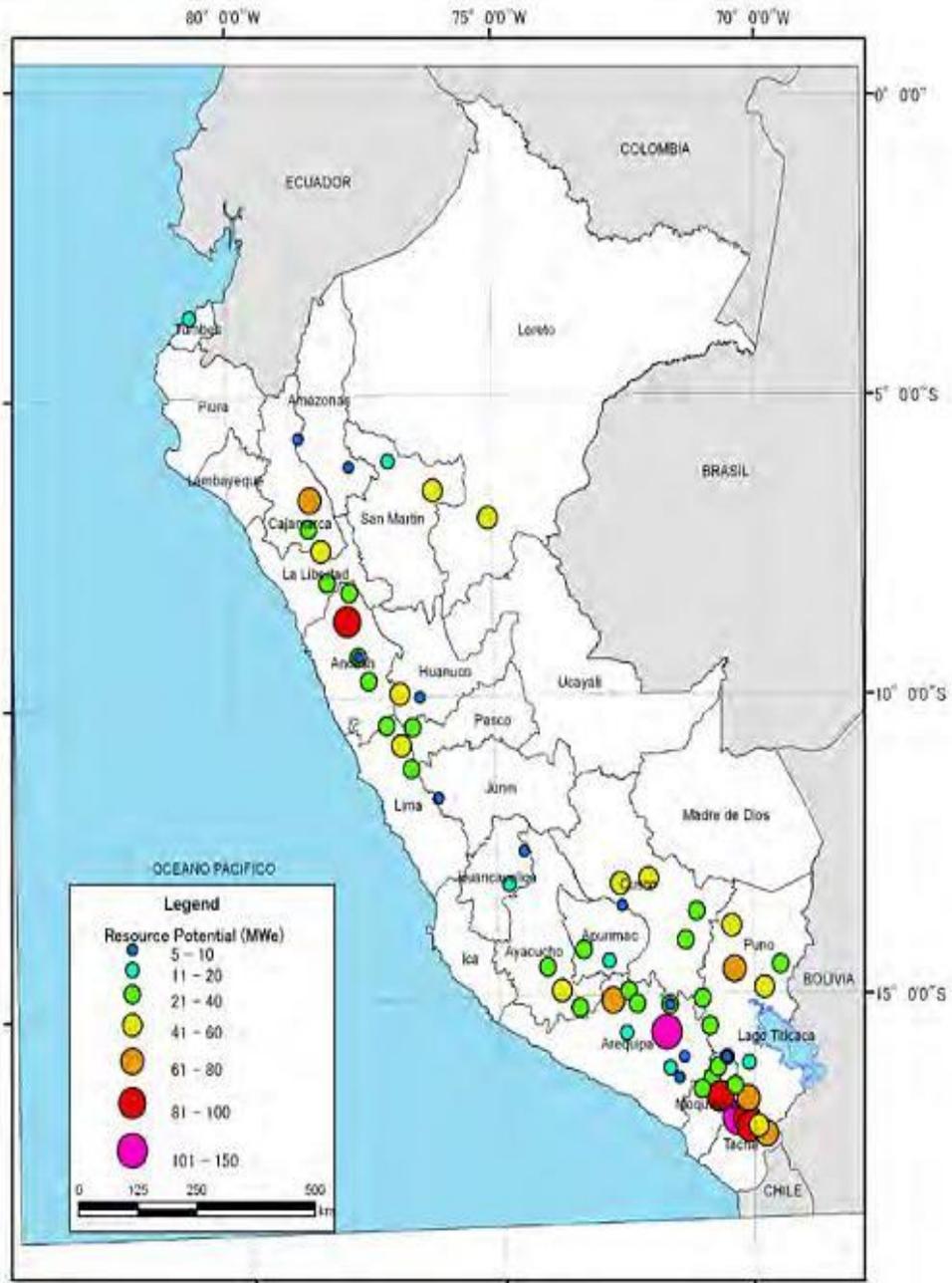
En 1988, el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) auspició un estudio similar en la zona (Electrosur S.A.). En el año de 1999, en virtud al convenio de cooperación técnica IPEN-PET, se efectuó el proyecto denominado PER 08/012 “Estudio del Potencial Geotérmico del Altiplano Sur”. A finales del 2006, por iniciativa del Minem, y en base a la suscripción del “Memorándum de Entendimiento” entre el Minem y el Japan Bank International Cooperation (JBIC), Ingemmet retoma los estudios de “Evaluación del Potencial Geotérmico del Perú”, realizando investigaciones de exploración geológica y geoquímica de las manifestaciones geotermales por regiones.

La finalidad fue contar con una base técnico-científica, que permitiera conocer el verdadero potencial geotérmico del país y, de esta manera, promover actividades de exploración y explotación de nuestros recursos geotérmicos en sus diversas escalas. En el año 2008, el Ingemmet realiza la actualización del Mapa Geotérmico del Perú, Vargas, 2008, (véase la figura N° 2.2, en la página “48”), en el cual se muestran 6 regiones geotérmicas.

La región Moquegua se localiza en la región 5, donde las manifestaciones geotermales están asociadas a fluidos de origen volcánico y en algunos casos mixtos; es decir, la acción del agua meteórica que se infiltra al subsuelo y en profundidad se ve influenciada por alguna fuente de calor, asociada en su mayoría a la actividad magmática.

Las mayores reservas de energía geotérmica se localizan en el eje volcánico sur, o región V.

Imagen N° 2.1
MAPA GEOTÉRMICO DEL PERÚ



Fuente: Master Plan ,2012

2.3.2 Eje volcánico sur del Perú²

Está considerada como la región más importante de todas, tiene una extensión aproximada de 104 498 km², comprende parte de los departamentos de Ayacucho, Apurímac, Cusco y, principalmente, los departamentos de Arequipa, Moquegua y Tacna. Aquí se tienen inventariadas alrededor de 300 manifestaciones geotermales, entre fuentes termales, géiseres, fumarolas, entre otras (Vargas, 2008).

La estratigrafía de esta región está dominada por la presencia de rocas volcánicas paleógenas y, sobre todo, neógenas (Gpo. Barroso), evidenciando también un vulcanismo reciente. Estas rocas sobreyacen a un substrato Cretáceo y al Jurásico (Gpo. Yura y Fm. Chocolate).

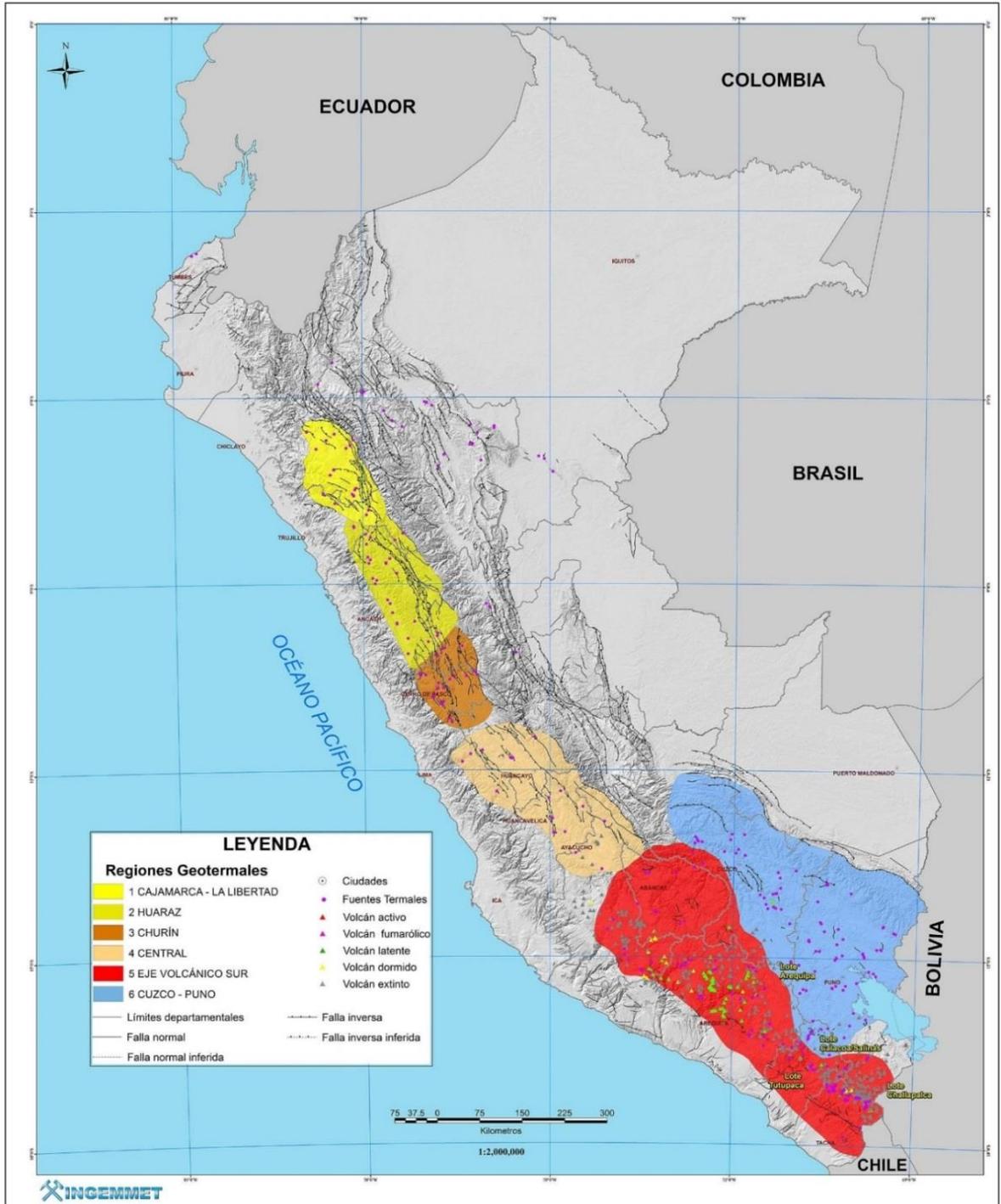
En la extensión del eje volcánico se tiene registrada la presencia de más de 300 centros volcánicos, dentro de los cuales destacan por su actividad reciente, los volcanes Misti, Ubinas, Ticsani, Sabancaya, Huaynaputina, Tutupaca y Yucamane. Todos estos volcanes tienen un control estructural regional NW-SE y NE-SW, y la presencia de aguas termales en esta región están asociadas a ellos.

Los fenómenos volcánicos y estructurales han originado que las rocas volcánicas y el basamento estén fuertemente fracturados, factor que controla la recarga, circulación y descarga de los fluidos geotérmicos, sea en zonas profundas o superficiales.

² Cruz Paucara, Vicentina. Vargas Rodríguez, Víctor. Cacya Dueñas, Lourdes. Geodinámica e ingeniería geológica –Caracterización y evaluación del potencial geotérmico de la región Moquegua; Boletín N° 58:12. agosto 2014

Imagen N° 2.2

MAPA DE REGIONES GEOTÉRMICAS EN EL PERÚ



Fuente: C Vargas, 2014

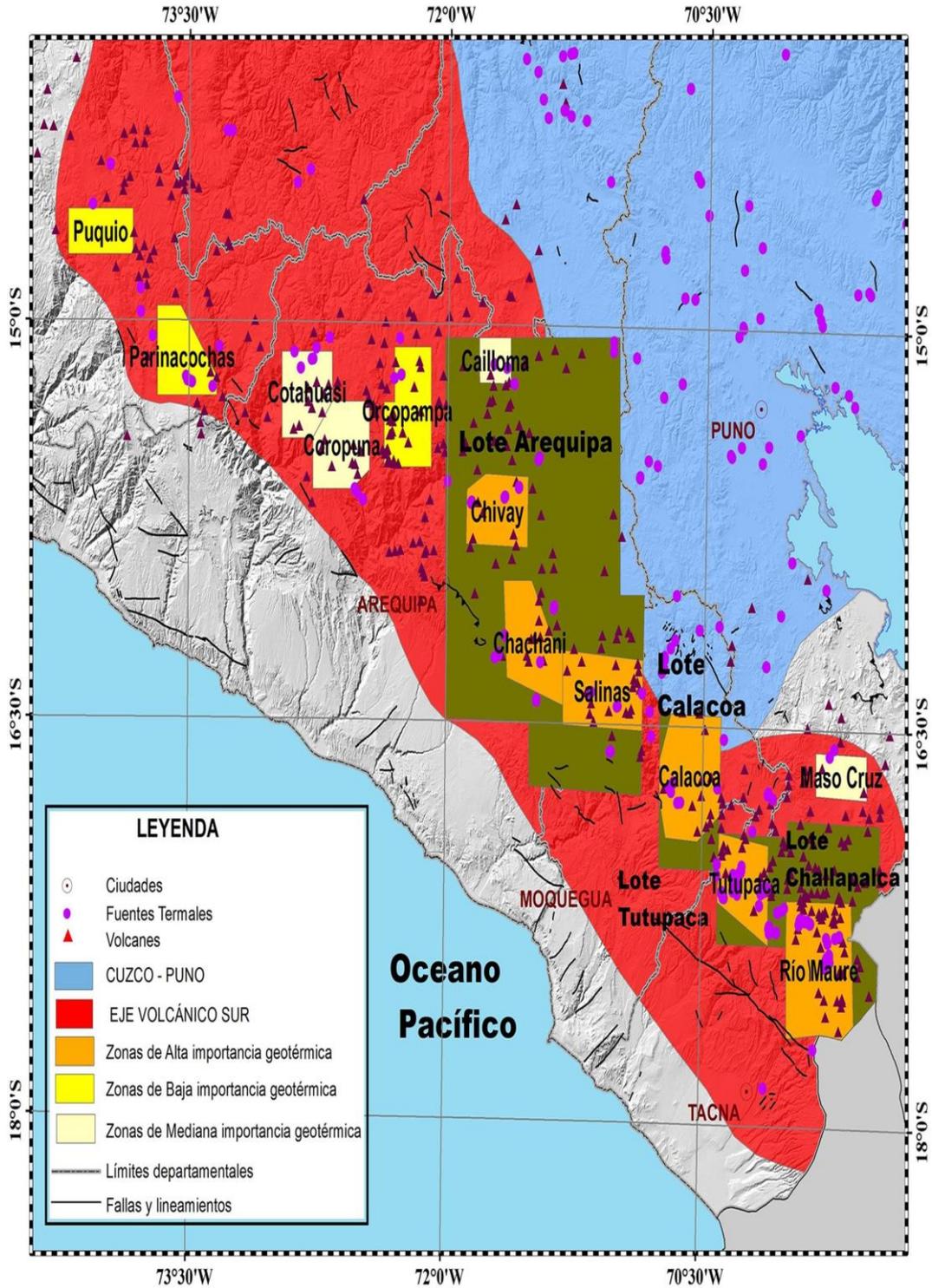
Las altas temperaturas registradas en las manifestaciones se deben, principalmente, a que existen fuentes de calor (cámaras magmáticas) que pueden estar en contacto con acuíferos profundos; o que, a través de estructuras profundas, transmiten el calor hacia la superficie, aumentando la temperatura de las aguas de acuíferos superficiales. Adicionalmente, se tiene que muchas de las fuentes termales en esta región tienen un origen juvenil (sea magmático o volcánico).

La región V es la más estudiada, donde se ha realizado el mayor número de investigaciones geotérmicas, logrando distinguir preliminarmente diversas áreas de interés. Ingemmet, Olade y el IIE (Barragán et al., 1996; Birkle et al., 1996; Torres et al., 1997) llevaron a cabo estudios de reconocimiento geotérmico y definieron las siguientes zonas de interés (véase la figura N^o 2.3, en la página “50”).

- Grupo A: Prioritario de interés geotérmico: Tutupaca, Río Maure, Calacoa, Salinas, Chachani y Chivay.
- Grupo B: Intermedio de interés geotérmico: Puquio, Parinacochas y Orcopampa.
- Grupo C: Bajo de interés geotérmico (present an baja entalpía): Cotahuasi, Coropuna, Caylloma y Mazo Cruz.

Imagen N° 2.3

UBICACIÓN DE LOTES Y ÁREAS GEOTÉRMICAS EN LA REGIÓN V.



Fuente; INGEMMET mapa geotérmico, región V

2.3.3 Recursos Energéticos Renovables

- **Energía Eólica:**

La energía eólica es la que está presente en forma de energía cinética en las corrientes de aire o viento. La energía eólica puede transformarse principalmente en energía eléctrica por medio de aerogeneradores, o en fuerza motriz empleando molinos de viento.

- El potencial eólico en el Perú lamentablemente no está plenamente estudiado. En los lugares de mayor proyección, ELECTROPERU ha realizado mediciones. Esto es el caso de Punta Malabrigo, de Yacila en Piura y de Marcona en Ica. En Malabrigo se midió durante un año (1988-89) velocidades promedio de 9,0 m/s.
- Información base: SENAMHI encargada de evaluar los registros de viento a nivel nacional. CORPAC registra en los aeropuertos la velocidad y dirección del viento. ELECTROPERU registró información la cual no es habida.
- Principales estudios realizados: Mapa Eólico preliminar del Perú, con registros de 48 estaciones. Estudio Nacional de Evaluación de Aerobombas.

- **Biomasa:**

Como en muchos países en vías de desarrollo, la leña representa una parte importante en el balance de energía del Perú: más de 20 % de la energía primaria corresponde a leña y bosta, usado básicamente para cocción. La leña ocupa el tercer lugar de consumo final total. El uso técnico de la biomasa como fuente de energía se da en distintas formas: biomasa para producción de calor, biodigestores para producción de gas y biocombustibles.

- **El potencial Biomasa:** El potencial de la biomasa en el Perú aún no ha sido plenamente estudiado, básicamente los proyectos actuales han surgido de la identificación por parte principalmente de la

industria, de las potencialidades de la biomasa derivada de sus procesos productivos, sobre todo para la producción de calor y/o electricidad. Su desarrollo más difundido es mediante el uso de biodigestores y biomasa y biocombustibles, como se ve a detalle de la siguiente forma:

- ❖ **Biodigestores:** En el Perú existen 106 biodigestores con predominio de los modelos artesanales chinos, usados principalmente para la generación de gas, el cual es quemado para la generación de calor. Existen biodigestores industriales en empresas avícolas utilizados para la producción de calor.

- ❖ **Biomasa:** en el Perú se encuentra en operación la CT. paramonga de la empresa AIPSA, la cual tiene una potencia instalada de 23 MW, y utiliza como combustible la quema del bagazo de caña obtenido del proceso de producción de azúcar; el calor generado sirve para producir vapor el cual provee de fuerza motriz para la generación de electricidad a través de una turbina a vapor.

- ❖ **Biocombustibles:** proyecto Agroindustrial Caña Brava, donde se cultiva caña de azúcar para la producción de etanol, su planta se encuentra ubicada en Sullana – Piura. La planta, con las siete mil hectáreas de caña de azúcar, puede producir 350 mil litros de etanol diarios y retroalimentarse de energía aprovechando la caña cortada, la cual puede generar hasta 12 MW de electricidad.

- **Energía Geotérmica:**
El calor es una forma de energía y la energía geotérmica es el calor contenido en el interior de la Tierra que puede o podría ser recuperado y explotado por el hombre. Desde la década de los 70 se han realizado en el Perú diversos trabajos de exploración del potencial geotérmico, identificando varias zonas potencialmente

interesantes, especialmente en el sur (Moquegua y Tacna). En el país se han reconocido más de doscientas vertientes de agua caliente, así como fumarolas y algunos geysers. Información base: INGEMMET inventario y reconocimiento geotérmico. ELECTROPERU investigaciones en algunas zonas del país.

Los principales estudios realizados:

-INGEMMET, 1978: Elaboró un inventario y agrupación geográfica definiendo regiones geotermales.

-INGEMMET y AQUATER de Italia, 1980: Estudio identificando las áreas de interés.

-ELECTROPERU y la Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA), 1986: investigaciones geoquímicas en la Región V, entre Tacna y Moquegua.

- **Energía Hidroeléctrica:**

El Perú cuenta con cuencas hidrográficas cuyas aguas son factibles para ser usadas en generación eléctrica, así mismo, países como Brasil se encuentran interesados en desarrollar proyectos. La energía hidroeléctrica es una fuente probada utilizada principalmente para la generación de electricidad. En el caso de generación con RER con centrales hidroeléctricas, estas deben ser menores a 20 MW.

- Potencial Hidroeléctrico Información base: ELECTROPERU información sobre cuencas a nivel nacional.
- Principales estudios realizados: La magnitud del potencial hidroenergético peruano se estableció mediante el estudio

emprendido en los primeros años de la década del 80' por el **MEM**, Electroperú y la Misión Alemana de Cooperación Técnica, el cual calculó un potencial de 58 GW.

- En base a este estudio **ELECTROPERU** realizaba planes de expansión de la generación hidroeléctrica del país; asimismo, este documento sirve como catálogo referencias de proyectos de generación hidroeléctrica.

- Potencial Hidroeléctrico del Perú según el Estudio realizado por la Misión Alemana de 1973 a 1979 58 937 MW (aprox 11 veces de lo actualmente instalado) 385 118 GWh (aprox. 14 veces de lo actualmente instalado) 328 proyectos identificados.

- **Energía hidráulica de pequeña escala:** Sólo se considera renovable a las mini centrales por tener prácticamente un nulo impacto medioambiental.
 - Menor a 20 MW de potencia.
 - Similares costos de anteproyecto a los de centrales más grandes.
 - Altos costos de interconexión y transformación.
 - Barreras por propiedad de predios: falta de títulos y dificultad para imponer servidumbres.

2.3.4 Potencial energético de energías renovables

El Perú dispone de reservas energéticas renovables y no renovables, de estas últimas se destaca el gas natural y sus líquidos, aunque también se dispone de petróleo y carbón mineral.

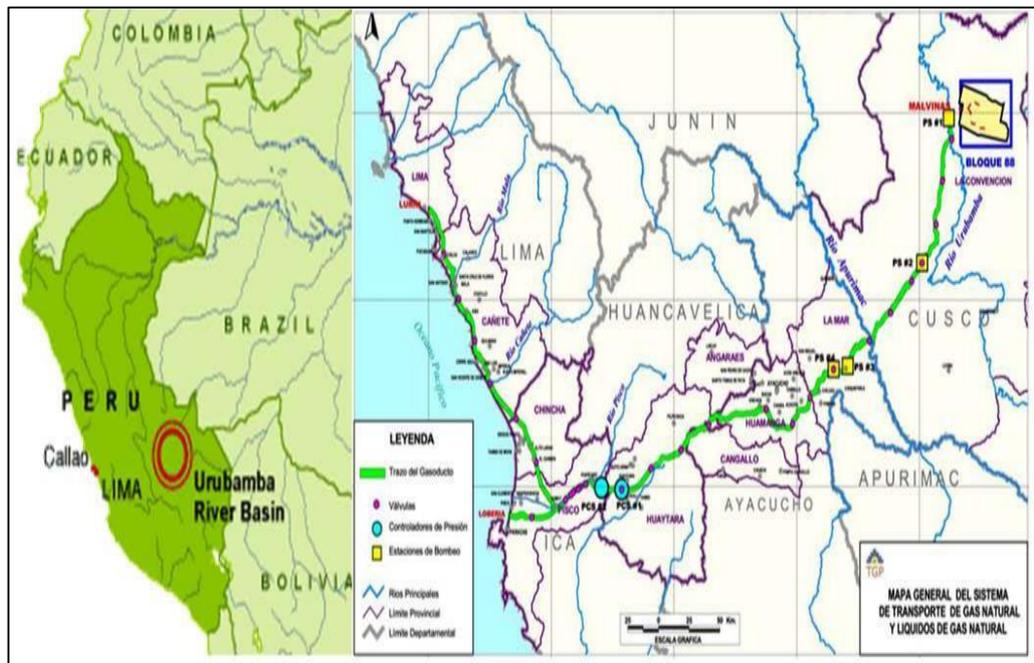
El ingreso del gas natural procedente de Camisea a la matriz energética se dio a partir de agosto de 2004, esta fuente de energía es utilizada actualmente en la generación de energía eléctrica y

como combustible en los sectores transporte, industrial y residencial (MEM, 2009a).

Camisea es el mayor yacimiento de gas natural en explotación en el Perú, está ubicado en la zona del bajo Urubamba, Distrito de Echarate, Provincia de La Convención, en la Región Cusco ((véase la figura N° 2.4, en la página “55”).

Imagen N° 2.4

UBICACIÓN DEL YACIMIENTO DE CAMISEA Y SISTEMA DE TRANSPORTE DEL GAS NATURAL Y LÍQUIDOS



Fuente: PLUSPETROL, 2011

Las reservas probadas “in situ” son de 8,7 TCF (trillones de pies cúbicos), y las probadas más probables se estiman en 11 TCF. La recuperación final estimada es de 8,24 TCF de gas natural y 482 millones de barriles de líquidos asociados (propano, butano y gasolina natural). PLUSPETROL, 2011.

En lo que respecta al potencial energético renovable y según la información difundida por le MEM, en el país existe un importante potencial hidroeléctrico estimado en 70 000 MW del cual solo se está aprovechando cerca del 5%; (MEM, 2011a).

Por otro lado, el potencial de energía eólica se estima en 20 000 MW. En cuanto a energía solar, según el Atlas de Energía Solar del Perú, existen niveles entre 6.0 a 6.5 kWh/m² de radiación solar anual en la Costa, de 5.5 a 6.0 kWh/m² en la Sierra y en la Selva de 4.5 a 5.0 kWh/m² (MEM, 2011d).

Sin embargo, el aprovechamiento de energía solar y eólica se inicia recientemente con la instalación de cuatro proyectos de energía solar con una capacidad total de 80 MW y tres bosques eólicos con una capacidad total de 140 MW.

Respecto a la biomasa, se estima una oferta total de recursos biomásicos disponibles en el país para la producción de energía de 272 millones de toneladas métricas anuales, de los cuales 256 millones de toneladas métricas corresponden a la productividad media de los bosques (naturales y plantaciones), y 16 millones de toneladas métricas de biomasa provienen de otras fuentes, como los residuos en el campo de los cultivos de maíz, arroz, caña de azúcar, algodón, espárragos y olivo (FAO, 2010).

En cuanto a geotermia, el Perú posee un gran potencial geotérmico el cual aún no es completamente conocido por la ausencia de estudios de reconocimiento y exploración donde se integre adecuadamente información geológica-estructural, geoquímica y geofísica. Recientemente el INGEMMET actualizó el Mapa Geotérmico del país, el cual ha consistido, principalmente, en la redefinición de los límites de las regiones geotermales, así como en la ubicación de las más de 400 manifestaciones termales distribuidas en el territorio nacional. A partir de

esta actualización se identificó seis principales regiones geotérmicas las cuales son:

- (i) Cajamarca - Libertad;
- (ii) Callejón de Huaylas;
- (iii) Churín;
- (iv) Central;
- (v) Eje Volcánico Sur;
- (vi) Cusco - Puno. (INGEMMET, 2015).

Por otro lado, el MEM ha otorgado autorizaciones para realizar estudios básicos en trece campos ubicados en los departamentos de Arequipa, Ancash, Ayacucho, Moquegua, Puno y Tacna, que de tener resultados favorables se ejecutarán perforaciones profundas para realizar los estudios de factibilidad correspondientes.

- **Potencial Hídrico:**

Según un estudio reciente, el potencial hídrico aprovechable por centrales hidroeléctricas es aproximadamente de 70 000 MW. El 86% proviene de los recursos de la Cuenca del Atlántico, 14% de la Cuenca del Pacífico y 0,3% de la Cuenca del Río Titicaca.

- **Potencial Solar:**

No se ha estimado el potencial en términos de capacidad de proyectos solares para generación eléctrica. El Atlas Solar solo contiene registros de rangos promedio de radiación solar para cada mes del año.

- **Potencial Eólico**

El mayor potencial eólico se encuentra en la costa del Perú, debido a la fuerte influencia del anticiclón del Pacífico y de la Cordillera de los Andes, que generan vientos provenientes del suroeste en toda la región de la costa. El Atlas Eólico estima un potencial sobre los 77 000 MW, de los cuales se pueden aprovechar más de 22 000 MW.

- **Potencial Geotérmico**

Existe posibilidad de instalar campos geotermales en regiones:

Región I: Cajamarca, La Libertad

Región II: Callejón de Huaylas

Región III: Churín

Región IV: Zona Central

Región V : Cadena Volcánica Sur

Región VI : Puno, Cusco

El mayor potencial se encuentra en la Zona Sur del país, sobre todo en los departamentos de Puno y Cusco.

Potencial Biomasa

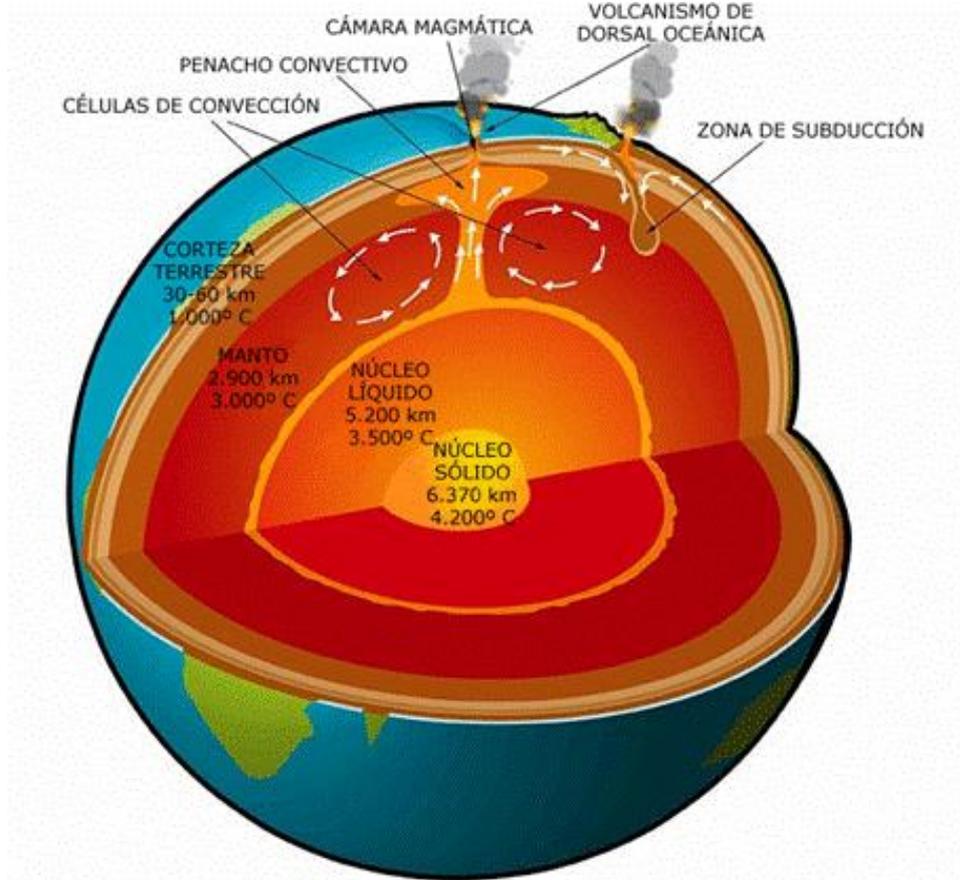
Se estima que se puede obtener hasta 177 MW en centrales convencionales de biomasa y 51 MW con el uso de biogás, utilizando como dato los registros de producción al año 2009, de residuos agroindustriales en plantas de procesamiento de la caña de azúcar, cáscara de arroz, algodón, trigo, espárrago y los residuos forestales provenientes de los aserraderos.

2.3.5 Geotérmica y manifestaciones

La energía geotérmica se define como el aprovechamiento de la energía térmica que es generada del calor acumulado en el interior de la Tierra, este calor principalmente es utilizado para la generación de energía eléctrica.

Entre otras aplicaciones de este recurso geotérmico entre las cuales se encuentran: usos industriales como el secado de madera, usos recreativos como balnearios, usos domésticos como la calefacción entre otros.

Imagen N° 2.5 ESTRUCTURA INTERNA DE LA TIERRA



Fuente: Site Geothermie-Perspectives de l'ADEME et du BRGM

Desde el centro hasta la superficie, el globo terrestre está constituido por tres capas sucesivas de temperatura decreciente:

- El núcleo, sólido en su parte interna y líquido en su parte exterior. Su temperatura puede alcanzar los 4.200 °C.
- El manto que lo envuelve, con temperaturas que van desde los 3.000 °C a 1.000 °C. De textura plástica hacia el centro, se vuelve sólido hacia la superficie.
- La corteza, que corresponde a la envoltura superficial. Su temperatura varía desde los 1.000 °C en su contacto con el manto, hasta los 15-20

°C de la superficie terrestre. Su espesor varía desde 5 a 20 km en las profundidades oceánicas, y desde 30 a 70 km bajo los continentes. Con la parte sólida del manto constituye la litosfera, fragmentada en varias placas litosféricas que se desplazan lentamente, unas con relación a otras, pudiendo dar lugar a importantes anomalías térmicas en sus bordes.

El resultado de esta estructura interna es que el 99% de la masa de la Tierra está sometida a una temperatura superior a los 1.000 °C, y únicamente un 0,1% de la misma soporta temperaturas inferiores a los 100 °C.

Los orígenes del calor interno de la Tierra se encuentran en los siguientes hechos:

- Desintegración de isótopos radiactivos presentes en la corteza y en el manto, principalmente, uranio 235, uranio 238, torio 232 y potasio 40.
- Calor inicial que se liberó durante la formación del planeta hace 4.500 millones de años, y que todavía está llegando a la superficie.
- Movimientos diferenciales entre las diferentes capas que constituyen la Tierra, principalmente entre manto y núcleo.
- Cristalización del núcleo. El núcleo externo (líquido) está cristalizando continuamente, y en la zona de transición con el núcleo interno (sólido) se libera calor.

Las grandes diferencias de temperatura entre la superficie de la Tierra y las existentes en su interior originan un flujo continuo de calor hacia la superficie, estimándose que la energía que llega cada segundo a la superficie terrestre, en forma de calor, por conducción, convección y radiación, es de 42×10^{12} J. De ese total, 8×10^{12} J provienen de la corteza, la cual representa sólo el 2% del volumen total del planeta, $32,3 \times 10^{12}$ J provienen del manto, el cual representa el 82% del volumen

total, y $1,7 \times 10^{12}$ J provienen del núcleo, que representa un 16% en volumen y no contiene isótopos radiactivos.

- Manifestaciones geotérmicas

Determinadas zonas de la litosfera están sometidas a tensiones que generan gran cantidad de calor y presión, produciéndose fracturas y fallas por las cuales pueden ascender desde el manto, magmas, masas de rocas incandescentes, en estado de fusión total o parcial, con pequeñas cantidades de materias volátiles como agua, anhídrido carbónico, ácidos sulfúrico y clorhídrico, etc.

Si las condiciones tectónicas son favorables, los magmas, por su movilidad, pueden ejercer un empuje hacia arriba y romper la costra superficial de la Tierra, formando volcanes por los que se desparraman lavas, cenizas y gases.

Se estima que, para una determinada cantidad de magma arrojado por un volcán, un volumen diez veces mayor permanece debajo de la superficie, formando cámaras magmáticas que calientan las rocas circundantes.

Si esas rocas son permeables o están fracturadas, y existe circulación de agua subterránea, esta última capta el calor de las rocas, pudiendo ascender hasta la superficie a través de grietas o fallas, dando lugar a la formación de aguas termales, géiseres, fumarolas y volcanes de fango.

Estos fenómenos tienen características singulares que los diferencian de los afloramientos de aguas comunes. Por estar siempre asociados a las fases póstumas de los procesos magmáticos, además de la alta temperatura que presentan, están acompañados de gases,

principalmente carbónicos o sulfurosos, produciendo estos últimos un olor fétido sumamente desagradable.

Juntamente con los volcanes, constituyen las manifestaciones superficiales visibles del calor de la Tierra, y son los que tradicionalmente han atraído la investigación y el estudio de los recursos de energía geotérmica.

Imagen N° 2.6

FUMAROLAS



Fuente: 2001 Geothermal Education Office

•Volcán: Abertura en la corteza terrestre por la cual sale lava, vapor y/o cenizas con fuerza, o se derraman continuamente o a intervalos.

•Aguas termales: Manantial natural del que brota agua más caliente que la temperatura del cuerpo humano. Puede congregarse en lagunas o fluir por arroyos.

Imagen N° 2.7
AGUAS TERMALES



Fuente: 2001 Geothermal Education Office

- Volcanes de fango (mud pots): Erupciones de gases y barro que aparecen donde no hay bastante agua para sostener un géiser o una fuente termal. El vapor y los gases burbujan a través del barro formado por la interacción de los gases con rocas sedimentarias. En Italia se llaman salsas.

Son más frecuentes en yacimientos petrolíferos relativamente poco profundos, donde los gases emanados elevan arcillas sumamente hidratadas, llegando a formar charcas o lagunas.

Imagen N° 2.8
VOLCAN DE FANGO



Fuente: 2001 Geothermal Education Office

•Géiser: Surtidor intermitente de agua líquida mezclada con vapor de agua, a una temperatura entre 70 y 100 °C, con gran cantidad de sales disueltas y en suspensión.

Los minerales disueltos en el agua quedan depositados alrededor del géiser a modo de escoria o de sílice amorfa (geiserita). Muchos géiseres en el mundo se han extinguido o vuelto inactivo por causas naturales o por la instalación en sus inmediaciones de plantas de energía geotérmicas, como, por ejemplo, en Wairakei (Nueva Zelanda) y en Nevada (EE.UU.).

La mayor concentración de géiseres se encuentra en el Parque Nacional de Yellowstone (Wyoming, EE.UU.).

Imagen N° 2.9
GÉISER FLY RANCH SITUADO CERCA DE GERLACH EN NEVADA
(EE.UU.)



Fuente: Hill, R. Sandia National Laboratories

Fumarolas: Nombre genérico dado a la emisión de gases y vapores de agua a temperaturas muy elevadas, en ocasiones pueden alcanzar 500 °C. Se las denomina, en función de su composición química, carbónicas, sulfurosas, clorhídricas, etc.

Las solfataras, además de vapor de agua a 90 – 300 °C, contienen sulfuro de hidrógeno que, en contacto con el aire, se oxida y deposita azufre alrededor de la abertura. Las mofetas son fumarolas más frías, 90 °C, que desprenden grandes cantidades de anhídrido carbónico.

- Historia

Desde tiempos pasados la geotermia ya era usada por el hombre, un ejemplo de esto, fueron los romanos y los griegos que utilizaron esta energía como calefacción.

Imagen N° 2.10

ACANTILADO DE MÁS DE 200 M DE ALTURA CON MANANTIALES DE AGUAS TERMALES EN PAMUKKALE

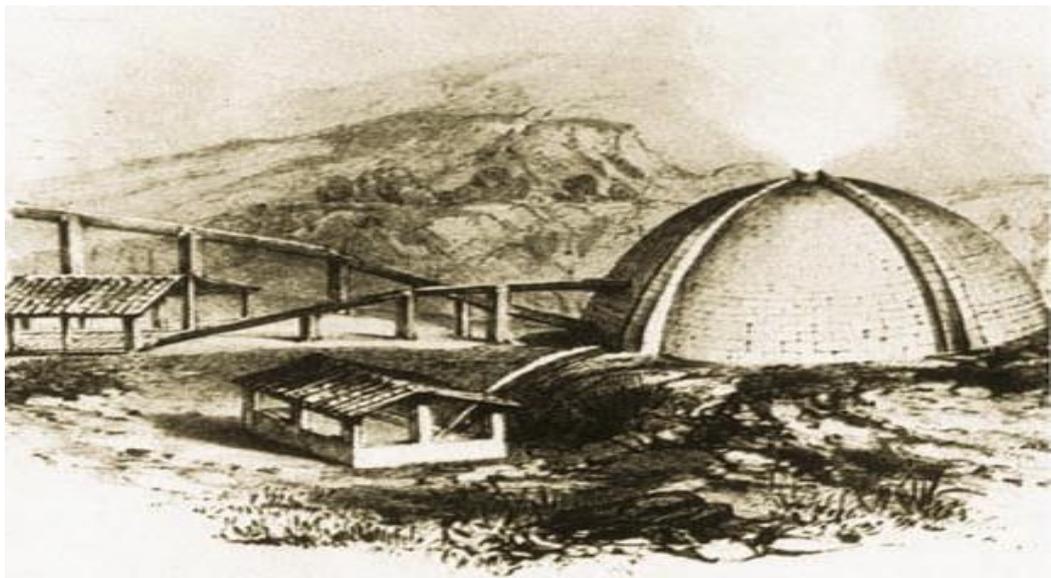


Fuente: Turquía.

La primera vez que se tiene registro de que la geotermia se utilizó para fines comerciales fue en 1777 cuando F.U. Hoefler, director de la farmacia del Ducado de Toscana (Italia), descubrió la presencia de ácido bórico en los condensados del vapor geotérmico que se desprendían de forma natural en una zona de la región toscana, cerca de Monterotondo. medicina como El ácido bórico es una sustancia que tiene muchas aplicaciones, además de usarse el antiséptico, se emplea en la industria del vidrio y en la fabricación de pinturas y de cerámica por mencionar algunas de las aplicaciones.

En 1818, Francesco Larder el comenzó la actividad extractiva del ácido bórico con una pequeña fábrica que evaporaba el agua termal bórica (véase la figura N° 2.11) quemando leña, con el fin de recuperar el concentrado bórico. Larder el decidió hacer uso del vapor de agua que brotaba de la tierra, cubriendo el brote de vapor con mampostería y conduciéndolo hasta su planta en donde lo utilizaba para sustituir la costosa leña y así poder extraer el boro.

Imagen N° 2.11
PLANTA DE EXTRACCIÓN DE BORO



Fuente: QUIJANO, 2007.

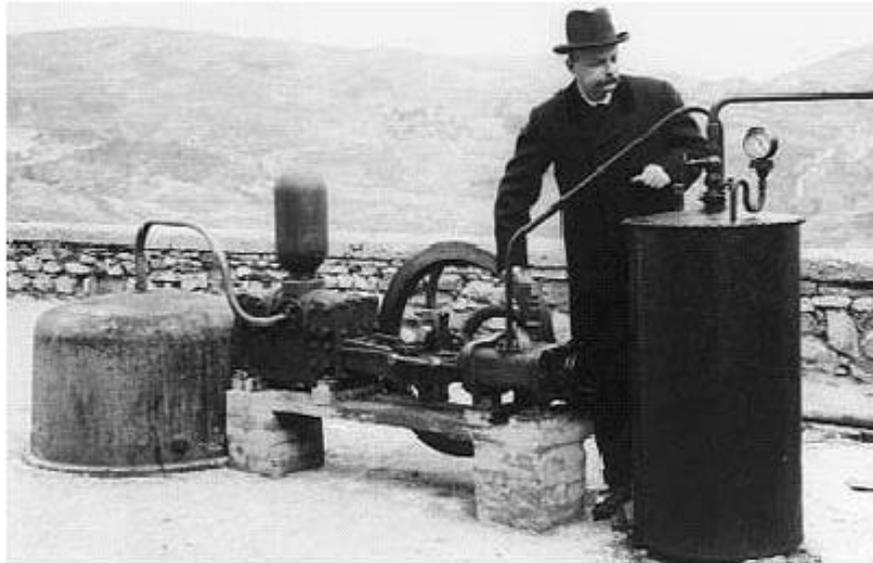
Posteriormente inició la perforación de rudimentarios pozos a poca profundidad para poder extraer el boro, en un principio la producción de boro era de 50 toneladas anuales, diez años después llegó a 800 toneladas incrementando su producción y el número de plantas.

En 1894 se dio la primera aplicación de la geotermia como uso para la generación de potencia, el doctor Ferdinando Reynaut utilizó un cambiador de calor para lograr aprovechar el vapor de los pozos y evaporar agua limpia que haría funcionar una máquina de émbolo de 9 caballos de fuerza.

Aunque la instalación no persistió por más tiempo debido a la corrosión que sufrió el cambiador de calor.

La primera aplicación geotermoeléctrica de la historia fue en 1904 cuando el príncipe Piero Ginori Conti utilizó directamente el vapor geotérmico para alimentar una máquina de $\frac{3}{4}$ de caballo que accionaba un generador de corriente directa, la electricidad producida se usó en la iluminación de la planta de Larderello que se pondría en construcción ese mismo año y entraría en funcionamiento en 1913 con un turbogenerador de 250 kW. (Véase la Imagen N°2.12 en la pág. 63).

Imagen N° 2.12
TURBOGENERADOR DE 250 KW



Fuente: 1904, en Landerello, primer intento para producir electricidad a partir del calor geotérmico.

2.3.6 Aplicaciones y Tipos de Energía Geotérmica

Las aplicaciones que se pueden dar a un fluido geotermal dependen de su contenido en calor, o lo que es lo mismo, de su entalpía.

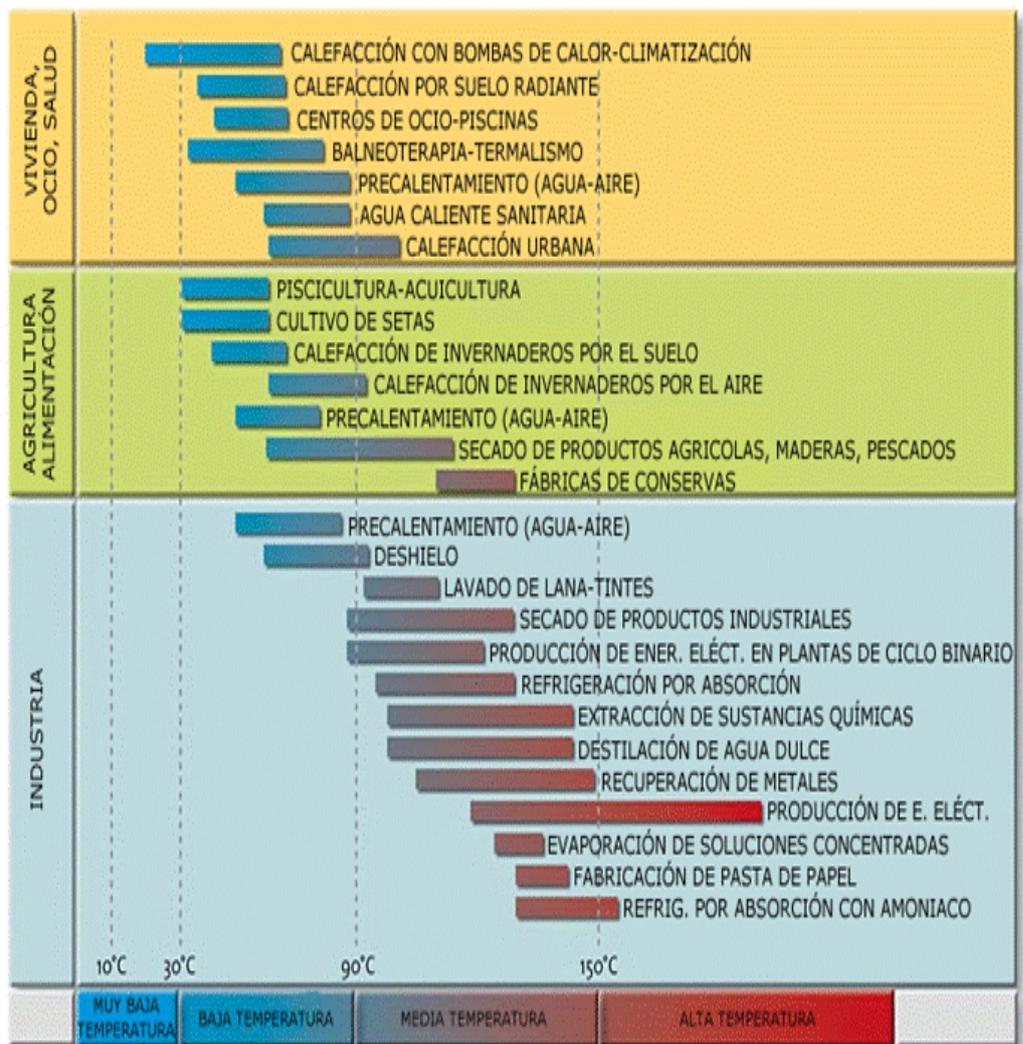
Entalpía es la cantidad de energía térmica que un fluido, o un objeto, puede intercambiar con su entorno. Se expresa en kJ/kg o en kcal/kg.

Como no existen aparatos que determinen directamente la entalpía de un fluido en el subsuelo, pero sí existen sondas térmicas que miden la temperatura, y como la entalpía y la temperatura pueden considerarse, más o menos, proporcionales, la práctica habitual ha generalizado el empleo de las temperaturas de los fluidos geotermales en lugar de sus contenidos en calor, pues, al fin y al

cabo, son las temperaturas las que determinan su futura aplicación industrial.

En la Tabla 2.2 se muestran las aplicaciones más importantes de la energía geotérmica con los rangos de temperatura de utilización, y en su parte inferior se establece una agrupación de la energía geotérmica, entre diferentes intervalos de temperatura, en cuatro grandes tipos: muy baja, baja, media y alta temperatura.

Tabla N° 2.2
PRINCIPALES USOS DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA



Fuente: Site Geothermie-Perspectives de l'ADEME et du BRGM

Diferentes autores establecen límites de temperatura distintos para estos intervalos. La división que aparece en la tabla N° 2.2, es la que establece el “Código Minero” en Francia, y se puede aplicar tanto a la energía geotérmica, como a las explotaciones, los yacimientos y los recursos geotérmicos.

Tabla N° 2.2
CLASIFICACIÓN Y USO DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

Energía Geotérmica	Temperatura [°C]	USO
E.G. Alta Temperatura	T > 150 [°C]	Producción energía eléctrica.
E.G. Media Temperatura	90 - 150 [°C]	Mediante el uso de plantas de ciclo
E.G. Baja Temperatura	25 - 90 [°C]	Viviendas, procesos industriales,
E.G. Muy baja	T < 25 [°C]	Agua caliente sanitaria y aire
Temperatura		bombas de calor

Fuente: <http://www.girotgeotermia.com>

2.3.7 Tipos de técnicas geotérmicas

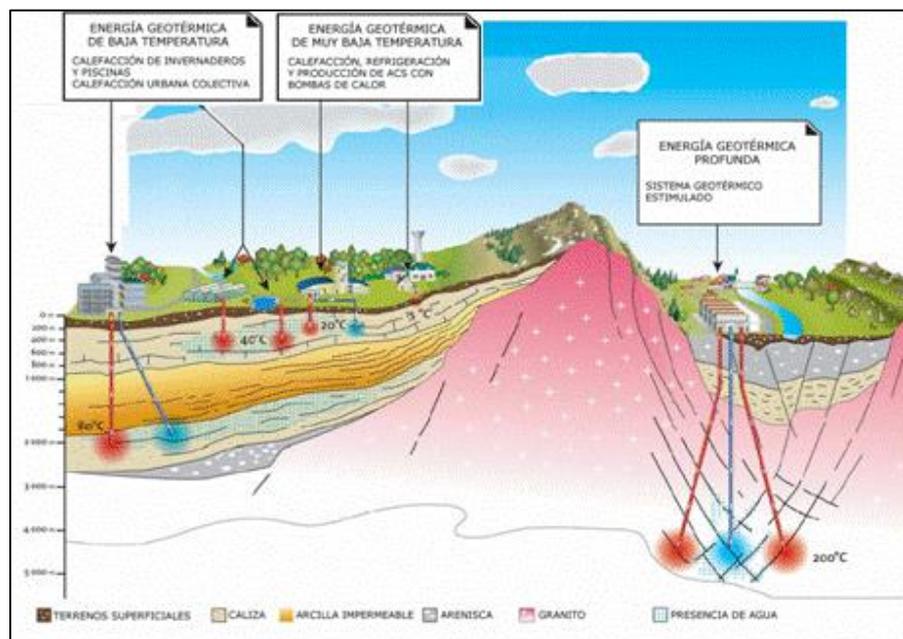
Un sistema técnico geotérmico puede ser descrito esquemáticamente como “agua convectiva en la corteza superior de la Tierra la cual, en un espacio confinado, transfiere calor desde una fuente de calor hasta una abertura de calor, usualmente la superficie libre³

Los sistemas técnicos geotérmicos se pueden encontrar en:

- a) Regiones con un gradiente geotérmico normal o ligeramente superior que se caracterizan por bajas temperaturas, normalmente inferiores a 100°C, a profundidades de (2-3 km)
- b) Regiones que rodean los bordes de las placas, donde el gradiente geotérmico puede ser significativamente más alto que el valor promedio, de forma que las temperaturas cubren un amplio rango desde las más bajas hasta los 400°C

Imagen N° 2.13

DIFERENTES TIPOS DE ENERGÍA GEOTÉRMICA



Fuente: Site Geothermie-Perspectives de l'ADEME et du BRGM

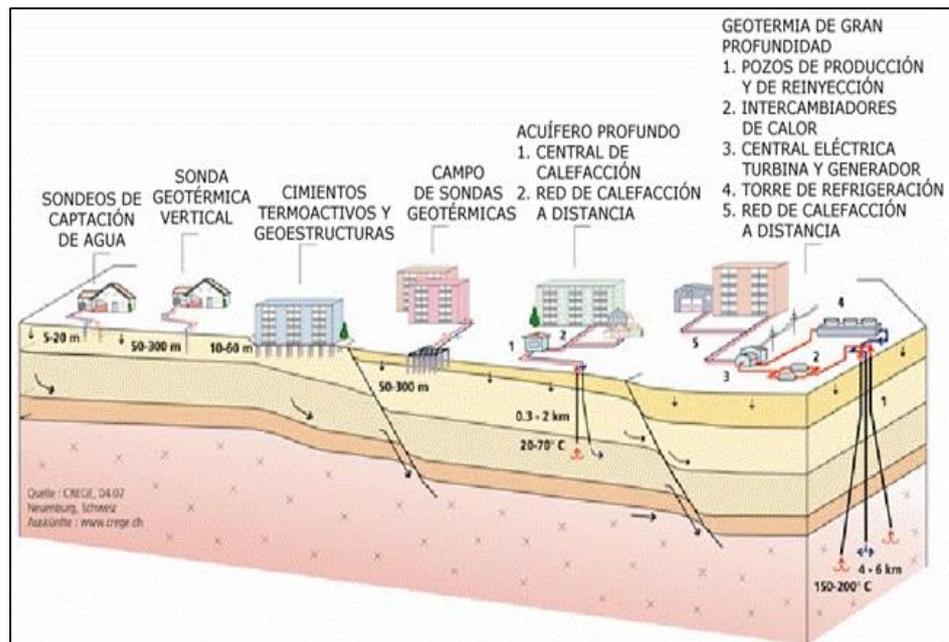
³ HOCHSTEIN, Manfred. **Clasificación y evaluación de los recursos geotérmicos**. Nueva York, Edición.1990.

Para que un recurso geotérmico pueda ser explotado económicamente se necesita verificar su existencia y localización en suelos, rocas o acuíferos, y posteriormente determinar sus características al objeto de estimar su potencial energético. La amplitud y complejidad de los estudios previos que hay que llevar a cabo serán de mayor o de menor envergadura dependiendo del tipo de recurso que se tenga intención de explotar.

En la Figura N°2.14, se representan, a la izquierda, cuatro posibilidades de aprovechamiento de recursos de muy baja temperatura, y a la derecha, los de un recurso de baja y de alta temperatura (un sistema geotérmico estimulado).

Imagen N° 2.14

APROVECHAMIENTO DEL CALOR DE LA TIERRA



Fuente: Cattin, S. Crege. Géothermie. CH

Recursos de muy baja temperatura

Los recursos de muy baja temperatura reúnen dos características que los diferencian del resto, y que hacen que su investigación se aparte de los cánones clásicos de investigación geológico-minera de recursos minerales. La primera es que se trata de un recurso energético que está debajo de cualquier terreno de cualquier lugar habitado del planeta, próximo a la superficie. La segunda, que su posibilidad de aprovechamiento está supeditada al uso forzoso de bombas de calor geotérmicas.

Gracias a esas dos circunstancias, son los recursos que mejor se adaptan a las necesidades de climatización de viviendas unifamiliares y de edificios de pequeñas o grandes dimensiones.

Más que investigar la forma de localizar el recurso que, al fin y al cabo, ya se sabe que está bajo el terreno, a poca profundidad, y en espera de ser extraído, lo que se investiga es cuál es la mejor forma de explotarlo para que, sin llegar a agotarlo, pueda satisfacer la demanda energética que se necesita para mantener el confort térmico en el interior de los edificios a los que va a dar servicio.

La expresión “a poca profundidad” es un término ambiguo, particularmente para personas ajenas al aprovechamiento de este tipo de recursos, pero la diferenciación entre energía geotérmica somera y energía geotérmica profunda se suele establecer, arbitrariamente, en una profundidad de 400 m por debajo de la superficie. Los recursos geotérmicos de muy baja temperatura se enmarcan en el primero de los dos dominios.

Los estudios previos necesarios para poder aprovechar el recurso podrán ser muy simples o muy complejos, dependiendo de la

potencia que se tenga que suministrar, del tipo de instalación que tenga que extraerlo, de las horas de funcionamiento anual y de la modalidad de la demanda (calefacción y/o refrigeración, y producción de agua caliente sanitaria).

Estas instalaciones cabe agruparlas en:

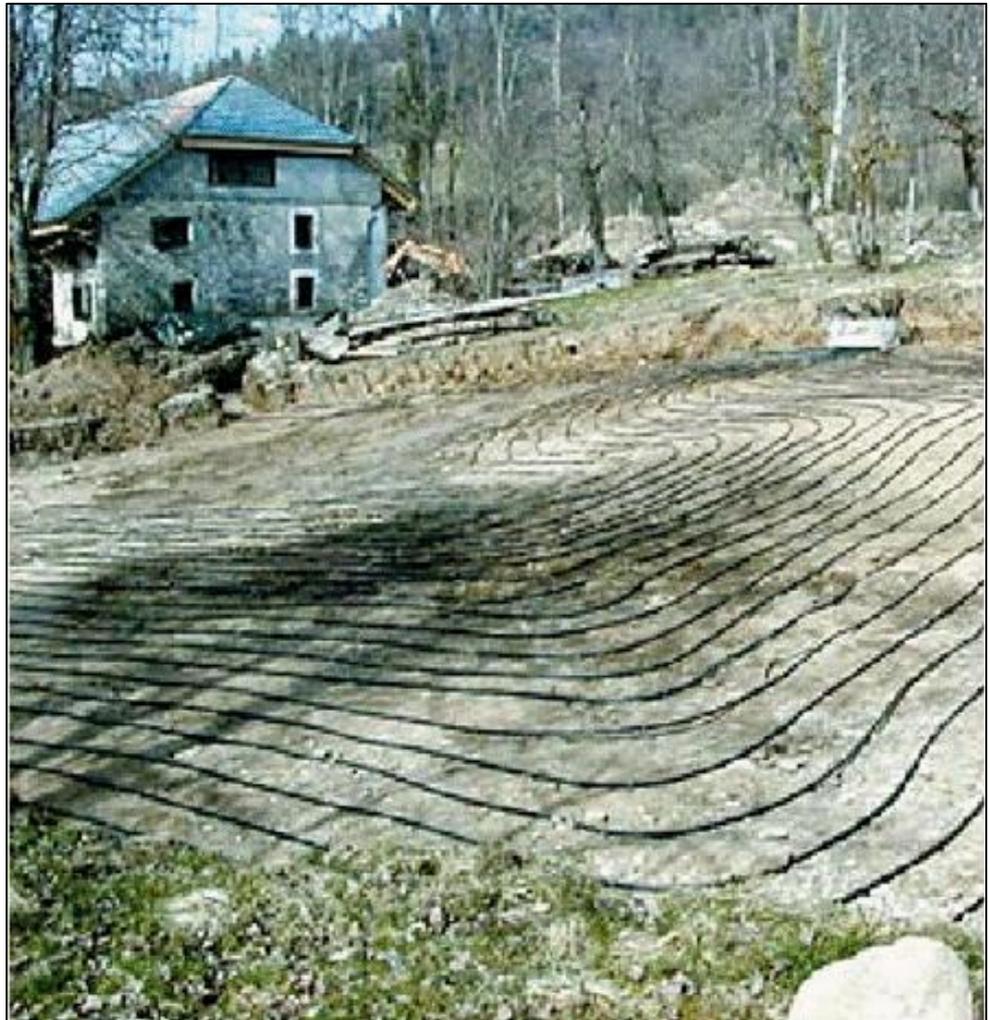
- Colectores horizontales enterrados.
- Sondas geotérmicas.
- Sondeos de captación de agua someros.
- Cimientos geotérmicos.

Colectores horizontales enterrados

Con tan sólo una capa superficial de suelo de 0,8 m de espesor es posible enterrar unos colectores horizontales, tubos de polietileno de 25 a 40 mm de diámetro, por los que circula agua con un anticongelante que, conectados a una bomba de calor geotérmica, pueden satisfacer las necesidades de calefacción de una vivienda familiar de tipo medio, alrededor de 150 m².

Sólo se necesita que la parcela de terreno disponga de un espacio despejado que sea 1,5 veces la superficie habitable a calentar, en el caso de vivienda nueva, y hasta 3 veces para casas antiguas con malos aislamientos térmicos (véase en la figura N°2.15 en la página “89”)

Imagen N° 2.15
RED DE CAPTADORES HORIZONTALES DE POLIETILENO
ANTES DE SER ENTERRADA



Fuente: Site Geothermie-Perspectives de l'ADEME et du BRGM

Debido a la escasa profundidad a la que están enterrados los tubos, el clima tiene una influencia extraordinaria en esta modalidad de explotación. El terreno sirve, por así decirlo, de acumulador de energía solar. La energía geotérmica propiamente dicha no reviste más que un papel secundario.

Dependiendo de la altitud topográfica del terreno, las capas de tubos que forman los serpentines o bucles geotérmicos permiten

obtener de 20 a 30 W de energía térmica por m² ocupado por el bucle.

En estos casos, unos breves reconocimientos geológicos y geotécnicos del terreno, y seguir las recomendaciones del fabricante de la bomba de calor suele ser suficiente.

Los sistemas geotérmicos también se encuentran en la naturaleza en una variedad de combinaciones de características geológicas, físicas y químicas, dando así origen a diferentes tipos de sistemas. Según la Sociedad Suiza de Geotermia son:

✚ Acuíferos profundos

Donde el agua subterránea está presente a una profundidad de 1 a 3 km, puede ser interesante para explotar el calor directamente. Cuando la temperatura alcanza o supera los 100 ° C, ¡la generación de energía es posible!

Fue en la década de 1970 los estados comenzaron en Europa, la captura y el uso de los acuíferos profundos para la operación directa del calor en las redes de calefacción urbana. Fue en Francia que el desarrollo de este tipo de energía geotérmica ha sido más marcado. En los otros países de nuestro entorno Suiza, también hay muchas instalaciones en Alemania, y algunos en Austria e Italia.

En las zonas donde el gradiente geotérmico es normal, alrededor de 30 ° C / km, como en la meseta suiza, la temperatura de los acuíferos profundos entre 1 y 2 km de profundidad, respectivamente alcanzó 40 a 70 ° C.

Si las aguas subterráneas profundas son débilmente mineralizadas (menos de 2 g / l) y es posible eliminar el agua se enfría después de la extracción térmica en una toma de corriente - arroyo o lago - sólo una perforación Producción será entonces suficiente (perforación individual).

Contra por, si el contenido mineral es superior a 2 g / l, una segunda perforación es necesario inyectar agua fría en las profundidades (doblete).

De 1987 a 1998, 12 pozos profundos fueron hechas en Suiza, las transacciones asistidas coberturas otorgado por la Confederación.

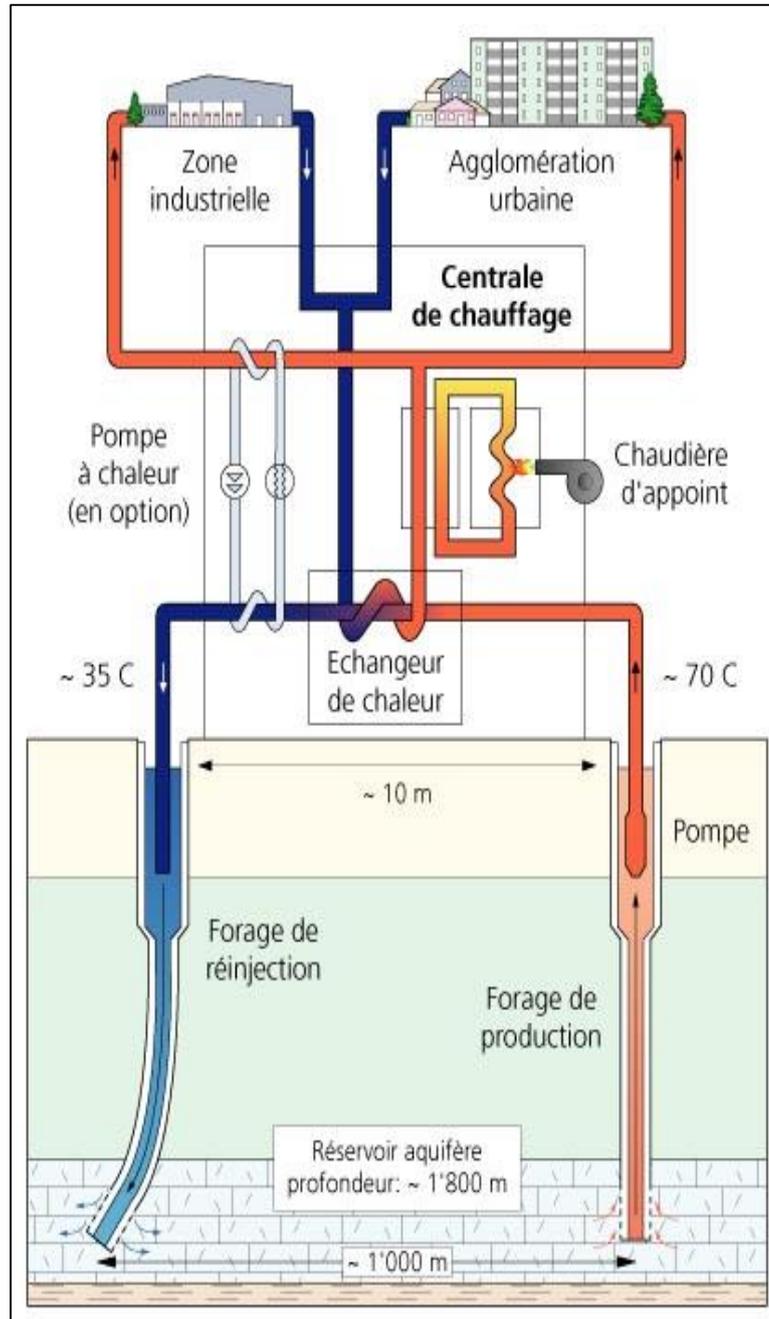
Cinco éxitos se registraron en total, así como un éxito parcial y seis fallos en el sentido de la garantía concedida, a saber, la perforación "seco" o salida baja. No concluyentes seis pozos, uno sin embargo podrían ser utilizados con fines geotérmicos: perforación Weissbad (Appenzell) utilizando una sonda de tierra "profundo".

Perforación profunda objetivo principal el uso de energía sabia éxito. En el caso del suministro de agua para los balnearios, se debe, por ejemplo, a proceder de acuerdo con el principio de uso en cascada.

Después del uso del agua para el baño real (con la temperatura decreciente), es posible calentar las instalaciones del spa a sí mismos, y en una fase final, invernaderos, como los baños termales de Schinznach Bad Aargau.

Imagen N° 2.16

**DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UN SISTEMA GEOTÉRMICO
EN FORMA DE UN DOBLETE ACUÍFERO PROFUNDO**



Fuente: Sociedad suiza de geotermia. Tipología de sistemas geotérmicos

El modo de funcionamiento de un doblete geotérmico en un taladro de producción conduce agua termal caliente a la superficie usando una bomba sumergible; un intercambiador de calor y una bomba de calor dispuesto corriente abajo posible obtener la temperatura de calentamiento deseada. Circuito de calefacción suministra al consumidor con un tubo de calefacción urbana. El agua enfriada se devuelve al acuífero a través de una perforación de inyección.

Aguas subterráneas⁴

Los principales recursos de agua subterránea en Suiza se encuentran principalmente en el ante país alpino, es decir en la plataforma y en los valles de los Alpes, como los valles del Ródano y el Rin. Estos valles son en gran parte se reunieron por la grava permeable, en la que acumular agua meteórica desde las colinas circundantes, que son drenados a lo largo de los principales sistemas fluviales. Grava llena alcanzar espesores de unos 60 m. En parte profunda, que están saturados con agua y no es raro que la altura de las aguas subterráneas alcanza de 30 a 40 m.

La temperatura del agua subterránea varía sólo ligeramente de una temporada a otra y es entre 10 y 12 ° C en la meseta y entre 8 y 10 ° C en los valles alpinos. Esta fuente de calor constante es especialmente adecuada para la calefacción de edificios, junto con las bombas de calor. Sin embargo, debe tener cuidado de que el agua subterránea no está contaminado durante su uso y la temperatura del agua subterránea no cambia por más de 3 ° C durante las temporadas en el acuífero afectado por instalación

⁴ SOCIEDAD SUIZA DE GEOTERMIA. Tipología de sistemas geotérmicos Disponible en:<https://geoswiss.wordpress.com/energia-geotermica-profunda-en-suiza-2/tipologia-de-sistemas-geotermicos/sondas-geotermicas-verticales/> Artículo web. Consultada el 28 de marzo del 2016.

geotérmica. Las autoridades cantonales son competentes para dar todos los permisos necesarios para la realización de un sistema de bomba de calor geotérmica alimentada por aguas subterráneas.

Imagen N° 2.17
UTILIZACIÓN DEL CALOR EN AGUAS SUBTERRÁNEAS



Fuente: Sociedad Suiza de Geotérmica, tipología de sistemas geotérmicos

El agua subterránea es operada por medio de un taladro y una bomba sumergible en el conducto de la calefacción central, donde una bomba de calor (PAC) extrae energía del agua subterránea y proporciona al sistema de calefacción un fluido a una temperatura adecuada. Entonces el acuífero subterráneo enfriado es visitado por una re-inyección en pozos. Cuando grava permeable son inmediatamente debajo de la superficie del terreno, los pozos de reinyección pueden limitarse a un pozo poco profundo excavado.

Para evitar un enfriamiento continuo de los pozos de agua subterránea, toma de muestras de agua y la restitución debe ser absolutamente aguas arriba del flujo del agua subterránea, respectivamente aguas abajo.

✚ Aguas Termales

Las aguas termales se han utilizado desde la antigüedad, el nombre de agua termal no cumple con una definición específica, aunque etimológicamente, la palabra griega "termas" significa calor.

En el lenguaje común, la palabra "spa" se utiliza para el agua fría y caliente, mineral o no, que son explotados con fines terapéuticos. Aquí, el término "agua de manantial" se toma en el sentido estricto de las aguas subterráneas caliente.

Imagen N° 2.18

UTILIZACIÓN DEL CALOR EN AGUAS TERMALES



Fuente: Sociedad Suiza de Geotérmica, tipología de sistemas geotérmicos

El uso de las aguas termales se remonta a la antigüedad. De hecho, vestigios tales como pozos, baños públicos sigue siendo, o monedas fueron encontrados cerca de aguas termales en Italia, Grecia, Francia y muchos otros lugares desde el año 3000 antes de Cristo. AD tarde civilización romana hizo uso sistemático de las aguas termales y minerales para diversos usos. Muchas ciudades se fundaron en el lugar de aguas termales y aún hoy en día, los nombres de estas ciudades, demuestra su origen: Aachen (D), Aix-en-Provence (F), Bath (Reino Unido) y Baden (Suiza) por Sitios arqueológicos romanos han demostrado que las aguas cálidas no sólo se utilizan para bañarse allí, sino que también transporta a través de tuberías a los tanques y edificios con calefacción por suelo radiante. La calefacción geotérmica existía por lo que hay más de 2000 años. Es en Heat-aguda, pueblo al sur del Macizo Central francés, que se instaló en 1332 la primera red de calefacción urbana en el mundo. Es a través de tubos de madera que se distribuyen en los hogares de agua termal a 82 ° C.

En la actualidad, en muchos países, los balnearios utilizan su recurso geotérmico para cubrir parte de sus necesidades calefacción.

Imagen N° 2.19
CAMPO DE SONDAS GEOTÉRMICAS



Fuente: Sociedad Suiza de Geotérmica, tipología de sistemas geotérmicos

Cuanto más se hunda profundamente, al aumentar la temperatura. Por debajo de 20 m de profundidad, la temperatura aumenta en un 3 ° C por cada 100 m con bastante regularidad en la meseta suiza. Las numerosas sondas geotérmicas verticales (SGV) que operan en Suiza son en su mayoría del tipo: la perforación de 150 metros y una bomba de calor para proporcionar energía térmica necesaria para calentar una casa de familia.

Si uno es una serie de sensores o la mayor profundidad se perfora, el intercambiador de calor tendrá un mayor potencial y por lo tanto se calentará un grupo de villas o edificios más grandes, tales como pequeños edificios, edificios industriales o administrativos, hoteles, salas de usos múltiples, etc. En los últimos años, ha habido la realización de la calefacción, o calefacción - aire acondicionado para edificios industriales o administrativos.

Una serie (4-80) sondas geotérmicas verticales de profundidades variables (30-350 m) se encuentran debajo del edificio a calentar o inmediatamente adyacente. Tubos de cada sonda se unen a un colector que alimenta una o más bombas de calor. Si la refrigeración en verano, la profundidad de la perforación debe limitarse a menos de 250 m para evitar campo de temperatura excesiva.

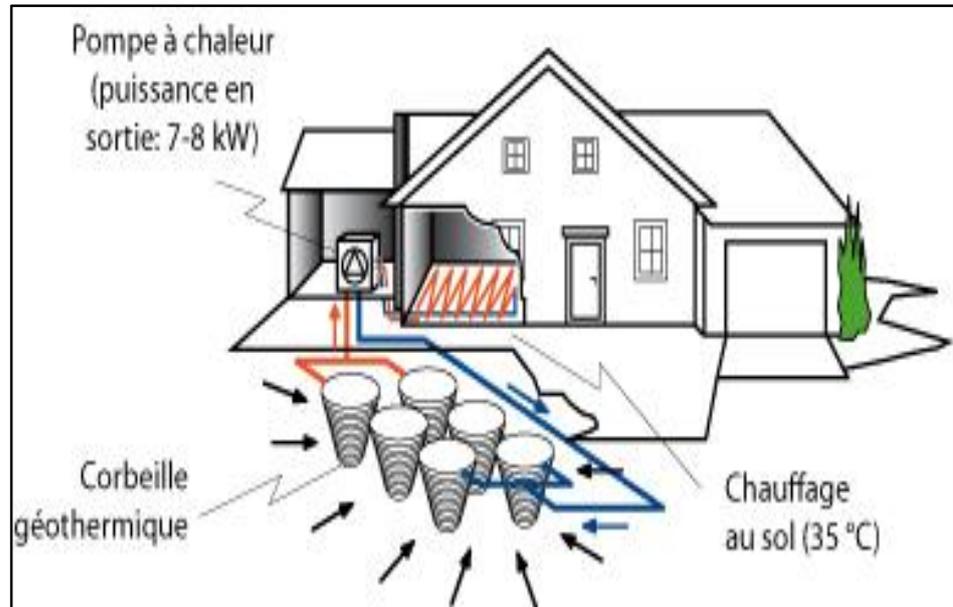
El funcionamiento de la instalación tiene lugar en un ciclo anual, con la extracción de calor desde el campo durante la temporada de calefacción (por inyección en frío) y la extracción de frío durante el aire acondicionado (reinyección de calor en el suelo). Una caldera está instalada, pero se pone en funcionamiento durante los períodos de mantenimiento y reparación.

Cestas Geotérmicas⁵

Las Cestas geotérmicas permiten el uso de calor desde el sótano a pocos metros de profundidad. La geometría y el tamaño de las cestas geotérmicas requiere la instalación de varios de ellos para calentar una casa. Por otra parte, deben estar conectados entre sí antes de la conexión a una bomba de calor. Este circuito cerrado en el que un refrigerante es el intercambiador de calor a través de la cual la energía se dibuja en el terreno de manera giratoria. El número de contenedores de energía para ser instalado depende de las características del campo y la potencia de calentamiento aplicada.

⁵ SOCIEDAD SUIZA DE GEOTERMIA. **Tipología de sistemas geotérmicos** Disponible en: <https://geoswiss.wordpress.com/energia-geotermica-profunda-en-suiza-2/tipologia-de-sistemas-geotermicos/sondas-geotermicas-verticales/> Artículo web. Consultada el 28 de marzo del 2016.

Imagen N° 2.20
CESTAS GEOTÉRMICAS



Fuente: Sociedad Suiza de Geotérmica, tipología de sistemas geotérmicos

Una instalación para un hogar familiar normal suele tener dos o tres series de tres cestas geotérmicas.

Imagen N° 2.21
SONDAS GEOTÉRMICAS VERTICALES



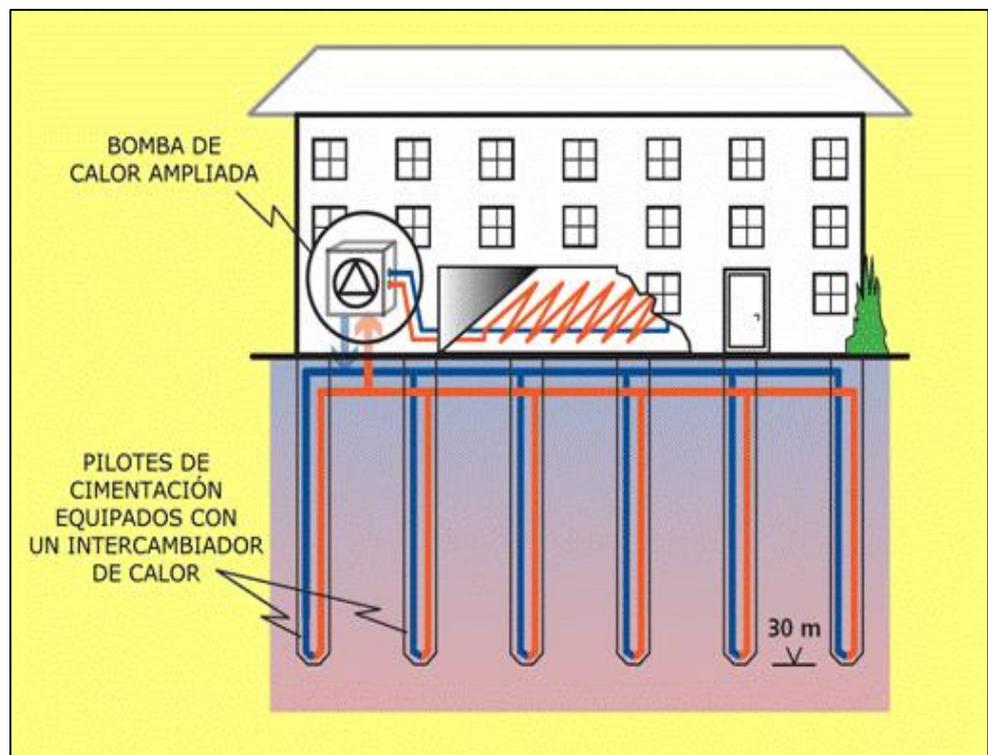
Fuente: Sociedad Suiza de Geotérmica, tipología de sistemas geotérmicos

Las cestas geotérmicas top está enterrado en 1,5 m de profundidad y como para las sondas geotérmicas verticales, energía extraídas del sótano se valora a través de una bomba de calor, lo que permite tanto la calefacción en el invierno que el refresco de verano.

Esta relativamente nueva técnica permite a Suiza para equipar ambos hogares individuales como edificios más grandes, nuevos o renovados. Debido a su poca profundidad, es una interesante alternativa a las sondas geotérmicas verticales cuando, por ejemplo, el permiso para perforar se puede emitir.

Geoestructuras o Pilotes Geotérmicos: Calor y frío bajo el edificio
Geoestructuras son estructuras en su lugar en el suelo o en contacto con él. Esto principalmente pilotes, muros, losas que sirven como base de un edificio cuando la capacidad de carga del suelo es demasiado bajo, o para garantizar la estabilidad del macizo en el que se construye. Geoestructuras son generalmente de hormigón o de hormigón armado.

Imagen N° 2.22
GEOESTRUCTURA GEOTÉRMICAS



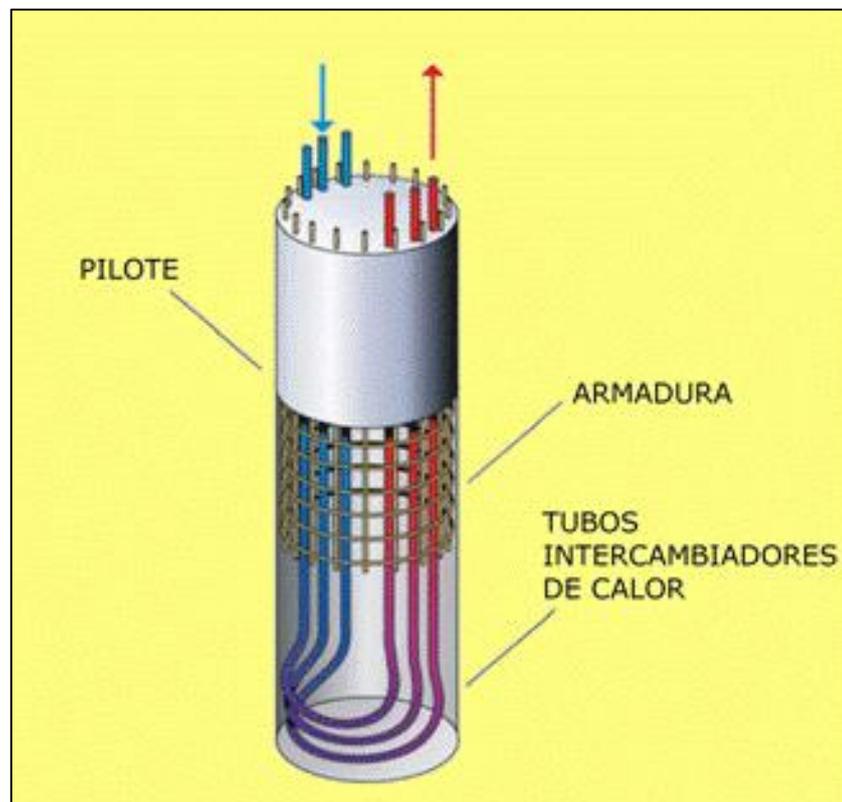
Fuente: Sociedad suiza de geotérmica, tipología de sistemas geotérmicos

La capacidad de conductividad y almacenamiento térmico a concretar un material de construcción ideal para los absorbedores de energía térmica. Por otro lado, a pocos metros por debajo de la superficie de la Tierra (15 a 20 m), la temperatura se convierte rápidamente constante (9 -11 ° C en el clima e Suiza). Este nivel

de temperatura puede ser utilizado para la refrigeración de edificios en verano y calefacción en invierno. Geostructures necesarios para apoyar fundaciones de cualquier tamaño y construcción pueden ser equipados con intercambiadores de calor. Piles y muros de hormigón en contacto con el suelo contienen tubos de plástico para el intercambio de calor o el frío suelo.

Imagen N° 2.23

TUBOS INTERCAMBIADORES DE CALOR



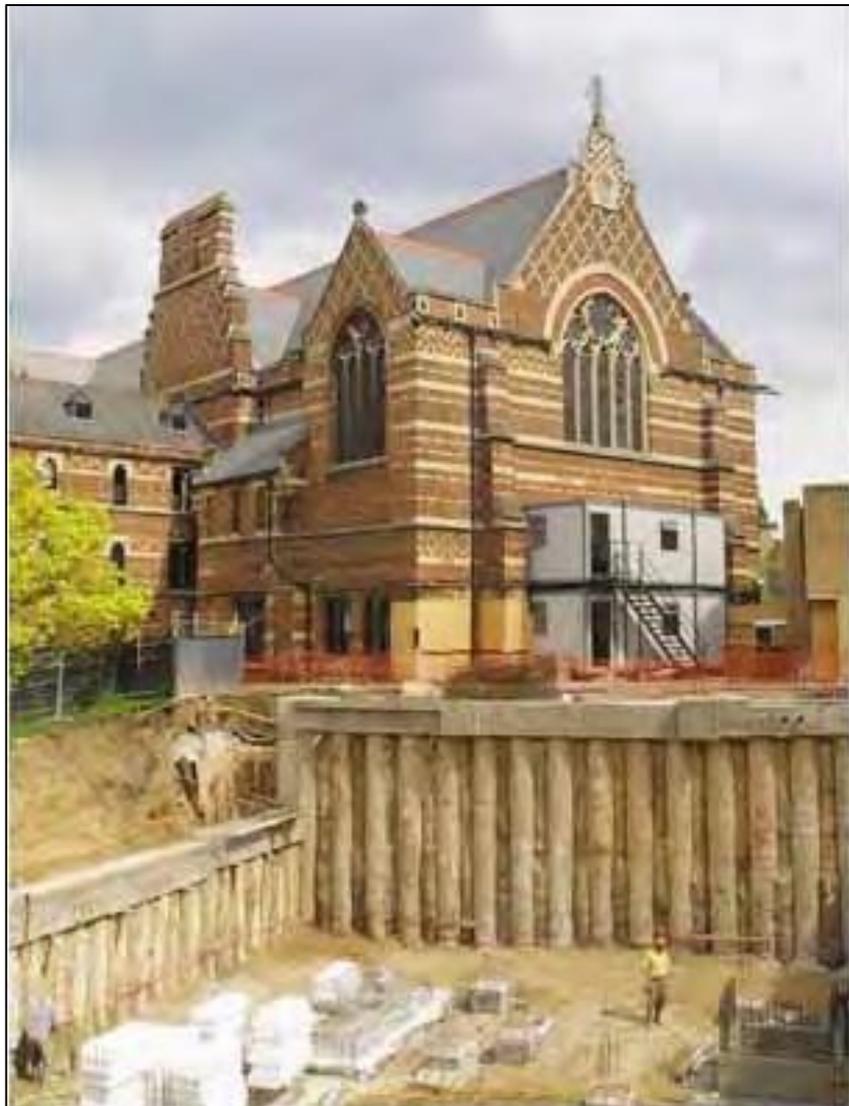
Fuente: Geothermal Energy. Clauser, C. 2006

Estos tubos se unen a un colector que alimenta una o más bombas de calor. El funcionamiento de la instalación tiene lugar en un ciclo anual, con la extracción de calor desde el campo durante la temporada de calefacción (por inyección en frío) y la extracción de frío durante el aire acondicionado (inyección de calor en el suelo).

Las capacidades instaladas varían desde unos pocos kW a aproximadamente 1.000 kW térmica. Los beneficios de estas instalaciones están reduciendo los costos de operación de los combustibles fósiles (aprox. 80%) y una reducción de las emisiones de CO₂ (45 a 100%).

Imagen N° 2.24

MUROS DE CONTENCIÓN CON 90 PILOTES GEOTÉRMICOS



Fuente: www.enercret.com

Sistema Geotérmico Estimulado

Uno de los grandes temas de la geotérmica contemporánea es producir electricidad a partir de un recurso geotérmico en profundidad - 4-6 km - en el entorno continental estable.

Imagen N° 2.25

EXTRACCIÓN DE CALOR DE ROCAS CRISTALINA



Fuente: Sociedad Suiza de Geotérmica, tipología de sistemas geotérmicos

Extraer calor de la roca cristalina

A pocos kilómetros de profundidad prevalecen temperaturas es posible explotar la superficie utilizando un circuito hidráulico creado artificialmente para producir electricidad y calor. En Europa, las rocas cristalinas encontradas (base) en el orden de las temperaturas de 200 ° C a profundidades de entre 4 y 6 km. Tecnología SGS (mejorado los sistemas geotérmicos, o en inglés, EGS Enhanced Geothermal Systems) le permite utilizar esta energía. En una primera etapa, se ejecuta en un pozo de penetrar en la roca. Luego se procede a una fractura de alta presión del sólido y después se hace circular al agua por medio de un segundo pozo. En la superficie, los intercambiadores de calor transmiten la energía captada a los equipos de producción de electricidad y calor útil. Se espera que esta tecnología para generar electricidad cinda y disponer de calor continuamente.

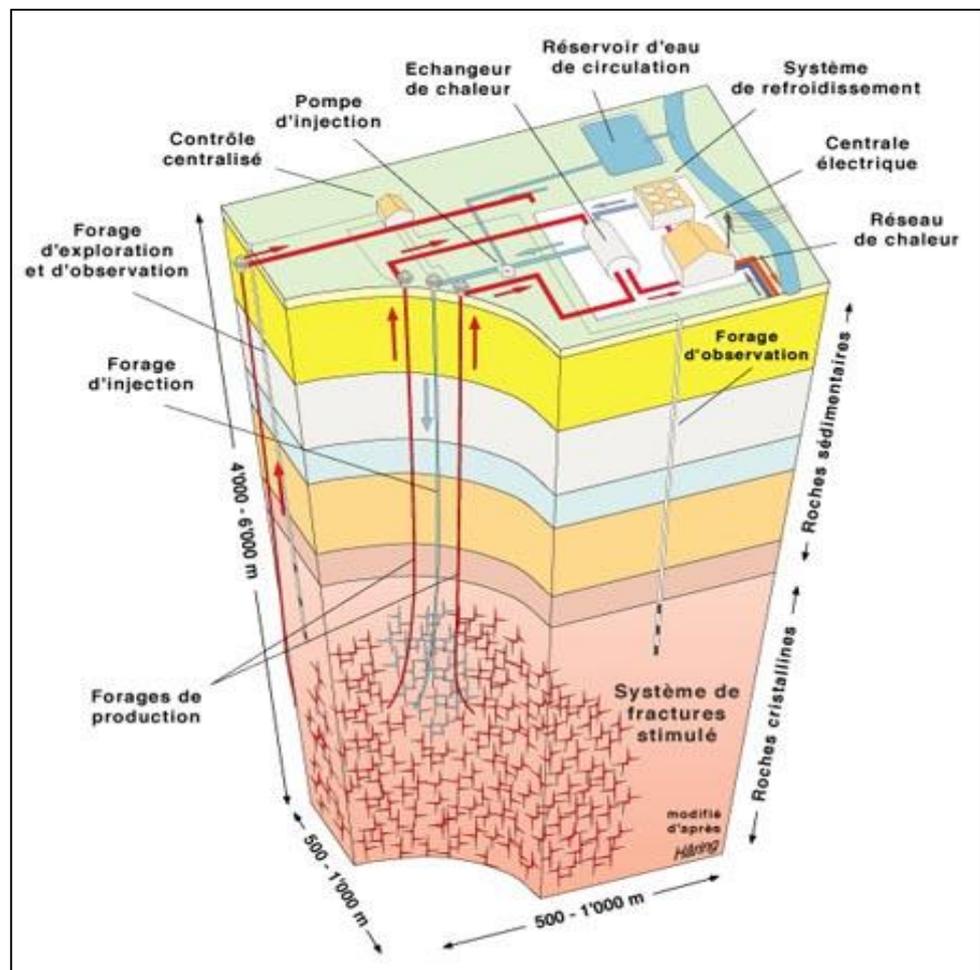
El gran interés en la tecnología de SGS tiene dos orígenes: primero, que se puede implementar en la mayor parte de la roca cristalina de sitios a una profundidad máxima de 6 km y, por otro lado, permite producir electricidad sin emisiones de CO₂ utilizando una fuente de energía renovable, el calor de la tierra. Varias regiones de Suiza presentan las condiciones geológicas requeridas por esta tecnología. Para demostrar la viabilidad general de SMS deben ser múltiples sistemas basados en sitios con diferentes características de gran profundidad.

Sin embargo, para asegurar la rentabilidad de un tipo de SMS de la instalación, la venta de exceso de calor es esencial hoy en día, además de la producción de electricidad. Por tanto, es esencial tener un gran consumidor de calor cercanas, como una red de

calefacción urbana. El proceso, también conocido como las "rocas fracturadas calientes", proporciona un primer paso, la presión de inyección de agua en el pozo para expandir las discontinuidades o grietas finas naturales de la roca cristalina. Este poder del macizo provoca un ligero movimiento de paredes rugosas fracturas, ahora discontinuidades abiertas. La masiva se hace permeable y puede servir como un "calentador de agua".

Imagen N° 2.26

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO GEOTÉRMICO



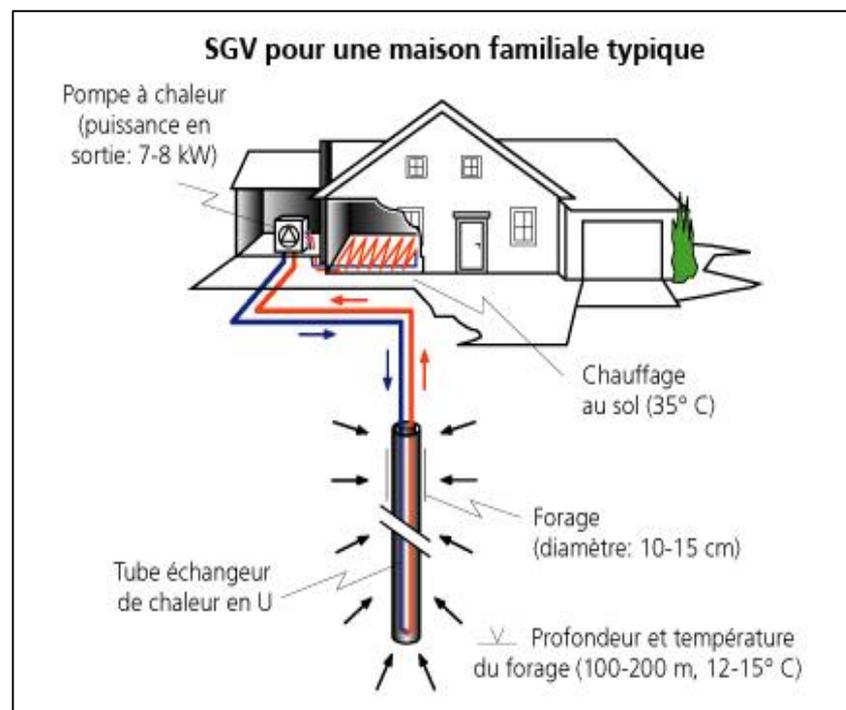
Fuente: M. Häring, geotérmica Exploradores Ltd.

- Sondas Geotérmicas Verticales

La sonda geotérmica vertical (SGV), un intercambiador de calor del suelo. Un SGV permite la explotación de calor de la tierra a profundidades de hasta 400 m. Una vez instalado en el pozo de sondeo, la SGV está funcionando en circuito cerrado como un intercambiador de calor con el subsuelo. Por lo tanto, permite la obtención de energía - forma renovable - en el sótano, que enfría ligeramente y alcanza un equilibrio casi permanente al cabo de unos años. El líquido refrigerante, que consiste en agua y anticongelante transporta energía mediante la circulación en tubos en U. La longitud de la SGV depende de las características del sótano y la potencia de calentamiento requerida.

Imagen N° 2.27

SONDA GEOTÉRMICA VERTICAL



Fuente: Sociedad Suiza de Geotérmica, tipología de sistemas geotérmicos

- Recuperación de calor desde el sótano

La profundidad típica de SGV para una nueva casa es 120 a 150 mA esta profundidad, la temperatura - constante durante todo el año - es alrededor de 12 a 15 ° C. La energía térmica pulsado en el sótano se valora a través de una bomba de calor (PAC), que eleva el nivel de temperatura en un valor para calentar la casa y el agua posiblemente caliente. Esta técnica, desarrollada en la meseta suiza ayuda a equipar dos nuevas viviendas unifamiliares, como los mayores edificios nuevos y renovados.

Imagen N° 2.28

SISTEMA DE CALOR DESDE SÓTANO



Fuente: Sociedad Suiza de Geotérmica, tipología de sistemas geotérmicos

- Calefacción y refrigeración

Si la profundidad de la sonda no exceda de alrededor de 200 metros, la instalación se puede usar en verano para enfriar el edificio.

Esto tiene la doble ventaja de ser cálido en invierno y fresco en verano, mientras pasa una energía gourmet sistema de aire acondicionado. Mediante la práctica de restauración del verano local, el excedente de energía del edificio y se alimenta de nuevo en el sótano.

Inversión sostenible y rentable

Los sistemas de calefacción con sonda geotérmica han demostrado ser un punto de vista tanto técnico como económico.

El proceso de concesión es cantonal. La energía cantonal y el medio ambiente son capaces de proporcionar información sobre el procedimiento.

Algunas cifras

En Suiza, más de 1.100 GWh de energía geotérmica se produjo en 2005, una cifra que sigue creciendo. Más de 50% proviene de sistemas con sondas geotérmicas.

En 2006, se perforaron casi 1.000.000 de metros lineales de sondas geotérmicas.

Imagen N° 2.29
CALEFACCIÓN Y REFRIGERACIÓN



Fuente: Sociedad Suiza de Geotérmica, tipología de sistemas geotérmicos

Túneles de drenaje

Un recurso local para captar Túneles y galerías a través de las masas de roca drenan las aguas subterráneas que se encuentran. Esta agua se descarga a las galerías fuera de los canales, se enfrían y luego, en la mayoría de los casos, se descargan en los cursos de agua. El espesor de las rocas suprayacentes del túnel, la temperatura del agua interceptada puede alcanzar de 20 a 40 °

C o más. Asociado con altas velocidades de flujo, este potencial recurso geotérmico puede ser utilizado para las necesidades de calefacción de los consumidores salidas cerrar los túneles. Con más de 700 túneles de ferrocarril y carretera, Suiza tiene una de las densidades más altas de dichas obras. Actualmente en Suiza, hay seis calefacciones utilizando túneles de calor: Gotthard-N2, Furka, Mappo-Morettina, Hauenstein, Ricken y finalmente el Gran San Bernardo, que no utiliza el agua de drenaje, pero el aire caliente a su galería.

Imagen N° 2.30
TÚNELES DE DRENAJE



Fuente: Sociedad Suiza de Geotérmica, tipología de sistemas geotérmicos

Recursos de baja temperatura

En los recursos geotérmicos de baja temperatura, entre 30 y 90 °C, concurren dos circunstancias que limitan su explotación comercial y, consecuentemente, su investigación geológico-minera.

La primera de ellas es que no contienen vapor de agua, sólo proporcionan calor, que ha de dirigirse a usuarios muy localizados, que no disten más de unos pocos kilómetros del brocal del pozo por el que se extrae el agua caliente.

La segunda es que los acuíferos profundos en los que se ubican suelen estar cargados de sales, por lo que para preservar el medio ambiente es necesario reinyectar el agua usada otra vez al acuífero una vez extraído el calor.

Estos dos condicionantes hacen que, aunque sus posibilidades de utilización sean amplias, como se vio en la Tabla 2.1 en la página 35, su mayor consumo se circunscriba a calefacción urbana en ciudades con el recurso en el propio subsuelo, y a establecimientos de baños termales, algunos instalados desde tiempos ancestrales, donde el agua caliente remontaba a la superficie a través de fallas y fracturas.

Muchos balnearios, para asegurarse un abastecimiento regular de agua caliente, han procedido a perforar sondeos profundos. Los aumentos de caudal obtenidos se destinan a mejorar la gestión energética de su recurso geotérmico, utilizando el agua termal de forma integral para el llenado de las piscinas, mantenimiento de la temperatura de los recintos y para calefacción de habitaciones, reinyectándolo posteriormente al acuífero.

La ausencia de vapor que podría utilizarse para producción de energía eléctrica, y la necesidad de consumo cercano a la fuente, limitan el valor económico de cualquier yacimiento nuevo que se pueda descubrir, y ello hace que no esté justificada la aplicación de medios técnicos sofisticados y caros para la investigación de este tipo de recursos.

La investigación de recursos de baja temperatura se basa en un proceso de recopilación, tratamiento e interpretación de datos ya disponibles, especialmente de otros trabajos, y de sondeos exploratorios ya realizados en el ámbito de investigaciones de hidrocarburos o hidrogeológicas.

2.4 Definiciones de términos básicos

Bomba de calor: Instalación que transfiere calor de un lugar frío a uno caliente, de manera opuesta a la dirección natural de flujo de calor. De manera similar a un refrigerador, las bombas de calor se usan para extraer calor de ambientes como el suelo (bombas de calor geotérmico), el agua o el aire, y pueden invertir su funcionamiento para proveer enfriamiento en verano.

Calidad de vapor: En termodinámica, es una propiedad extensiva de los fluidos que representa la relación entre la cantidad de vapor en masa, con respecto a la cantidad total de fluido.

Calor recuperable: En ingeniería de yacimientos, fracción del calor disponible en el subsuelo que puede ser llevado técnica y económicamente a la superficie para su explotación.

Carga eléctrica: Demanda de electricidad de miles o millones de usuarios al mismo tiempo, más las pérdidas de energía en las líneas de transmisión y distribución, que debe suministrar un sistema integrado de suministro de energía eléctrica. La carga pico es la carga máxima de corta duración observada en un cierto periodo de tiempo (un día, una semana, un año). La carga base es la energía demandada de manera continua en ese periodo de tiempo, y representa la cantidad requerida para satisfacer la demanda mínima de acuerdo a una expectativa razonable de las necesidades de los usuarios.

Cogeneración: Generación de energía eléctrica y aprovechamiento simultáneo del calor residual en un proceso industrial. En plantas geotermoeléctrica, se refiere al uso del agua caliente y/o vapor residual para aplicaciones directas que requieran calor. Sinónimo: Generación combinada de calor y electricidad (CHP: Combined heat and power).

Conductividad térmica: Propiedad de un material que mide su capacidad de conducir calor.

Consumo específico: En ingeniería geotérmica es la cantidad de vapor, en masa, que requiere una turbina para generar una unidad de potencia. Se representa comúnmente como CE y sus unidades son toneladas por megawatt (ton/MW).

Costo nivelado de energía: Costo unitario de generación expresado en pesos (u otra unidad monetaria) por kilowatt-hora, que iguala el valor presente neto (con una tasa de descuento dada) de los ingresos y de los costos durante la vida útil del proyecto. Incluye todos los costos de un proyecto (de inversión, de operación y mantenimiento, pero no el financiamiento).

Descompresión: Disminución de la presión de un volumen, regularmente relacionado con la extracción de masa o el enfriamiento.

Distribución normalizada: En estadística y probabilidad se llama distribución normal, distribución de Gauss o distribución gaussiana, a una de las distribuciones de probabilidad de variable continua que con más frecuencia aparece en fenómenos reales.

Dominio de pertenencia: En probabilidad y estadística, es el conjunto total de valores que puede tomar una variable.

Eficiencia del ciclo: En termodinámica, es la relación entre la energía que entrega una máquina y el calor total disponible para la moverla.

Eficiencia térmica: Para un ciclo, es la relación entre la energía neta producida y la cantidad de calor introducida al ciclo.

EGS: Siglas de Enhanced (or Engineered) Geothermal System: Sistema geotérmico mejorado. Un sistema para recuperar energía primaria mediante tecnologías de extracción de calor, diseñado para extraer y utilizar la energía térmica almacenada en el interior de la Tierra. Energía interna: En ingeniería, la energía interna (U) de un sistema intenta ser un reflejo de la energía térmica que contiene. En física molecular, es la suma de la energía cinética interna (es decir, de las sumas de las energías cinéticas de las individualidades que lo forman respecto al centro de masas del sistema) y de la energía potencial interna (la energía potencial asociada a las interacciones entre estas individualidades).

Entalpia: Término utilizado por los ingenieros para denominar a la cantidad de calor útil que contiene un fluido. Es decir, es la energía interna del fluido más el trabajo asociado a su expansión al momento de aprovecharlo. Generalmente se denomina con la letra H o h .

Estimulación: En sistemas tipo EGS, es el mejoramiento de la permeabilidad natural, o su creación cuando no hay ninguna. La estimulación se realiza usualmente por medios hidráulicos inyectando fluidos a tasas y presiones variables, o bien por medios químicos inyectando ácidos u otros compuestos para disolver partes de la roca en el subsuelo. La extensión de las fracturas mejoradas o creadas y su transmisibilidad final dependerán de los esfuerzos actuantes sobre las rocas y de sus propiedades térmicas y elásticas.

Factor de planta: Relación entre la generación real de una central eléctrica en un periodo de tiempo (usualmente un año) y la generación teórica que podría haber producido de acuerdo a su capacidad de placa si la unidad hubiera estado operando de manera ininterrumpida durante el mismo

periodo de tiempo. En unidades geotermoeléctricas recientes el factor de planta típico es de 90% o mayor.

Fluido geotérmico: Cualquier fluido producido por un pozo geotérmico. Puede ser vapor seco o sobrecalentado, líquido presurizado o una mezcla de líquido y vapor saturado, acompañada usualmente de gases incondensables.

Fluido supercrítico: Fluido a condiciones de temperatura y presión por encima de su temperatura y presión críticas (374.14 para agua), por encima de las cuales no se distingue la fase líquida de la de vapor.

Flujo de calor, flujo térmico: Cantidad de calor que pasa por una superficie por unidad de tiempo y por unidad de área, cuando la superficie se somete a un diferencial de temperatura entre sus caras. Es proporcional al producto de la conductividad térmica por el gradiente térmico.

Flujo isoentálpico: En termodinámica, se considera como flujo isoentálpico al proceso en el cual no existe variación en el contenido energético total de un fluido.

Masa aprovechable: En ingeniería de yacimientos, es la cantidad de masa (vapor) que se obtiene del separador, y que realmente puede ser usada para la generación eléctrica.

Masa recuperable: En ingeniería de yacimientos, es la cantidad de masa que puede ser extraída a la superficie de manera técnica y económica.

Media de la muestra: En matemáticas y estadística, la media aritmética (también llamada promedio o simplemente media) de un conjunto finito de números es igual a la suma de todos sus valores dividida entre el número de sumandos. Cuando el conjunto es una muestra aleatoria recibe el nombre de media muestral siendo uno de los principales estadísticos muestrales.

Método de Montecarlo: Método probabilístico y estadístico para evaluar una función con variables aleatorias múltiples.

Modelo Volumétrico: Modelo matemático para evaluación preliminar del potencial de yacimientos, desarrollado por el United States Geological Survey (USGS). Es el modelo simplificado más aceptado por la comunidad geotérmica internacional.

Muestra aleatoria: En probabilidad y estadística, es la selección al azar de un miembro de una población estadística.

Permeabilidad: Medida de la capacidad de los poros, grietas o aberturas de un material para permitir que los líquidos o gases fluyan a través de él bajo un gradiente de presión.

Porosidad: En geología, propiedad de una roca que cuantifica la cantidad de poros (espacios vacíos) que presenta, por unidad de volumen.

Potencia (Capacidad): Tasa a la cual se realiza un trabajo, expresado en unidades de joules por segundo (J/s) o watts (W) o sus múltiplos.

Potencial técnico: Cantidad de potencia obtenible con la implementación de tecnologías o prácticas que ya son actualmente utilizadas o que es probable que puedan ser utilizadas, sin tomar en cuenta costos, barreras o políticas.

Tectónica: Rama de las Ciencias de la Tierra que trata con las características y movimiento de las placas que componen la litósfera, y que resulta en la creación y deformación del magma y de las rocas.

Transmisibilidad: Capacidad de un yacimiento para permitir el flujo de un fluido a través de un área determinada, generalmente en dirección horizontal. Es producto de la permeabilidad y del espesor de la formación a través de la cual fluye el fluido. En sistemas geotérmicos la

transmisibilidad suele ser muy elevada, con valores mayores de 100 darcy-metros, comparada con la de los yacimientos petroleros donde es de cien a mil veces menor.

Turbina: Equipo que convierte la energía total de un fluido (aire, agua, gas caliente o vapor) en energía mecánica de rotación utilizada de manera directa para mover un generador eléctrico acoplado. Las turbinas de vapor a condensación descargan el vapor a un intercambiador de calor (llamado condensador) donde mediante enfriamiento artificial, se condensa el vapor y se extrae como líquido haciendo un vacío que mejora la eficiencia del ciclo, mientras que las turbinas de vapor a contrapresión descargan el vapor directamente a la atmósfera a través de un silenciador.

Potencial teórico: Cantidad de potencia derivada de parámetros naturales y del clima (por ejemplo, la irradiación solar total en una superficie continental o el calor almacenado a cierta profundidad), que representa el límite superior de la potencia que puede producirse de un recurso energético con base en principios físicos y el conocimiento científico actual. No toma en cuenta pérdidas de energía durante los procesos de conversión, ni posibles barreras.

Presión de separación: En ingeniería, en una central geotérmica es la presión a la que serán separadas las fases líquida y gaseosa en superficie antes de enviar el vapor a las turbinas para generar energía.

Variable aleatoria: En probabilidad y estadística, es una variable cuyo valor no está definido y puede adquirir cualquier valor al azar en un intervalo de pertenencia.

Yacimiento: En geotermia, es una zona del subsuelo compuesta por rocas calientes con fluidos naturales calientes cuya energía térmica puede ser económicamente explotada para generar energía eléctrica o en diversas aplicaciones directas.

Unidades

EJ: Exajoule. Medida de energía equivalente a 10^{18} Joules.

GW: Gigawatt. Medida de potencia equivalente a mil millones de watts. O bien a mil Megawatts

kW: Kilowatt-hora. Medida de energía que equivale a mil watts en una hora.

MW: Megawatt. Medida de potencia equivalente a un millón de watts.

TCF: Trillones de pies cúbicos

CAPÍTULO III

3. HIPÓTESIS Y VARIABLES

Operacionalizando las relevantes variables intervinientes que definen los criterios, son plantear una metodología, en el presente problema objeto de investigación, posibilitarán la explicación, demostración y probación de la hipótesis formulada, para ello, se han identificado dos variables independientes y una variable dependiente, las que son definidas:

3.1 Hipótesis

3.1.1 Hipótesis general

- Realizando el modelamiento y simulación del potencial energético geotérmico para la generación de energía eléctrica se logrará la instalación de la central termoeléctrica en la región Puno.

3.1.2 Hipótesis específicas

- **H1:** Planteando una metodología para determinar el potencial energético se logrará una adecuada estimación con un modelo conceptual del yacimiento y tener un aceptable nivel de confianza en las estimaciones del potencial disponible en el reservorio.
- **H2:** Aplicando criterios técnicos de evaluación del yacimiento se obtendrá un gran margen de seguridad y se logrará determinar la potencia eléctrica que se tiene en el yacimiento de la central termoeléctrica en la región Puno.

3.2 Definición conceptual de variables

3.2.1 Operacionalización de variable

Tabla N° 3.1

Operacionalización de variables

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES
Variable Independiente Modelamiento del Potencial Energético Geotérmico	<ul style="list-style-type: none"> Modelo de los sistemas geotérmicos está basado en detallado trabajo de investigación de superficie 	<ul style="list-style-type: none"> Existen varias modelos que permitirán determinar la evaluación de recursos geotérmicos. 	<ul style="list-style-type: none"> Factores geológicos y físicos: distribución de la temperatura, calor específico de la roca, porosidad eficaz total, permeabilidad, modelo de circulación de los fluidos, tipo de fase fluida, profundidad del almacén, etc. Factores tecnológicos: tecnología de perforación, tecnología de explotación del yacimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> Volcanes Fumarolas Manantiales Calientes
Variable Independiente Simulación del Potencial Energético Geotérmico	<ul style="list-style-type: none"> Son software o programa que permiten resolver numéricamente los modelos de estudio y, por otro lado, son herramientas útiles para contrastar los resultados de cálculo obtenidos con otros códigos. 	<ul style="list-style-type: none"> La simulación preliminar de desempeño operacional permite la estimación del número de sondeos geotérmicos y corroborar la inversión calculada previamente, determinando así si el proyecto, es o no factible en un plazo de 30 años. 	<ul style="list-style-type: none"> Es un programa diseñado como una adición a Microsoft Excel desarrollado para hacer análisis de riesgo en el método de análisis volumétrico 	<ul style="list-style-type: none"> Energía en roca y fluido Factor de recuperación de calor Factor de Planta
Variable Dependiente Central Termoeléctrica	<ul style="list-style-type: none"> Es una instalación donde se genera electricidad mediante energía geotérmica donde se extrae el calor de la Tierra para generar energía renovable 	<ul style="list-style-type: none"> El funcionamiento de una central geotérmica o geotermoeléctrica se basa en la compleja operación de un sistema campo-planta 	<ul style="list-style-type: none"> Realizar un estudio térmico para el cálculo de potencial eléctrico, el que se considerará para el estudio técnico y económico del proyecto. Determinar de forma cuantitativa la factibilidad económica de instalar una central geotérmica Estudiar el impacto ambiental de las centrales geotérmicas, específicamente en la ubicación del proyecto. 	<ul style="list-style-type: none"> Exploración Desarrollo Explotación

Fuente: Elaboración Propia

CAPÍTULO IV

4. DISEÑO METODOLÓGICO

4.1 Tipo y diseño de Investigación

El tipo de investigación de la última fase es cualitativa y operativa.

El nivel es no experimental (no alteramos el medio del que hemos obtenido los datos).

También podríamos decir que de acuerdo al tratamiento de las variables la investigación es Descriptiva Correlacional, pero en el caso específico trabajaremos los datos en función de las variables para determinar el potencial energético geotérmico que se tiene en el altiplano peruano y específicamente en Pinaya que es la zona de nuestro estudio.

4.2 Método de Investigación

Existen varias metodologías de evaluación de recursos geotérmicos. La mayor parte de los conceptos utilizados para describir las cantidades aprovechables de una determinada sustancia tienen sus orígenes en la industria minera (SCHANZ, 1975), ante la necesidad no solo de conocer cuánto mineral se podría extraer de un yacimiento conocido, sino también de evaluar la extensión y límites del mismo para llevar a cabo las necesarias previsiones económicas de explotación.

Mientras la estimación de recursos y reservas de minerales y combustibles fósiles ha sido una disciplina normalmente aplicada a lo largo de este siglo, la valoración del potencial geotérmico constituye un campo de investigación mucho más novedoso, razón por la que las metodologías de evaluación no están estandarizadas.

Por otra parte, se consideró este método por la información conseguida del Ingemmet y por los siguientes factores que concurren una serie de condicionantes específicos que pueden resumirse en los siguientes:

- **Factores geológicos y físicos:** distribución de la temperatura, calor específico de la roca, porosidad eficaz total, permeabilidad, modelo de circulación de los fluidos, tipo de fase fluida, profundidad del almacén, etc.
- **Factores tecnológicos:** tecnología de perforación, tecnología de explotación del yacimiento, factores de conversión de la energía térmica en energía eléctrica, factores de utilización de la planta, utilización de los fluidos de descarga, etc.
- **Factores económicos:** costes de explotación de las plantas de utilización, costes financieros, precios de la energía convencional, valor de la propia energía geotérmica, etc.
- **Factores ligados al marco institucional:** legislación vigente, oportunidad de desarrollar otras fuentes energéticas locales, factores sociales, limitaciones ecológicas, etc.

Estos fueron todos los factores que se consideraron para la toma de decisión para escoger este método de análisis volumétrico, algunos no resultan muy difíciles de evaluar objetivamente, como sucede con los tecnológicos y los económicos a corto plazo. Otros, sin embargo, pueden resultar más difícilmente previsibles (evolución de los precios de la energía, política energética del país, etc.). La evaluación del potencial geotérmico se hace progresivamente más difícil a medida que se pasa a escalas de trabajo más localizadas

La evaluación del potencial energético de un yacimiento geotérmico depende de diversos factores como lo es el volumen del yacimiento, la temperatura en él, la porosidad de la roca, la presión del yacimiento entre otros. Existen métodos para evaluar el potencial con pocos datos pero que realizan simplificaciones para poder estimar.

Para obtener una mejor aproximación se necesitará de estudios de geología, geofísica, geoquímica a detalle para ello será necesario recurrir al Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (Ingemmet) quien nos proporcionará dichos datos actualizados.

Los estudios geoquímicos consisten en el muestreo y análisis químicos de agua y gas de las manifestaciones termales ó pozos del área de estudio, esto se hace para conocer la composición química e isotópica, el origen del fluido geoquímico, las temperaturas probables del reservorio, las características corrosivas o incrustantes del fluido.

Los objetivos del presente estudio, que se realizaron fueron los siguientes:

- (a) una caracterización química e isotópica de las manifestaciones geotérmicas superficiales de la zona de estudio.
- (b) identificar el origen del agua geotermal utilizando isótopos estables (oxígeno-18 y deuterio).
- (c) la estimación de la temperatura del reservorio.

Para un campo totalmente nuevo es necesario realizar una estimación preliminar del potencial, el número de pozos a perforar, el costo que tendrá la inversión inicial y el costo nivelado de generación. En la campaña de exploración se obtendrá información como: la temperatura del yacimiento, la porosidad de la roca, el espesor y área del yacimiento, entre otros datos con lo que se podrá realizar una estimación preliminar del potencial.

Debido a que es difícil saber lo que se puede encontrar dentro de la tierra, algunos valores como el espesor, área del yacimiento y la porosidad de la roca, se presentan con incertidumbre.

Durante el proceso de perforación se pueden extraer núcleos que son muestras representativas de la formación de la cuales podemos obtener datos reales de porosidad y permeabilidad de la roca, además de saturaciones del fluido.

De acuerdo a los datos recogidos por Ingemmet, la Zona Geotermal de Pinaya la temperatura de las fuentes termales varía entre 60 hasta 83 °C y el pH entre 6 a 7 con valores de conductividad eléctrica entre 14.8 y 15.98 mS/cm.

Las manifestaciones tienen valores de descarga entre 30 y 60 L/min, haciendo un valor total aproximado de todas las descargas de 300 L/min (véase el TABLA N°4.1).

Los resultados de la composición química presentan iones mayoritarios de cloruro y sulfato, con valores desde 1610 mg/l a 5508 mg/l y 310 mg/l a 1153 mg/l respectivamente; así como sodio y calcio con concentraciones de 1130 mg/l a 3784 mg/l y 116 mg/l a 366 mg/l respectivamente (véase el TABLA N°4.1 en la página 107)

TABLA N°4.1
COMPOSICIÓN QUÍMICA (MG/L) DE LAS MANIFESTACIONES
GEOTERMALES DE LA ZONA GEOTERMAL DE PINAYA⁶

Fuente	Código	Temp °C	pH	Cond μS/cm	Li mg/L	Na mg/L	K mg/L	Ca mg/L	Mg mg/L	Cl mg/L	F mg/L	SO ₄ mg/L	HCO ₃ mg/L	B mg/L	SiO ₂ mg/L	As mg/L	Sr mg/L	¹⁸ O ‰	² H ‰
Río Pinaya (rio arriba)	RPA	4.1	7.17	47	-	3	2	3	1	-	-	6	18	-	31	-	-	-	-
Agua manantial	AGM	9.4	7.02	44	-	3	3	3	1	-	-	7	17	-	27	-	-	-	-
Pinaya I	PIN-I	80.3	6.14	15860	7	3784	225	366	35	5247	3	1044	207	18	86	3	14	-	-
Pinaya II	PIN-II	83.8	6.50	15350	8	3780	219	350	34	5328	3	987	228	18	90	4	15	-	-
Pinaya III	PIN-III	75.5	6.42	14800	7	3513	151	298	26	4996	3	999	205	18	72	3	14	-	-
Pinaya IV	PIN-IV	65.1	7.07	15980	8	3783	216	358	37	5508	3	1153	237	18	81	4	16	-	-
Río Pinaya (rio abajo)	RPL	19.4	8.47	5880	2	1130	68	116	12	1610	1	310	84	10	46	1	5	-	-
Pinaya 6	PIN6	83.3	7.02	15650	8	3260	187	322	30	5254	-	888	211	17	79	-	-	-18	-133
Pinaya 8	PIN8	81.0	6.69	15440	7	3133	190	322	31	5147	-	995	156	17	104	-	-	-	-

Fuente: Ingemmet, 2015

Realizar la evaluación preliminar del potencial en un yacimiento supuesto, comparando los distintos métodos existentes y confirmando la confiabilidad que el método de descompresión gradual presenta.

Modelos Conceptual para evaluación del Potencial Energético

Para lograr una adecuada estimación es necesario contar con un modelo conceptual del yacimiento que se genere empleando adecuadamente la documentación disponible, para tal efecto se debe realizar la integración e interpretación de la información geológica, geofísica y geoquímica de la zona, a fin de delimitar el área, determinar sus condiciones de presión y temperatura en el subsuelo, conocer las características químicas de los fluidos contenidos en el reservorio y con ello, conformar el modelo conceptual del yacimiento.

Asimismo, para tener un aceptable nivel de confianza en las estimaciones del potencial disponible en el reservorio, se recurre a la aplicación de las

⁶ CRUZ PAUCCARA, Vicentina. KOJI, Matsuda. **Estudio Geoquímico de las fuentes termales de la zona geotermal de Pinaya, Santa Lucia**. Vol.1: 1 a 5. Abril 2014

distintas técnicas de evaluación del yacimiento, cada una con distintas simplificaciones y diferente grado de complejidad, lo que da un gran margen de seguridad en los resultados:

- ❖ Análisis Volumétrico.
- ❖ Modelo Termodinámico
- ❖ Descompresión gradual

⁷Con anterioridad se ha tratado de realizar la predicción del comportamiento de un yacimiento geotérmico ante la instalación de una central de generación, a continuación, se presentan los fundamentos teóricos de cada modelo:

- ❖ Análisis Volumétrico. - Calcula la energía asociada intrínsecamente al contenido en masa en un yacimiento, considera que el yacimiento entregará toda la materia que tiene contenida y esta se usará con un porcentaje de evaporación en el separador y un factor de transformación típico. es una de las formas más sencillas de tener una primera aproximación del potencial geotérmico que se puede encontrar en un yacimiento, éste tipo de análisis se utiliza cuando se carece de información específica del yacimiento, por lo que es necesario realizar varias suposiciones.
- ❖ Modelo Termodinámico. - se encuentra fundamentado en las ecuaciones fundamentales de la termodinámica, conservación de masa y energía; se define la presión inicial del yacimiento, así como el porcentaje de líquido y vapor presentes, se considera que se encuentra en saturación y se calculan las propiedades termodinámicas bajo estas condiciones. Se propone un diferencial de presión P , y se determina la masa que debe ser extraída del yacimiento para lograr ese P , recalculando las propiedades termodinámicas en cada decremento hasta alcanzar las condiciones finales propuestas.

⁷ ANDRACA GUTIERREZ, Fabián. RODRIGUEZ MARIAN, José. **Modelado inicial para yacimientos geotérmicos durante la etapa de exploración**, Tesis Titulo. México. Universidad Nacional Autónoma De México. 2012

- ❖ Descompresión gradual. - Calcula el comportamiento del reservorio de forma continua Plantea y resolviendo las ecuaciones diferenciales que gobiernan el fenómeno en un modelo simplificado, es posible evaluar el comportamiento con transferencia de calor (propone un factor de transferencia) y recarga de mas (reinyección), evalúa el potencial iterando la potencia instalable hasta alcanzar la presión de abandono en el yacimiento.

4.2.1 Análisis Volumétrico

El método volumétrico, también denominado método del "calor volumétrico" o del "calor almacenado" o "heat in place", basa su principio en calcular la energía contenida en un cierto volumen de roca además propone una forma simple para estimar el potencial de un yacimiento geotérmico y es muy útil en etapas tempranas del desarrollo de un proyecto geotermoeléctrico.

Este método ha sido empleado por la Unión Europea en la elaboración de los diferentes Atlas de Recursos Geotérmicos publicados hasta la fecha (1988 y 2002). Asimismo, numerosos autores han utilizado este método en sus trabajos de cuantificación de recursos geotérmicos en Wairakei y Broadlands (Nueva Zelanda), en Kawerau también de Nueva Zelanda, en Ahuachapán en El Salvador, en Pauzhetsk (Kamchatka), en Italia, en los sistemas convectivos de EEUU, en Takinoue en Japón y en muchos otros. El método también se ha adoptado, de manera mucho más esquemática, para numerosos estudios a escala continental.

El primer paso a realizar para aplicar el método es calcular el recurso accesible de base, es decir, la energía térmica existente in situ hasta una determinada profundidad, refiriendo todos los cálculos a la temperatura media anual en superficie.

En la práctica, se lleva a cabo una aproximación dividiendo la porción de corteza superior bajo un área determinada en una serie de intervalos, que normalmente corresponden a las unidades geológicas, y se estima a continuación la temperatura de cada volumen y que el Ingemmet nos ha proporcionado. Se puede proceder entonces de dos maneras:

- Estimando un calor específico volumétrico y calculando la energía térmica total contenida en la roca y en el agua, o bien.
- Estableciendo un valor para la porosidad total de cada volumen y calculando separadamente la energía contenida en la roca y en el fluido.

Los resultados obtenidos mediante estos dos métodos no difieren, por lo general, en más del 5% si la porosidad total es inferior al 20%, que es lo más habitual en los ámbitos geológicos más generalizados, y el fluido que rellena los poros es agua líquida. La segunda modalidad pone de manifiesto que, en casi todos los almacenes, el 90% de la energía térmica se halla contenida en la roca y solo el 10% en el agua.

El método evalúa la cantidad de calor recuperable, determinando el calor disponible en el yacimiento y suponiendo que el recurso geotérmico (totalmente en fase líquida) se lleva hasta la superficie con una efectividad de recuperación y luego es enfriado hasta la temperatura ambiente (recuperación ideal), de acuerdo con las ecuaciones siguientes:

La evaluación de la potencia de generación eléctrica por método volumétrico se basa en la estimación del calor disponible a partir del

volumen y temperatura del reservorio, y el calor específico de los fluidos dentro de las rocas y poros. Luego, se determina la potencia a partir del calor recuperable en un tiempo dado, tomando en cuenta la tasa de recuperación del calor. La fórmula matemática aplicada es la siguiente:

$$P = (Q_t * R_f * C_e) / (P_f * t)$$

Donde:

- P: Potencial Geotérmico (MWe)
- Q_t: Energía en roca y fluido
- R_f: Factor de recuperación de calor
- P_f: Factor de Planta
- t: Tiempo

Los pasos siguientes son:

1.- Se determina la **Energía en roca y fluido (Q_t)** o calor total en donde Q_r es la energía en roca y Q_f que es la Energía en fluidos

$$Q_t = Q_r + Q_f \quad (1)$$

2.- Posteriormente se evalúa la **Energía en la roca (Q_r)** o calor almacenado en la roca, que viene dado por el Área de yacimiento (A) multiplicado por espesor del reservorio (h) y la densidad de la roca (ρ_{roca}) y el calor específico de la roca (C_r), así también se multiplica la unidad menos porosidad de la roca (φ).

Finalmente, la diferencia de temperaturas (T_i-T_a) entre la temperatura de media del reservorio (T_i) menos la temperatura de abandono del reservorio (T_a).

$$Q_r = A \cdot h \cdot (\rho_r \cdot C_r \cdot (1 - \phi) \cdot (T_i - T_a)) \quad (2)$$

3.- Seguidamente se determina la **Energía en fluidos (Qf)** o calor almacenado en el fluido, que viene dado por el Área de yacimiento (A) multiplicado por espesor del reservorio(h) y la densidad del fluido (ρ_f) y el calor específico del fluido (Cf).

También se multiplica la porosidad de la roca(ϕ) y finalmente la diferencia de temperaturas($T_i - T_a$) entre la temperatura de media del reservorio(T_i) menos la temperatura de abandono del reservorio(T_a).

$$Q_f = A \cdot h \cdot (\rho_f \cdot C_f \cdot \phi \cdot (T_i - T_a)) \quad (3)$$

A pesar de que el volumen y la temperatura del reservorio son parámetros inciertos, en la evaluación de la reserva de recursos por el método volumétrico, se basa en determinar un valor con las cifras dadas al volumen y la temperatura del reservorio.

Sin embargo, en realidad, al considerar la incertidumbre de los elementos subterráneos, el volumen y la temperatura del reservorio deben ser dados dentro de un determinado margen.

TABLA N°4.2
DATOS NECESARIOS PARA EL MODELO VOLUMÉTRICO

Parámetros del Campo Geotérmico:	Variables	Unidades
Calor total	Qt	kJ
Calor almacenado en la roca	Qr	kJ
Calor almacenado en el fluido	Qf	kJ
Area	A	km ²
Espesor del reservorio	h	m
Calor específico de la roca	Cr	kJ/kg deg(C)
Calor específico del fluido	Cf	kJ/kg deg(C)
Porosidad de la roca	phi	
Temperatura media del reservorio.	Ti	deg(C)
Temperatura de abandono del reservorio	Ta	deg(C)
Densidad de la roca	rho _r	kg/m ³
Densidad del fluido	rho _f	kg/m ³
Parámetros de la Planta Geotérmica:		
Potencial geotérmico	P	MWe
Factor de recuperación de calor	Rf	adim
Eficiencia de conversión	Ce	adim
Factor de Planta	P _f	adim
Tiempo	t	years

Fuente: Espíndola (2006), Viabilidad Económica de Proyectos Geotermoeléctricos, un Enfoque Integral

4.2.2 Modelo Termodinámico

En base a las ecuaciones básicas de la termodinámica y la conservación de masa, se proponen tres casos:

- Extracción vapor (parte superior del yacimiento)
- Extracción de agua (parte inferior del yacimiento)
- Extracción agua- vapor “homogéneo”

Consideraciones para el análisis:

- Porosidad
- Sin Recarga (reinyección)
- Sin Transferencia de calor roca-fluido

Suponiendo que el sistema se encuentra en equilibrio termodinámico (idealización):

- Balance de energía (1)
- Conservación de masa (2)
- Proceso a volumen constante (3)

$H_o - H_s = H1$	(1)
$M_o - M_s = M1$	(2)
$V_o = V1$	(3)

4.2.3 Descompresión Gradual

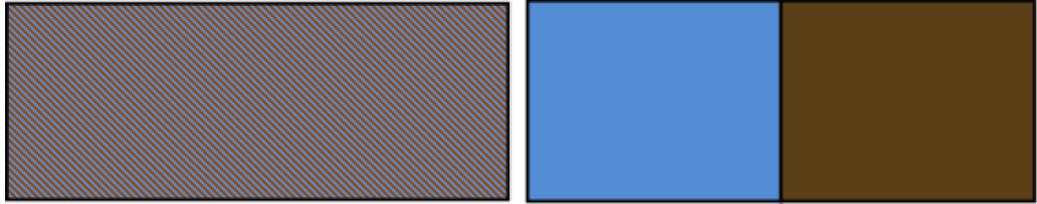
La siguiente metodología propone una herramienta simple, pero con los fundamentos teóricos necesarios para precisar los resultados.

Este modelo resulta más simple que un modelo completo, pero con una exactitud considerable; ya que presenta una complejidad aún mayor en comparación con el modelo simple (análisis volumétrico).

Para la simplificación del problema, se parte de la idealización del yacimiento geotérmico como un volumen de control con características físicas y termodinámicas homogéneas, en un principio se supondrá que las fronteras son impermeables y adiabáticas. En un yacimiento existe roca porosa saturada de fluido (véase la figura N°4.2), sin embargo, para simplificar el cálculo se propone un yacimiento conceptualmente separado, donde la roca estará en contacto con el agua, pero serán dos medios diferentes.

Imagen N° 4.1

VISUALIZACIÓN E IDEALIZACIÓN YACIMIENTO GEOTÉRMICO



Fuente: Tesis Modelado Inicial para yacimientos geotérmicos durante la etapa de exploración.

Se plantearán las ecuaciones que rigen el fenómeno partiendo de los principios fundamentales de conservación de masa y energía, además se utilizarán las tablas de vapor para definir las propiedades de cada estado, por otro lado, se verá la bondad de utilizar incrementos de presión y se presentará la forma de interpretar la evolución en el tiempo. Se seguirá la metodología presentada por Hiriart para la simplificación de las ecuaciones diferenciales y se propondrá también un método numérico donde se dé solución. Se espera del método concluir acerca de la capacidad instalable en un yacimiento geotérmico, el tiempo que podrá explotarse además de las características internas en el yacimiento. Se deberán definir las condiciones iniciales del yacimiento (Temperatura, presión, estado termodinámico), parámetros básicos del yacimiento como: densidad, calor específico y porosidad de la roca, volumen total del yacimiento; y algunos otros de la central (Potencia, tipo de central, presión de separación, consumo específico, etc.) . Siguiendo la metodología presentada por Hiriart⁸ donde se resuelven las ecuaciones de conservación de masa y energía en función de las propiedades termodinámicas del fluido; planteamos los distintos casos

⁸ HIRIART LE BERT, Gerardo. (1985), **Comportamiento termodinámico de yacimientos geotérmicos simplificados**. Actas Taller sobre ingeniería de yacimientos geotérmicos. California. Stanford University, Standford.2011

mediante ecuaciones diferenciales que simulan el comportamiento de un yacimiento geotérmico.

- **Caso A) Expansión Adiabática**

Se definen las propiedades termodinámicas del yacimiento y con el decaimiento de la presión se expandirá la extracción.

✚ Partiendo de la ecuación de conservación de masa

$$\dot{M} = \dot{m}_e - \dot{m}_s \quad (1)$$

✚ Como únicamente hay extracción del yacimiento:

$$\dot{M} = -\dot{m}_s \quad (2)$$

✚ Por otro lado, el flujo másico se define como:

$$\dot{m} = -\frac{dm}{dt} \quad (3)$$

Donde:

\dot{M} : Masa del yacimiento [kg]

\dot{m}_e : Flujo másico de entrada $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$

\dot{m}_s : Flujo másico de salida $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$

\dot{m} : Flujo másico $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$

La Masa se define como:

$$M = \frac{v\phi}{v} \quad (4)$$

✚ Derivando:

$$\frac{dM}{dt} = v\phi \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{v} \right) \quad (5)$$

$$\frac{dM}{dt} = \forall \phi \left[\frac{v \frac{d1}{dt} - 1 \frac{dv}{dt}}{v^2} \right]$$

$$\frac{dM}{dt} = \forall \phi \left[\frac{-1 \frac{dv}{dt}}{v^2} \right] = - \frac{dv \forall \phi}{dt v^2}$$

$$\frac{dM}{dt} = - \frac{M dv}{v dt}$$

$$v \frac{dM}{dt} = -M \frac{dv}{dt} \quad (6)$$

Sustituyendo (3) en (6)

$$-\dot{m}v = -M \frac{dv}{dt}$$

$$\dot{m}v = M \frac{dv}{dt} \quad (7)$$

Reemplazando (7) se obtiene que la Ecuación de la Energía:

$$-Q_R + W + \dot{m} \left(U + \frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz \right)_{in} - \dot{m} \left(U + \frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz \right)_{out} \\ = \frac{dMu}{dt}$$

Considerando que no hay pérdidas de calor, trabajo, ni recarga de fluido y despreciando los términos de energía cinética y potencial.

Sustituyendo en (8)

$$-\dot{m}h = \frac{dMu}{dt} \quad (8)$$

Derivando:

$$h = u + Pv \quad \therefore u = h - Pv$$

$$-\dot{m}h = \frac{dM(h - Pv)}{dt}$$

Sustituyendo (3) y (7) en (9)

$$-\dot{m}h = \frac{Mdh}{dt} + \frac{hdM}{dt} - \frac{MPdv}{dt} - \frac{MvdP}{dt} - \frac{PvdM}{dt}$$

Homogenizando

$$-\dot{m}h = (h - Pv)(-\dot{m}) + \frac{Mdh}{dt} - Pv\dot{m} - Mv\frac{dp}{dt}$$

$$0 = M\frac{dy}{dx} - Mv\frac{dp}{dt}$$

$$dh = vdp$$

Simplificando finalmente se obtiene:

$$\dot{M} = \dot{m}_e - \dot{m}_s$$

Caso B) Expansión con Transferencia de Calor de la Roca al Fluido Sin Recarga de Masa.

Considerando flujo de calor cedido de la roca-fluido (sin recarga)

***Condición:** la roca y el fluido permanecen en equilibrio termodinámico durante el proceso.

Por conservación de masa:

$$\dot{M} = \dot{m}_e - \dot{m}_s$$

En este caso no se considera un flujo de entrada, únicamente extracción del reservorio. Por lo tanto:

$$\dot{M} = -\dot{m}_s$$

Por otro lado, el flujo másico se define como:

$$\dot{M} = -\frac{dM_s}{dt}$$

De la Ecuación de la Energía:

$$-Q_R + W + \dot{m} \left(U + \frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz \right)_{in} - \dot{m} \left(U + \frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz \right)$$

Por ser proceso a volumen constante:

$$W = \int P dv = 0$$

De la definición de entalpia:

$$h = U + \frac{P}{\rho}$$

Despreciando energía cinética y potencial

Por lo tanto:

$$-\dot{m}h = \frac{dMu}{dt} + \dot{Q}_R$$

Como:

$$h = U + Pv$$

Podemos reescribir la ecuación como:

$$-\dot{m}h = \frac{dM(h-Pv)}{dt} + \dot{Q}_R \quad (1)$$

De la expresión que define a Q_R (flujo):

$$\dot{Q}_R = M_R C_R \Delta T$$

$$\frac{dQ_R}{dt} = M_R C_R \frac{dT}{dt}$$

Como no existe cambio de fase “u” depende únicamente del cambio de temperatura (ΔT), y como se propone equilibrio termodinámico:

* $M_R = \text{cte}$.

$$\frac{dU_R}{dt} = \frac{dT}{dt} C_R$$

$$\dot{Q}_R = M_R \frac{dU_R}{dt}$$

En la ecuación (1):

$$-\dot{m}h = \frac{dM(h-Pv)}{dt} + M_R \frac{dU_R}{dt} \quad (2)$$

Como se pretende involucrar a la presión como variable independiente, para el término de \dot{Q}_R :

$$\frac{dT}{dt} = \frac{dT}{dt} \frac{dP}{dP} = \frac{\partial T}{\partial P} \text{sat} \frac{dP}{dt}$$

$$\dot{Q}_R = M_R C_R \frac{\partial T}{\partial P} \text{sat} \frac{dP}{dt}$$

En saturación el término que involucra a la derivada parcial implica una derivada ordinaria, en cualquier otro punto fuera de la campana sería necesario conocer dos propiedades para definir a la temperatura.

$$\frac{\partial T}{\partial P} \text{sat}$$

Una vez recolectado los datos de temperatura en diferentes puntos en

situ asimismo se realizará la codificación de la información para ser digitada, procesada usando la base datos obteniendo el cálculo de calor almacenado y potencial de generación geo eléctrica usando método Volumétrico y valores de parámetros ajustados. Después se obtendrá los datos y se procederá a la interpretación respectiva de los datos estadísticos.

CAPITULO V

5. RESULTADOS

5.1 Resultados descriptivos

- Planteando una metodología apropiada se logró una adecuada estimación con un modelo conceptual del yacimiento y tener un aceptable nivel de confianza en las estimaciones del potencial disponible en el reservorio.
- Aplicando criterios técnicos de evaluación del yacimiento y obtener un gran margen de seguridad de esta manera se logró el potencial energético que se tiene en el yacimiento de la central termoeléctrica en la región Puno.

Validación de los Modelos del potencial geotérmico

Para lograr una adecuada estimación es necesario contar con un modelo conceptual del yacimiento que se genere empleando adecuadamente la documentación disponible.

Para tal efecto se debe realizar la integración e interpretación de la información geológica, geofísica y geoquímica de la zona, a fin de delimitar el área.

Determinar sus condiciones de presión y temperatura en el subsuelo, conocer las características químicas de los fluidos contenidos en el reservorio y con ello, conformar el modelo conceptual del yacimiento.

Asimismo, para tener un aceptable nivel de confianza en las estimaciones del potencial disponible en el reservorio, se recurre a la aplicación de las distintas técnicas de evaluación del yacimiento.

Cada una con distintas simplificaciones y diferente grado de complejidad, lo que da un gran margen de seguridad en los resultados:

- Calor remanente GEOCOST
- Análisis Volumétrico.
- Modelo Termodinámico
- Descompresión gradual

Finalmente se presenta la discusión de los resultados obtenidos al tener la información recolectada in situ, definiendo que el método de análisis volumétrico es el más accesible por los datos que presentan y que sirvió para concluir sobre el potencial eléctrico del yacimiento y recomendar acerca de su explotación.

En la recolección de datos se obtuvieron los siguientes datos de temperaturas, en la Zona Geotermal de Pinaya (ZGP) el 27 de septiembre de 2016:

Estos son todas las temperaturas en los 6 puntos de medición q se han tomado considerando que se encuentra a una altura mayor de 3000 msnm.

Punto N° 01: Temperatura de 47°C

TABLA N° 5.1
CÁLCULO DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO-I

Ecuaciones de energía:

Energía en roca y fluido	$Q_t = Q_r + Q_f$
Energía en roca	$Q_r = A \cdot h \cdot (\rho_{hor} \cdot C_r \cdot (1 - \phi) \cdot (T_i - T_a))$
Energía en fluidos	$Q_f = A \cdot h \cdot (\rho_{hof} \cdot C_f \cdot \phi \cdot (T_i - T_a))$
Potencia de la planta	$P = (Q_t \cdot R_f \cdot C_e) / (P_f \cdot t)$

Parámetros del Campo Geotérmico:				std
Calor total	Qt	5.23817E+15	kJ	
Calor almacenado en la roca	Qr	5.15832E+15	kJ	
Calor almacenado en el fluido	Qf	7.98443E+13	kJ	
Area	A	5.385	km ²	
Espesor del reservorio	h	600	m	
Calor específico de la roca	Cr	0.9	kJ/kg deg(C)	
Calor específico del fluido	Cf	4.2	kJ/kg deg(C)	
Porosidad de la roca	phi	0.1		
Temperatura media del reservorio.	Ti	120	deg(C)	20
Temperatura de abandono del reservorio	Ta	47	deg(C)	5
Densidad de la roca	rho _r	2700	kg/m ³	
Densidad del fluido	rho _f	806	kg/m ³	25
Parámetros de la Planta Geotérmica:				
Potencial geotermico	P	110.6584	MWe	
Factor de recuperación de calor	Rf	0.15	adim	
Eficiencia de conversión	Ce	0.1	adim	
Factor de Planta	P _f	0.9	adim	
Tiempo	t	25	years	

Fuente: Propia

Punto N° 02: Temperatura de 59 °C

TABLA N° 5.2
CÁLCULO DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO-II

Ecuaciones de energía:

Energía en roca y fluido	$Q_t = Q_r + Q_f$
Energía en roca	$Q_r = A \cdot h \cdot (\rho_{hor} \cdot C_r \cdot (1 - \phi) \cdot (T_i - T_a))$
Energía en fluidos	$Q_f = A \cdot h \cdot (\rho_{of} \cdot C_f \cdot \phi \cdot (T_i - T_a))$
Potencia de la planta	$P = (Q_t \cdot R_f \cdot C_e) / (P_f \cdot t)$

Parámetros del Campo Geotérmico:				std
Calor total	Qt	4.3771E+15	kJ	
Calor almacenado en la roca	Qr	4.31038E+15	kJ	
Calor almacenado en el fluido	Qf	6.67192E+13	kJ	
Area	A	5.385	km ²	
Espesor del reservorio	h	600	m	
Calor específico de la roca	Cr	0.9	kJ/kg deg(C)	
Calor específico del fluido	Cf	4.2	kJ/kg deg(C)	
Porosidad de la roca	phi	0.1		
Temperatura media del reservorio.	Ti	120	deg(C)	20
Temperatura de abandono del reservorio	Ta	59	deg(C)	5
Densidad de la roca	rho _r	2700	kg/m ³	
Densidad del fluido	rho _f	806	kg/m ³	25
Parámetros de la Planta Geotérmica:				
Potencial geotermico	P	92.4679	MWe	
Factor de recuperación de calor	Rf	0.15	adim	
Eficiencia de conversión	Ce	0.1	adim	
Factor de Planta	P _f	0.9	adim	
Tiempo	t	25	years	

Fuente: Propia

Punto N° 03: Temperatura de 75 °C

TABLA N° 5.3

CÁLCULO DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO-III

Ecuaciones de energía:

Energía en roca y fluido	$Q_t = Q_r + Q_f$
Energía en roca	$Q_r = A \cdot h \cdot (\rho_{hor} \cdot C_r \cdot (1 - \phi) \cdot (T_i - T_a))$
Energía en fluidos	$Q_f = A \cdot h \cdot (\rho_{of} \cdot C_f \cdot \phi \cdot (T_i - T_a))$
Potencia de la planta	$P = (Q_t \cdot R_f \cdot C_e) / (P_f \cdot t)$

Parámetros del Campo Geotérmico:				std
Calor total	Qt	3.22901E+15	kJ	
Calor almacenado en la roca	Qr	3.17979E+15	kJ	
Calor almacenado en el fluido	Qf	4.92191E+13	kJ	
Area	A	5.385	km ²	
Espesor del reservorio	h	600	m	
Calor específico de la roca	Cr	0.9	kJ/kg deg(C)	
Calor específico del fluido	Cf	4.2	kJ/kg deg(C)	
Porosidad de la roca	phi	0.1		
Temperatura media del reservorio.	Ti	120	deg(C)	20
Temperatura de abandono del reservorio	Ta	75	deg(C)	5
Densidad de la roca	rho _r	2700	kg/m ³	
Densidad del fluido	rho _f	806	kg/m ³	25
Parámetros de la Planta Geotérmica:				
Potencial geotermico	P	68.2141	MWe	
Factor de recuperación de calor	Rf	0.15	adim	
Eficiencia de conversión	Ce	0.1	adim	
Factor de Planta	P _f	0.9	adim	
Tiempo	t	25	years	

Fuente: Propia

Punto N° 04: Temperatura de 88°C

**TABLA N° 5.4
CÁLCULO DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO-IV**

Ecuaciones de energía:

Energía en roca y fluido	$Q_t = Q_r + Q_f$
Energía en roca	$Q_r = A \cdot h \cdot (\rho_{hor} \cdot C_r \cdot (1 - \phi) \cdot (T_i - T_a))$
Energía en fluidos	$Q_f = A \cdot h \cdot (\rho_{hof} \cdot C_f \cdot \phi \cdot (T_i - T_a))$
Potencia de la planta	$P = (Q_t \cdot R_f \cdot C_e) / (P_f \cdot t)$

Parámetros del Campo Geotérmico:				std
Calor total	Qt	2.29618E+15	kJ	
Calor almacenado en la roca	Qr	2.26118E+15	kJ	
Calor almacenado en el fluido	Qf	3.50003E+13	kJ	
Area	A	5.385	km ²	
Espesor del reservorio	h	600	m	
Calor específico de la roca	Cr	0.9	kJ/kg deg(C)	
Calor específico del fluido	Cf	4.2	kJ/kg deg(C)	
Porosidad de la roca	phi	0.1		
Temperatura media del reservorio.	Ti	120	deg(C)	20
Temperatura de abandono del reservorio	Ta	88	deg(C)	5
Densidad de la roca	rho _r	2700	kg/m ³	
Densidad del fluido	rho _f	806	kg/m ³	25
Parámetros de la Planta Geotérmica:				
Potencial geotermico	P	48.5078	MWe	
Factor de recuperación de calor	Rf	0.15	adim	
Eficiencia de conversión	Ce	0.1	adim	
Factor de Planta	P _f	0.9	adim	
Tiempo	t	25	years	

Fuente: Propia

Punto N° 05: Temperatura de 96 °C

TABLA N° 5.5
CÁLCULO DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO-V

Ecuaciones de energía:

Energía en roca y fluido	$Q_t = Q_r + Q_f$
Energía en roca	$Q_r = A \cdot h \cdot (\rho_{hor} \cdot C_r \cdot (1 - \phi) \cdot (T_i - T_a))$
Energía en fluidos	$Q_f = A \cdot h \cdot (\rho_{of} \cdot C_f \cdot \phi \cdot (T_i - T_a))$
Potencia de la planta	$P = (Q_t \cdot R_f \cdot C_e) / (P_f \cdot t)$

Parámetros del Campo Geotérmico:				std
Calor total	Qt	1.72214E+15	kJ	
Calor almacenado en la roca	Qr	1.69589E+15	kJ	
Calor almacenado en el fluido	Qf	2.62502E+13	kJ	
Area	A	5.385	km ²	
Espesor del reservorio	h	600	m	
Calor específico de la roca	Cr	0.9	kJ/kg deg(C)	
Calor específico del fluido	Cf	4.2	kJ/kg deg(C)	
Porosidad de la roca	phi	0.1		
Temperatura media del reservorio.	Ti	120	deg(C)	20
Temperatura de abandono del reservorio	Ta	96	deg(C)	5
Densidad de la roca	rho _r	2700	kg/m ³	
Densidad del fluido	rho _f	806	kg/m ³	25
Parámetros de la Planta Geotérmica:				
Potencial geotermico	P	36.3808	MWe	
Factor de recuperación de calor	Rf	0.15	adim	
Eficiencia de conversión	Ce	0.1	adim	
Factor de Planta	P _f	0.9	adim	
Tiempo	t	25	years	

Fuente: Propia

Punto N° 06: Temperatura de 91 °C

TABLA N° 5.6
CÁLCULO DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO-VI

Ecuaciones de energía:

Energía en roca y fluido	$Q_t = Q_r + Q_f$
Energía en roca	$Q_r = A \cdot h \cdot (\rho_{hor} \cdot C_r \cdot (1 - \phi) \cdot (T_i - T_a))$
Energía en fluidos	$Q_f = A \cdot h \cdot (\rho_{hof} \cdot C_f \cdot \phi \cdot (T_i - T_a))$
Potencia de la planta	$P = (Q_t \cdot R_f \cdot C_e) / (P_f \cdot t)$

Parámetros del Campo Geotérmico:				std
Calor total	Qt	2.08092E+15	kJ	
Calor almacenado en la roca	Qr	2.0492E+15	kJ	
Calor almacenado en el fluido	Qf	3.1719E+13	kJ	
Area	A	5.385	km ²	
Espesor del reservorio	h	600	m	
Calor específico de la roca	Cr	0.9	kJ/kg deg(C)	
Calor específico del fluido	Cf	4.2	kJ/kg deg(C)	
Porosidad de la roca	phi	0.1		
Temperatura media del reservorio.	Ti	120	deg(C)	20
Temperatura de abandono del reservorio	Ta	91	deg(C)	5
Densidad de la roca	rho _r	2700	kg/m ³	
Densidad del fluido	rho _f	806	kg/m ³	25
Parámetros de la Planta Geotérmica:				
Potencial geotermico	P	43.9602	MWe	
Factor de recuperación de calor	Rf	0.15	adim	
Eficiencia de conversión	Ce	0.1	adim	
Factor de Planta	P _f	0.9	adim	
Tiempo	t	25	years	

Fuente: Propia

Considerando un promedio de los diferentes puntos del cerro Pinaya se tomó que la temperatura promedio de 76°C

**TABLA N° 5.7
CÁLCULO DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO-VII**

Ecuaciones de energía:

Energía en roca y fluido	$Q_t = Q_r + Q_f$
Energía en roca	$Q_r = A \cdot h \cdot (\rho_{hor} \cdot C_r \cdot (1 - \phi) \cdot (T_i - T_a))$
Energía en fluidos	$Q_f = A \cdot h \cdot (\rho_{hof} \cdot C_f \cdot \phi \cdot (T_i - T_a))$
Potencia de la planta	$P = (Q_t \cdot R_f \cdot C_e) / (P_f \cdot t)$

Parámetros del Campo Geotérmico:				std
Calor total	Qt	3.15725E+15	kJ	
Calor almacenado en la roca	Qr	3.10913E+15	kJ	
Calor almacenado en el fluido	Qf	4.81254E+13	kJ	
Area	A	5.385	km ²	
Espesor del reservorio	h	600	m	
Calor específico de la roca	Cr	0.9	kJ/kg deg(C)	
Calor específico del fluido	Cf	4.2	kJ/kg deg(C)	
Porosidad de la roca	phi	0.1		
Temperatura media del reservorio.	Ti	120	deg(C)	20
Temperatura de abandono del reservorio	Ta	76	deg(C)	5
Densidad de la roca	rho _r	2700	kg/m ³	
Densidad del fluido	rho _f	806	kg/m ³	25
Parámetros de la Planta Geotérmica:				
Potencial geotermico	P	66.6982	MWe	
Factor de recuperación de calor	Rf	0.15	adim	
Eficiencia de conversión	Ce	0.1	adim	
Factor de Planta	P _f	0.9	adim	
Tiempo	t	25	years	

Fuente: Propia

CAPITULO VI

6. DISCUSION DE RESULTADOS

6.1 Contratación de hipótesis con los resultados

De acuerdo a las hipótesis presentadas se considera lo siguiente como conclusión de:

- Planteando una metodología apropiada se logró una adecuada estimación con un modelo conceptual del yacimiento y tener un aceptable nivel de confianza en las estimaciones del potencial disponible en el reservorio

SI ES ACEPTABLE, porque se realizó diferentes evaluaciones preliminares sobre el yacimiento de Pinaya, comparando los distintos métodos existentes y dados la documentación recolectada se confirmó que la confiabilidad del método de análisis volumétrico es la más asertiva.

- Aplicando criterios técnicos de evaluación del yacimiento se obtienen un gran margen de seguridad y se logró el potencial energético que se tiene en el yacimiento de la central termoeléctrica en la región Puno.

SI ES ACEPTABLE, porque se realizó un estudio más específico sobre la generación de energía geotérmica, además se recolecto datos y finalmente mediante los parámetros del campo se logró una estimación, y determino que sus condiciones de calor almacenado en la roca y fluidos, porosidad de la roca temperatura media del reservorio, densidad de la roca y el fluido, coincidían con las características químicas de los fluidos contenidos en el reservorio y con ello, se conformó el modelo conceptual del yacimiento utilizando el método antes mencionado. Se tuvo el apoyo de Tablas de estudios anteriores por investigadores como fue el caso de la Ingeniería Cruz Paucara, Vicentina. KOJI, Matsuda. Estudio Geoquímico de las fuentes termales de la zona geotermal de Pinaya, Santa Lucia. Vol.1: 1 a 5.

6.2 Contrastación de resultados con otros estudios similares.

- **Valores de la energía geotérmica**

- **Valor de la geotermia como una fuente de energía altamente confiable**

En todas las energías renovables, una de las características de la energía eléctrica generada en función de recursos geotérmicos es el alto factor de utilización y la estabilidad del suministro a la red día y noche y durante todo el año en Perú, por lo que la geotermia es una fuente de suministro muy confiable véase la tabla N^a 6.1, en la página “133”).

- **Valor de energía geotérmica como una fuente de energía autóctona**

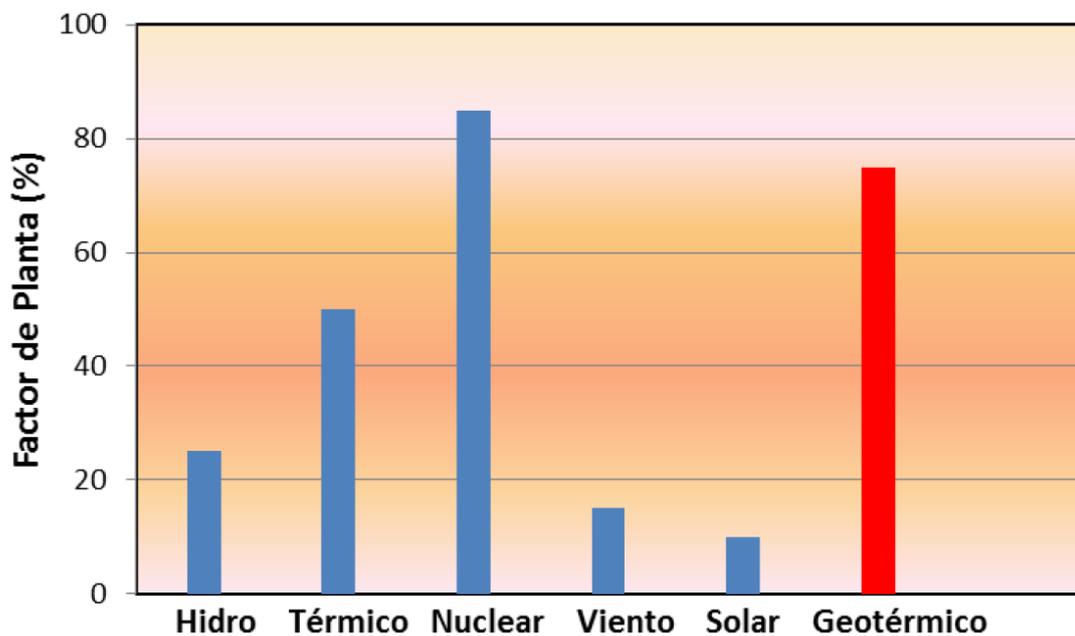
La energía geotérmica es genuinamente una energía autóctona. En el Perú no cuenta con recursos fósiles de energía, la utilización de energía geotérmica se ubica como la oportunidad de disminuir la importación de combustibles; y en el caso de un país que dispone de fuentes fósiles en cantidades exportables, la utilización de la energía geotérmica podría representar un incremento en sus exportaciones o un ahorro de sus reservas para las generaciones futuras. Nuestro País se encuentra en la segunda categoría y asumiendo el objetivo de una planta geotérmica — por ejemplo, de 55 MW—, en términos de energía primaria equivaldría a la explotación de un campo de petróleo de producción anual de 650 mil barriles equivalentes de petróleo, adicionalmente al igual que la energía renovable, esta fuente se podría considerar prácticamente inagotable. Tomando en cuenta que el valor actual de mercado, sería anual de 52 millones de dólares y el ahorro en el espacio de 30 años sería aproximadamente 20 millones de barriles, o sea 1,600 millones de dólares (véase en la figura N^o 6.1).

- **Valor de la energía geotérmica en la estabilidad de la balanza económica**

A pesar de que los avances en la energía geotérmica requieren comparativamente una inversión inicial mayor, esta es independiente del

movimiento en el precio internacional de los combustibles fósiles o de los movimientos del tipo de cambio de moneda nacional. Dado la oportunidad se considera que la geotermia resulta ser una fuente de energía de precio firme, lo que significa permanencia en la ponderación económica del país que la explota.

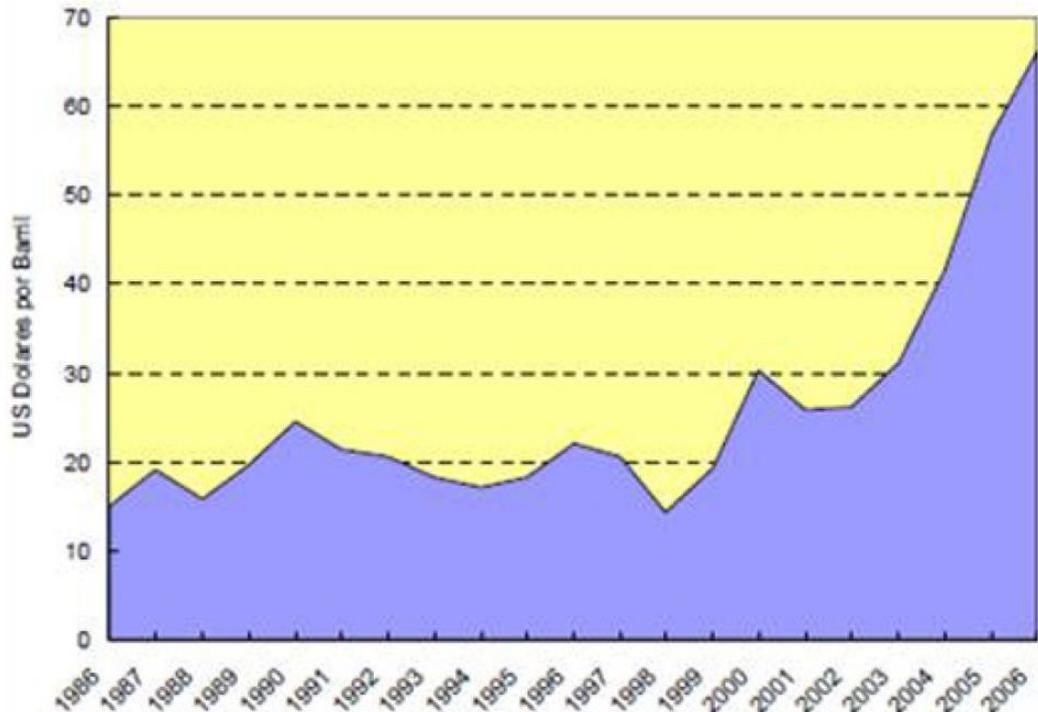
Tabla N° 6.1
FUENTES DE ELECTRICIDAD EN JAPÓN



Fuente: West Jec, 2014

Tabla N° 6.2

DIFERENCIACIÓN DEL PRECIO INTERNACIONAL DEL PETRÓLEO



Fuente: West Jec, 2014

Valor de la energía geotérmica como fuente energética amigable al medioambiente

La transformación de la energía geotérmica en electricidad no implica Métodos de combustión, por lo que no expone contaminantes como SO, NO, partículas de carbón, además su explotación emite pequeños valores de CO₂. La energía geotérmica es partidaria al medioambiente y su explotación apoya al desarrollo de los países sin auxiliar el cambio climático (véase en la Figura N° 6.2).

Valor de la energía geotérmica en el desarrollo local

El elemento “agua” caliente de las fuentes termales, o aquella que se genera como subproducto del manejo de esta energía para generar electricidad, se puede manejar como fuente calorífica en la agricultura, acuicultura o en varias industrias locales.

De modo especial en las zonas frías como aquellas del altiplano andino, y en el caso de las zonas frías y despejadas se puede utilizar para secar cereales y maderas.

El vapor resultante del proceso de generación de electricidad puede ser empleado para el suministro de agua a la agricultura, ganadería o para consumo humano después de extraerle calor en algún proceso industrial. Por lo tanto, la energía geotérmica puede formar el desarrollo energético y fomentar el desarrollo local.

Necesidad de desarrollar la energía geotérmica en Perú

Nuestro país cuenta con riquezas energéticas fósiles (petróleo y gas natural), abundantes recursos hídricos y geotérmicos, entre otros.

Los stocks estimados de petróleo son 930 millones de barriles y la producción anual es 42 millones de barriles (al año 2006), que simbolizan 22 años más de autosuficiencia manteniendo el actual 60 % de cobertura de la demanda interna con el petróleo nacional.

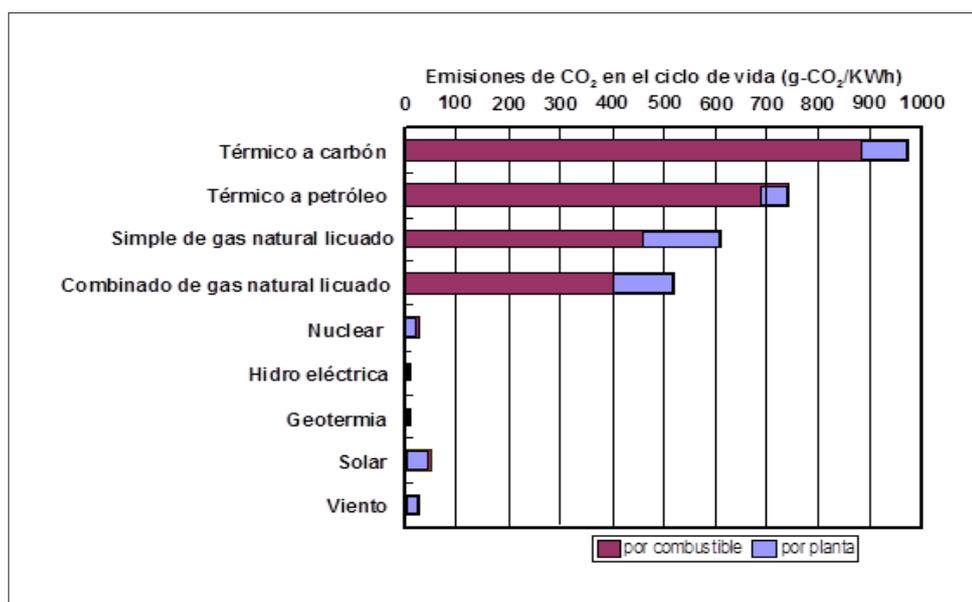
La consideración estimada de gas natural es 87 billones de pies cúbicos y la producción anual es 300,000 millones de pies cúbicos (al año 2014), lo que representa 290 años de autosuficiencia.

La capacidad instalada en el país para el año 2015 fue de 5221 MW. La distribución por fuentes de energía fue 3119 MW (59,7 %) hidráulica, 2101 MW (40,2 %) térmica, 1 MW (0 %) eólico.

La generación térmica se basó en diésel, gas natural, carbón. etc., y la capacidad instalada de las plantas a base de gas natural fue de 960 MW (18,4 %).

La generación total de electricidad del año 2015 fue 23811 GWh, mientras que la generación hidráulica fue 17,567 GWh (73,8 %), la térmica fue 6243 GWh (26,2 %) y la eólica 1 GWh (0 %). La generación térmica con gas natural genera 4100 GWh de electricidad y ocupa 17,2 % de la generación total de electricidad. En el Plan Referencial de Electricidad 2006-2016 se estima que el gas natural ocupará 35 % de la generación de electricidad cuando se haya instalado en el año 2016 la planta térmica a base de gas natural con capacidad de 2010 MW (véase la Figura N°6.3)

Tabla N° 6.3
MANIFESTACIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂)⁹



Fuente: Central Research Institute of Electric Power Industry, Japan; CRIEPI Review 45

⁹ Cruz Paucara, Vicentina. Vargas Rodríguez, Víctor. Antayhua Vera, Yanet. Rivera Porras, Marco. Estudio Geotérmico del Campo Calientes, Boletín N° 48 Serie C:Vol.1: 58 a 63. Agosto 2012

Tabla N°6.4

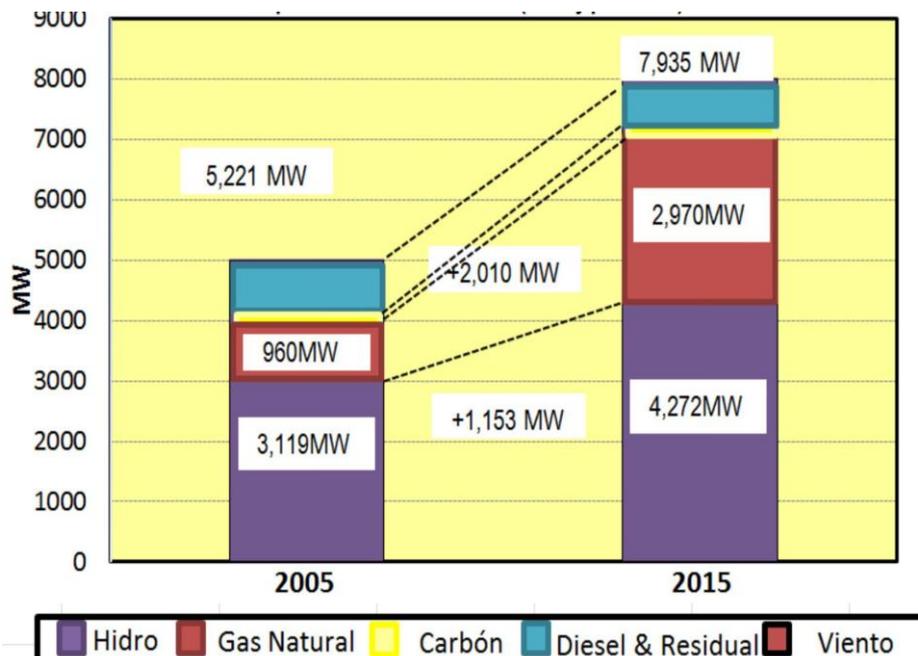
PLAN DE EXPANSIÓN DE LA GENERACIÓN 2006-2015

	Tipo	MW	(%)	GWh	(%)	Comentarios	
Existente	Hidro	3 119	59,7	17 567	73,8	1	Valores de MW y GWh derivados del Reporte Anual 2005 p.2, p.5
	Térmico	2 101	40,2	6 243	26,2	2	"
	Gas Natural	960	18,4	4,1	17,2	3	Valores de MW y GWh derivados del Reporte Anual 2005 p.46
	Carbon	141	2,7	831	3,5	4	"
	Diesel y Residuos	1 000	19,2	1 312	5,5	5	"
	Viento	1	0	1	0	6	Valores de MW y GWh derivados del Reporte Anual 2005 p.2, p.5
	Total	5 221	100	23 811	100	7	"
Adiciones en el caso base (2006-2015)	Hidro	1 153	42,5			8	Los GWh fueron calculados del Plan de Desarrollo 2006-2015 p.2
	Térmico	1 561	57,5			9	"
	Gas Natural	201				10	"
	Carbon					11	"
	Diesel y Residuos	-449				12	Ajustados entre 7 y 21
	Viento					13	"
Total	2 714	100			14	Ajustados entre 7 y 21	
Plan en el caso base (2015)	Hidro	4 272	53,8	27 121	62	15	Los GWh fueron estimados del Plan de Desarrollo 2006-2015 p.2
	Térmico	3 662	46,1	16 622	38	16	"
	Gas Natural	2 970	37,4	15 310	35	17	"
	Carbon	141	1,8	803	1,8	18	"
	Diesel y Residuos	551	6,9	509	1,2	19	"
	Viento	1	0	1	0	20	"
	Total	7 935	100	43 744	100	21	7,935 MW=6.199MW x 1.28 (margen de reserva)

Fuente: MINEM, 2016

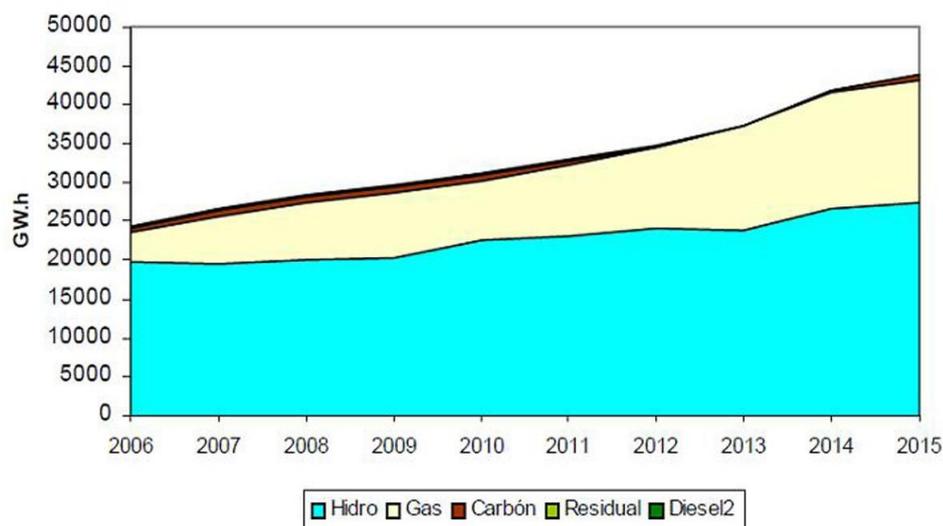
Tabla N° 6.5

MEZCLA DE LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD



Fuente: MINEM, 2016

Tabla N° 6.6
ESTRUCTURA DE LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD



Fuente: MINEM, 2016

La insuficiencia de desarrollar la energía geotérmica en nuestro País procede un inicio de la necesidad de elevar la autosuficiencia de energía. El Perú tiene abundantes recursos energéticos. Sin embargo, mientras la producción doméstica de energía va disminuyendo por la reducción de la producción de petróleo, la importación de la energía está desarrollando por el incremento de la demanda interna. Por esta razón, la tasa de autosuficiencia de energía, que excedía el 100 % en el año 2004, tiende a disminuir consecuentemente estos años. El año 2014 era menos de 70 % y la tendencia a la dependencia de la energía importada es cada vez más evidente (véase la tabla N° 6.7 en la página 139).

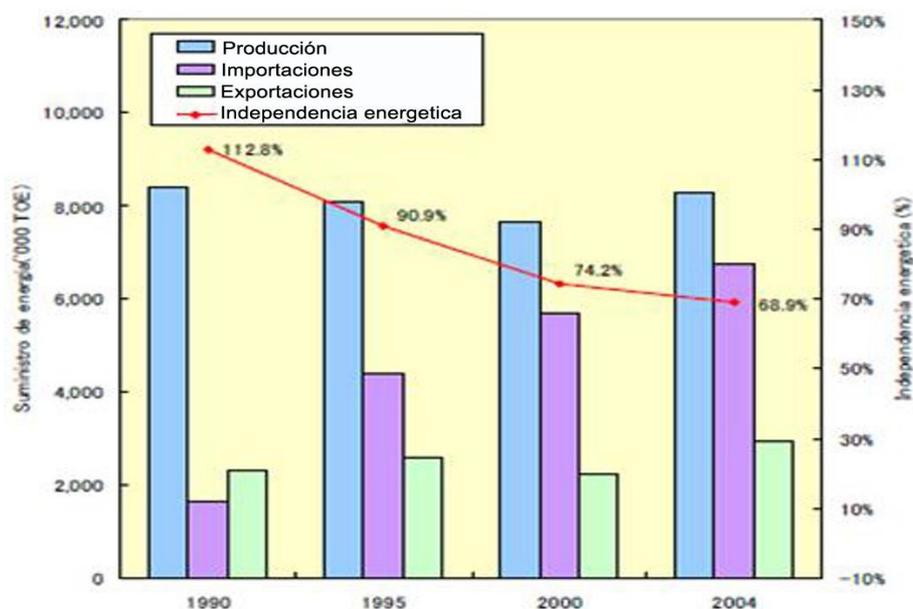
Para asegurar un abastecimiento estable de energía, es indispensable elevar la tasa de autosuficiencia de energía. Sin embargo, en caso del petróleo doméstico, se estima que solo será posible la extracción durante 22 años más si se mantiene la tasa de producción actual.

Tabla N°6.7
ABASTECIMIENTO DE ENERGÍA Y TASA DE AUTOSUFICIENCIA

(Unidad: '000 TOE)				
Suministro de energía	1990	1995	2000	2004
Producción (a)	8 422	8 081	7 655	8 266
(Desglose Carbón)	55	98	8	15
Petróleo	6 929	6 123	5 578	4 698
Gas	537	675	679	867
Electricidad (*1)	901	1 185	1 390	2 686
Importaciones	1 669	4 386	5 703	6 744
Exportaciones	2 312	2 587	2 246	2 933
Almacenamiento	-310	-990	-799	-87
Total de suministro de energía primaria	7 469	8 890	10 313	11 990
Independencia energética (a)/(b)	112,80%	90,90%	74,20%	68,90%

Fuente : <http://unstats.un.org/unsd/energy/>
<http://www.iea.org/stats/defs.asp>

Tabla N° 6.8
SUMINISTRO DE ENERGÍA EN PERÚ



Fuente : <http://unstats.un.org/unsd/energy/>
<http://www.iea.org/stats/defs.asp>

En caso del gas natural, el consumo es todavía bajo, pero se prevé un incremento de su uso como el combustible para generación de electricidad y también por el incremento de la demanda una vez que entre en operación la planta de gas licuado para exportación. Tomando en cuenta estos factores se estima una autosuficiencia de solo 27 años (véase la tabla N^a 6.3, en la página “136”). En esta situación, es urgente el desarrollo de energía doméstica y renovable para aumentar la tasa de autosuficiencia de energía.

Otra justificación para que nuestro país emprenda el progreso de sus recursos geotérmicos es la ayuda que este generaría al Estado al poder destinar el gas natural que está utilizando actualmente para la generación de la electricidad a otras aplicaciones como la exportación o el ahorro de combustible para aumentar el periodo de autosuficiencia.

Si se llegase a construir una planta geotérmica para sustituir el uso de gas natural para la generación de electricidad, la marcha económica de la planta térmica dependería inconmensurable del costo de combustible anualmente, aunque el costo de inversión fuera pequeño.

La planta geotérmica, para la cual el costo inicial es mucho mayor, no requiere de combustible, por lo que los costos de operación y mantenimiento son mucho menores.

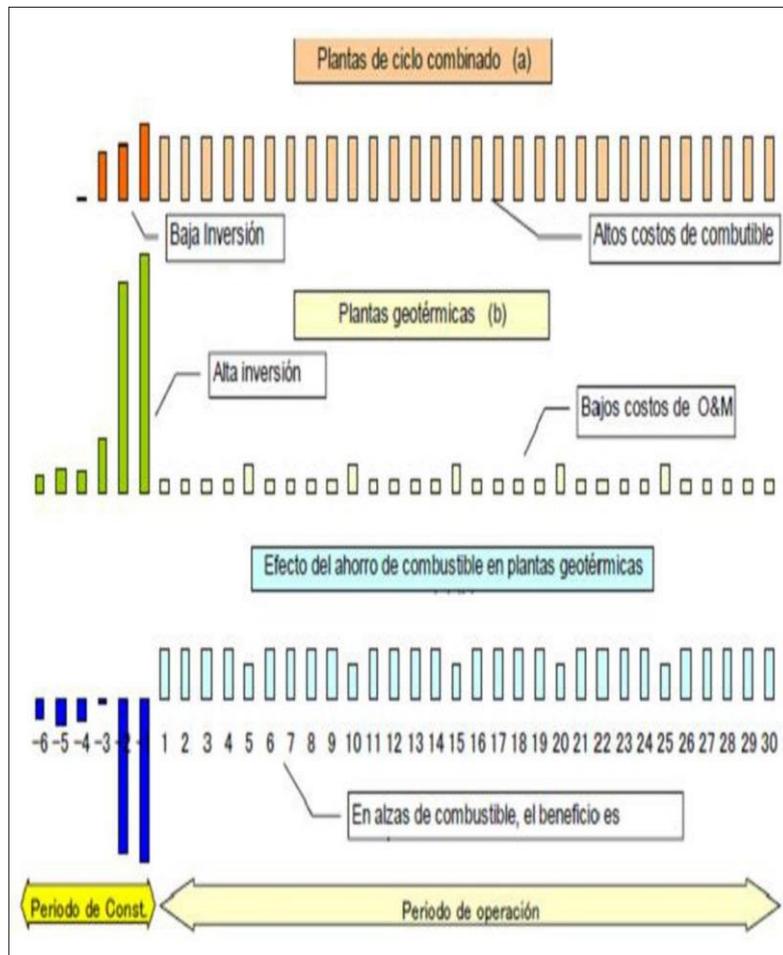
En nuestra área de la geotermia, su elevado costo de inversión incluye el prepago de combustible, pero este no depende de las variaciones del precio internacional en el mercado (véase la tabla N^a 6.9 en la pág.141), aunque en la fase de inversión inicial haya diferencias a favor de la planta térmica, en el caso de la geotermia se puede ahorrar el costo del combustible en cada año de operación. Aún más, si el gas natural no se quema para la generación de electricidad, puede implicar en la estrategia de independencia energética al ahorrarlo o impactar positivamente la balanza comercial y la economía nacional al exportarlo al precio internacional del mercado (West Jec, 2015).

TABLA N°6.9
AUTOSUFICIENCIA DE PETRÓLEO Y DE GAS

	Reservas probadas (R)	Producción (2004) (P)	Producción proyectada (2015) (P')	Autosuficiencia años (R)/(P) o (P')
Carbón	930 millones de barriles	42 millones de barriles/año		22,1 Años
Gas Natural	8,7 trillones de p.c	30 billones p.c/año	324 billones p.c/año	26,9 Años
Electricidad			116 billones p.c/año (*1)	
LNG			208 billones p.c./año (*2)	
(Nota)	*1: Basado en 9.0 millón m3/día en el caso base del Plan de desarrollo Eléctrico (2006-2015) *2: Estimado para una producción de 4.45 millones LNG. (4.45 millón ton x 1.33 m3/kg)			

Fuente: Base del Plan de desarrollo Eléctrico (2006-2015)

FIGURA N° 6.10
COMPARACIÓN DE LA GENERACIÓN TÉRMICA Y GEOTÉRMICA



Fuente: West Jec, 2014

CONCLUSIONES

- Plantear una metodología nos permitió lograr una adecuada estimación con un modelo conceptual del yacimiento propuesta en esta tesis (Calculo de calor almacenado y potencial de generación geotérmica usando método volumétrico y valores de parámetros concretos), y resulta más completa que las otras técnicas desarrolladas.
- Aplicar criterios para la generación del potencial energético se obtuvo gracias a los parámetros recogidos in situ ya que además de incorporar un mayor número de parámetros termodinámicos, así como los parámetros iguales del yacimiento para cada modelo, lo que nos permite suponer que es un pronóstico aceptable y tener un aceptable nivel de confianza en las estimaciones del potencial disponible en el reservorio

La creación de un proyecto geotérmico es muy compleja, por tanto, se requerirá de estudios a detalle que permitan conocer las características de la zona en cuestión y de esta manera la toma de decisiones será acertada.

Por otra parte, también se deberán considerar los aspectos medioambientales y sociales que pudieran afectar de una u otra forma las poblaciones de la zona.

RECOMENDACIONES

Epistemológicamente para el futuro es preciso encomendar se siga investigando sobre la calidad de la energía eléctrica que utilizamos para mejorar la calidad de vida de los usuarios.

Las recomendaciones se presentan en dos áreas:

- Para lograr una adecuada estimación es necesario contar mejores modelos conceptual del yacimiento que se ajusten más a los diferentes procedimientos , para tal efecto se podría interpretar mayor información geológica, geofísica y geoquímica de la zona, a fin de delimitar el área, así como también determinar sus condiciones de presión y temperatura en el subsuelo, conocer las características químicas de los fluidos contenidos en el reservorio y con ello, conformar otro modelo más preciso conceptual del yacimiento.
- Se recomienda tomar más datos, con suministros de equipos con nueva tecnología y así poder registrar los datos de manera más eficientes, además de poder considerar nuevos software desarrollo para la gestión de un sistema integrado que nos permita mantener los registros actualizados colocados in situ y finalmente poder optimizar la cantidad de megavatios de energía geotérmica que se puede obtener en el diseño de la central.
- Finalmente se podrían tener un aceptable nivel de confianza en las estimaciones del potencial disponible en el reservorio, utilizando los diferentes modelos de evaluación del yacimiento, cada una con distintas simplificaciones y diferente grado de complejidad, lo que da un gran margen de seguridad en los resultados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Libros

- Hernandez Sampieri, R. (1998). Metodología de la investigación (2a. Edición) México:McGraw-Hill.
- Quijano, J.L.(2007).Manual de Geotermia. (Cuarta Edición) México: Mc Graw-Hill.
- Hochstein, M.(1990). Clasificación y evaluación de los recursos geotérmicos. Nueva York:[s.n]
- Hiriart LE, B.G. (1985). Comportamiento termodinámico de yacimientos geotérmicos simplificados.California:Standford.
- Nicholson, K.(1993). Geothermal fluids: chemistry and exploration techniques. (Primera Edición) Inglaterra: Springer verlog.
- Giggenbach Werner, F.(1988). Geothermal solute equilibria; derivation of Na-K-Ma-Ca geoindicators. Geochim. Cosmochim.

Artículos de Revistas

- Cruz Paucara, V., Vargas Rodríguez, V., Cacya Dueñas, L. (2014) Geodinámica e ingeniería geológica–Caracterización y evaluación del potencial geotérmico de la región Moquegua.; Boletín N° 58:10-14.
- Guanocunga, B. (1994). Guía para Estudios de Reconocimiento y Prefactibilidad Geotérmica. Vol. 1: 230.
- CRUZ PAUCCARA, V., KOJI, M.(2014) Estudio Geoquímico de las fuentes termales de la zona geotermal de Pinaya, Santa Lucia.Vol.1: 1 a 5.

Publicaciones periódicas en línea

Artículo de revista solo en internet.

- Wyss R.(2016) Tipología de sistemas geotérmicos .Recuperado el 28 de marzo del 2016, de <https://geoswiss.wordpress.com/energia-geotermica-profunda-en-suiza-2/tipologia-de-sistemas-geotermicos/sondas-geotermicas-verticales>.
- (2016) CONSORCIO ENERGÉTICO CORPOEMA.pdf. Formulación de un Plan de Desarrollo par alas Fuentes No Convencionales de Energía en Colombia Recuperado el 30 de febrero del 2016, de http://www.upme.gov.co/Sigic/DocumentosF/Vol_2_Diagnostico_FNCE.

Publicaciones de Asociaciones en páginas web:

- Consejo Mundial de la Energía.
www.worldenergy.org/wec-geis/focus/renew/
- Asociación Internacional de Geotermia.
www.geothermal-energy.org
- United Nations University Geothermal Training Programme
www.os.is/unugtp
- European Deep Geothermal Energy Programme (UE).
www.soultz.net
- Consejo Europeo de Energía Geotérmica (UE).
www.geothermie.de

ANEXO N°01

• Matriz de Consistencia

TÍTULO: "MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO GEOTÉRMICO PARA LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD MEDIANTE LA INSTALACIÓN DE UNA CENTRAL TERMOELÉCTRICA EN LA ZONA PINAYA REGIÓN DE PUNO"				
PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	MÉTODOS
<p>Problema General</p> <p>¿De qué manera se podría realizar el modelamiento y simulación del potencial energético geotérmico, para la generación de electricidad mediante la instalación de una central termoeléctrica en la región de Puno-Pinaya?</p>	<p>Objetivo General</p> <p>Realizar una modelación y simulación del potencial energético geotérmico para la generación de energía eléctrica y lograr la instalación de una central electrotermia en la región Puno.</p>	<p>Hipótesis General</p> <p>Realizando el estudio y simulación del potencial energético geotérmico para la generación de energía eléctrica se logrará la instalación de la central termoeléctrica en la región Puno.</p>	<p>Variable Independiente: X</p> <p>Modelamiento del Potencial Energético Geotérmico</p> <p>Simulación del Potencial Energético Geotérmico</p> <p>Variable: Y (dependiente)</p> <p>Central Termoeléctrica</p>	<p>Plantear una metodología factible para la creación de un proyecto geotérmico</p> <p>Mediante la aplicación de las distintas técnicas de evaluación del yacimiento:</p> <p>Calor Remanente GEOSCOST Análisis Volumétrico Modelo Termodinámico Modelo USGS con simulación de Montecarlo Descompresión gradual</p> <p>Aplicar los criterios para lograr obtener el potencial energético en el yacimiento de la central termoeléctrica en la región Puno, mediante los parámetros del campo:</p> <p>Calor almacenado en la roca y fluidos Porosidad de la roca Temperatura media del reservorio Temperatura del reservorio Densidad de la roca y el fluido</p>
<p>Problema Específico N° 1</p> <p>¿Qué criterios se pueden aplicar en el modelo del potencial energético geotérmico, para la generación de electricidad mediante la instalación de una central termoeléctrica en la región de Puno-Pinaya?</p>	<p>Objetivo Específico N° 1</p> <p>Plantear una metodología para determinar el potencial apropiada y lograr una adecuada estimación con un modelo conceptual del yacimiento para tener un aceptable nivel de confianza en las estimaciones del potencial disponible en el reservorio</p>	<p>Hipótesis Específica N° 1</p> <p>Planteando una metodología para determinar el potencial energético se logrará una adecuada estimación con un modelo conceptual del yacimiento y tener un aceptable nivel de confianza en las estimaciones del potencial disponible en el reservorio.</p>		
<p>Problema Específico N° 2</p> <p>¿Qué modelación es el apropiado para plantear el potencial energético geotérmico, para la generación de electricidad mediante la instalación de una central termoeléctrica en la región de Puno-Pinaya?</p>	<p>Objetivo Específico N° 2</p> <p>Aplicar criterios técnicos de evaluación del yacimiento y obtener una gran margen de seguridad y lograr la potencia eléctrica que se tiene en el yacimiento de la central termoeléctrica en la región Puno.</p>	<p>Hipótesis Específica N° 2</p> <p>Aplicando criterios técnicos de evaluación del yacimiento se obtendrá un gran margen de seguridad y se logrará determinar la potencia eléctrica que se tiene en el yacimiento de la central termoeléctrica en la región Puno.</p>		

ANEXO N°02

Imagen N° 01: Fórmula para encontrar el potencial geotérmico

Pinaya [Modo de compatibilidad] - Excel (Error de activación de productos)

Archivo Inicio Insertar Diseño de página Fórmulas Datos Revisar Vista Desarrollador Equipo ¿Qué desea hacer? Iniciar sesión Compartir

Cortar Copiar Pegar Copiar formato Fuente Alineación Número Estilos Celdas

Normal Bueno Incorrecto Neutral Cálculo Celda de co... Celda vinculada Entrada Notas Salida Insertar Eliminar Formato Autosuma Rellenar Ordenar y filtrar Buscar y seleccionar

SUMA =E10*E25*E26/(1000*E27*E28*31557600)

1 A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T

2 **Calculo de calor almacenado y potencial de generación geoelectrica usando metodo volumetrico y valores de parametros ajustados**

3 **Ecuaciones de energía:**

4 Energía en roca y fluido	Qt = Qr + Qf			
5 Energía en roca	Qr = A*h*(rho*Cr*(1-phi)*(Ti-Ta))			
6 Energía en fluidos	Qf = A*h*(rho*Cf*phi*(Ti-Ta))			
7 Potencia de la planta	P = (Qt*R*Ce) / (P_r*t)		7.068411	

8

9 **Parámetros del Campo Geotérmico:**

		min	max	std
10 Calor total	Qt		2.16E+15	
11 Calor almacenado en la roca	Qr		2.12E+15	
12 Calor almacenado en el fluido	Qf		3.28E+13	
13 Área	A		5.385	
14 Espesor del reservorio	h		600	
15 Calor específico de la roca	Cr		0.9	
16 Calor específico del fluido	Cf		4.2	
17 Porosidad de la roca	phi		0.1	
18 Temperatura media del reservorio.	Ti		120	deg(C) 20
19 Temperatura de abandono del reservorio	Ta		90	deg(C) 5
20 Densidad de la roca	rho		2700	kg/m3 PROM
21 Densidad del fluido	rho		806	kg/m3 25

22

23 **Parámetros de la Planta Geotérmica:**

24 Potencial geotermico	P		=E10*E25*E26/(1000*E27*E28*31557600)	
25 Factor de recuperación de calor	Rf		0.15	adim
26 Eficiencia de conversión	Ce		0.1	adim
27 Factor de Planta	P_r		0.9	adim
28 Tiempo	t		25	years

29

30

31

32

33

Potencial Volumetrico

Modificar 115%

Imagen N° 02: Fórmula para encontrar el potencial geotérmico

Pinaya [Modo de compatibilidad] - Excel (Error de activación de productos)

Archivos Inicio Insertar Diseño de página Fórmulas Datos Revisar Vista Desarrollador Equipo ¿Qué desea hacer?

Inicio sesión Compartir

Cortar Copiar Pegar Copiar formato Portapapeles Fuente Alineación Combinación centrar Número Formato condicional Dar formato como tabla Estilos Celdas

SUMA X ✓ ✖ =E11+E12

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33

Calculo de calor almacenado y potencial de generación geoelectrica usando metodo volumetrico y valores de parametros ajustados

Ecuaciones de energía:

Energía en roca y fluido	$Q_t = Q_r + Q_f$	
Energía en roca	$Q_r = A \cdot h \cdot (\rho_r \cdot C_r \cdot (1 - \phi)) \cdot (T_i - T_a)$	
Energía en fluidos	$Q_f = A \cdot h \cdot (\rho_f \cdot C_f \cdot \phi) \cdot (T_i - T_a)$	
Potencia de la planta	$P = (Q_t \cdot R_f \cdot C_e) / (P_r \cdot t)$	7.068411

Parámetros del Campo Geotérmico:

		min	max	std	
Calor total	Q_t	=E11+E12			kJ
Calor almacenado en la roca	Q_r	2.12E+15			kJ
Calor almacenado en el fluido	Q_f	3.28E+13			kJ
Area	A	5.385			km ²
Espesor del reservorio	h	600			m
Calor específico de la roca	C_r	0.9			kJ/kg deg(C)
Calor específico del fluido	C_f	4.2			kJ/kg deg(C)
Porosidad de la roca	ϕ	0.1			
Temperatura media del reservorio	T_i	120			deg(C)
Temperatura de abandono del reservorio	T_a	90			deg(C)
Densidad de la roca	ρ_r	2700			kg/m ³
Densidad del fluido	ρ_f	806			kg/m ³
Parámetros de la Planta Geotérmica:					
Potencial geotermico	P	45.4760			MWe
Factor de recuperación de calor	R_f	0.15			adim
Eficiencia de conversión	C_e	0.1			adim
Factor de Planta	P_r	0.9			adim
Tiempo	t	25			years

T°C

PROM 76

Potencial Volumetrico

Modificar 115%

15:35 27/02/2019

ANEXO N°03

IMAGEN N°01: SOFTWARE LEAPFROG-I ADICIONAL PARA LA SIMULACIÓN PARA GENERACION GEOTERMICA

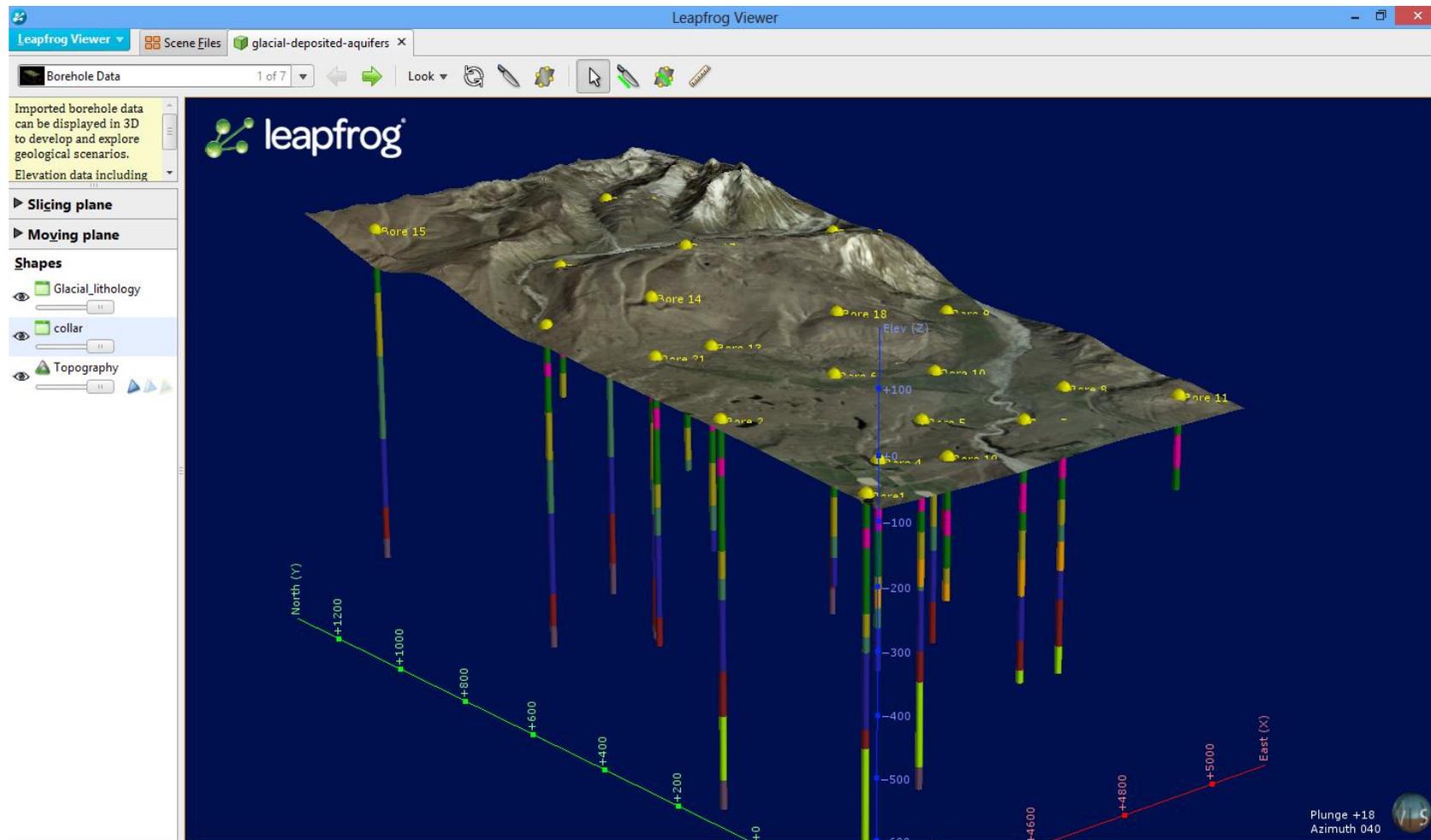


IMAGEN N°02: SOFTWARE LEAPFROG-I ADICIONAL PARA LA SIMULACIÓN PARA GENERACION GEOTERMICA

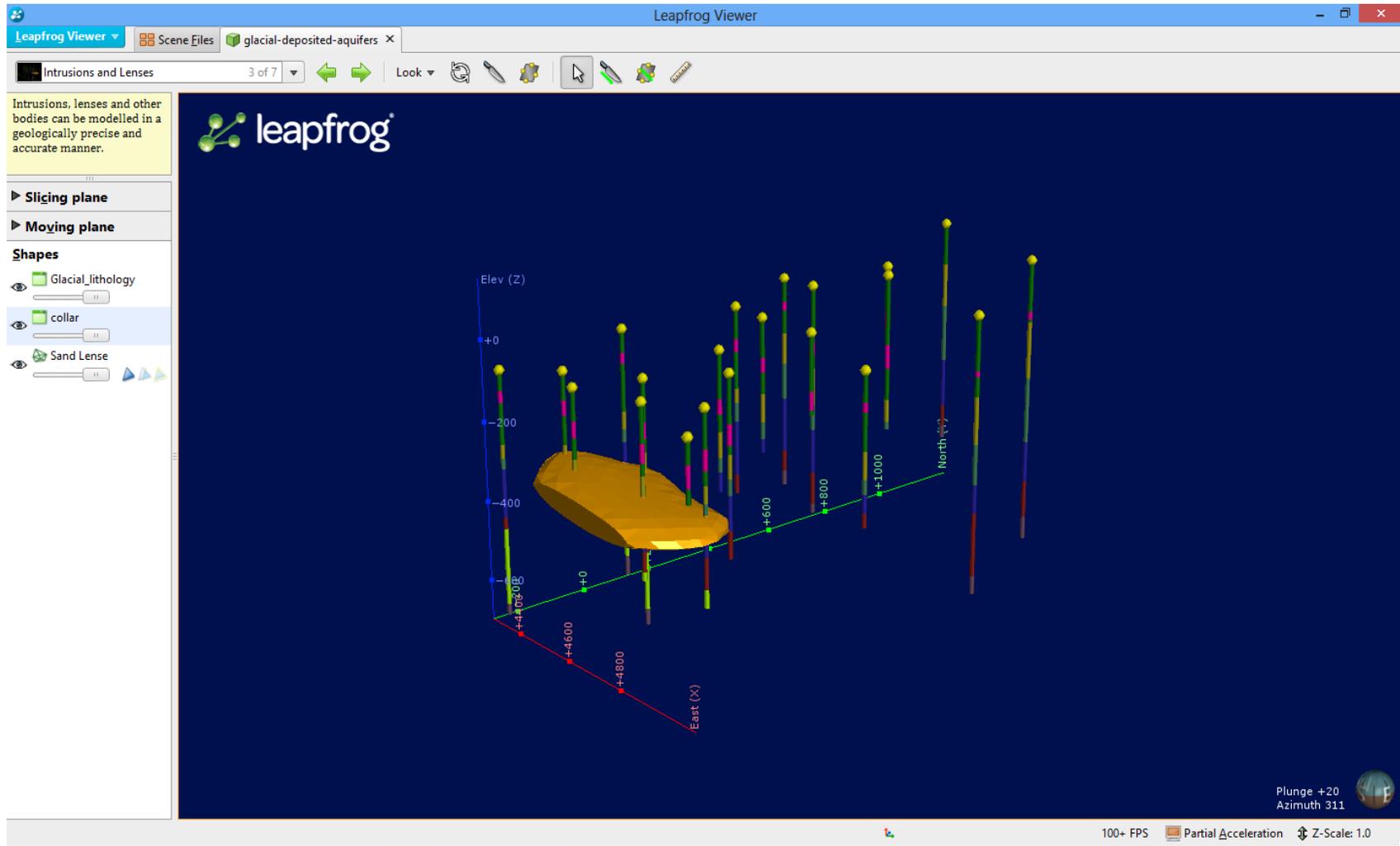


IMAGEN N°03: SOFTWARE LEAPFROG-I ADICIONAL PARA LA SIMULACIÓN PARA GENERACION GEOTERMICA

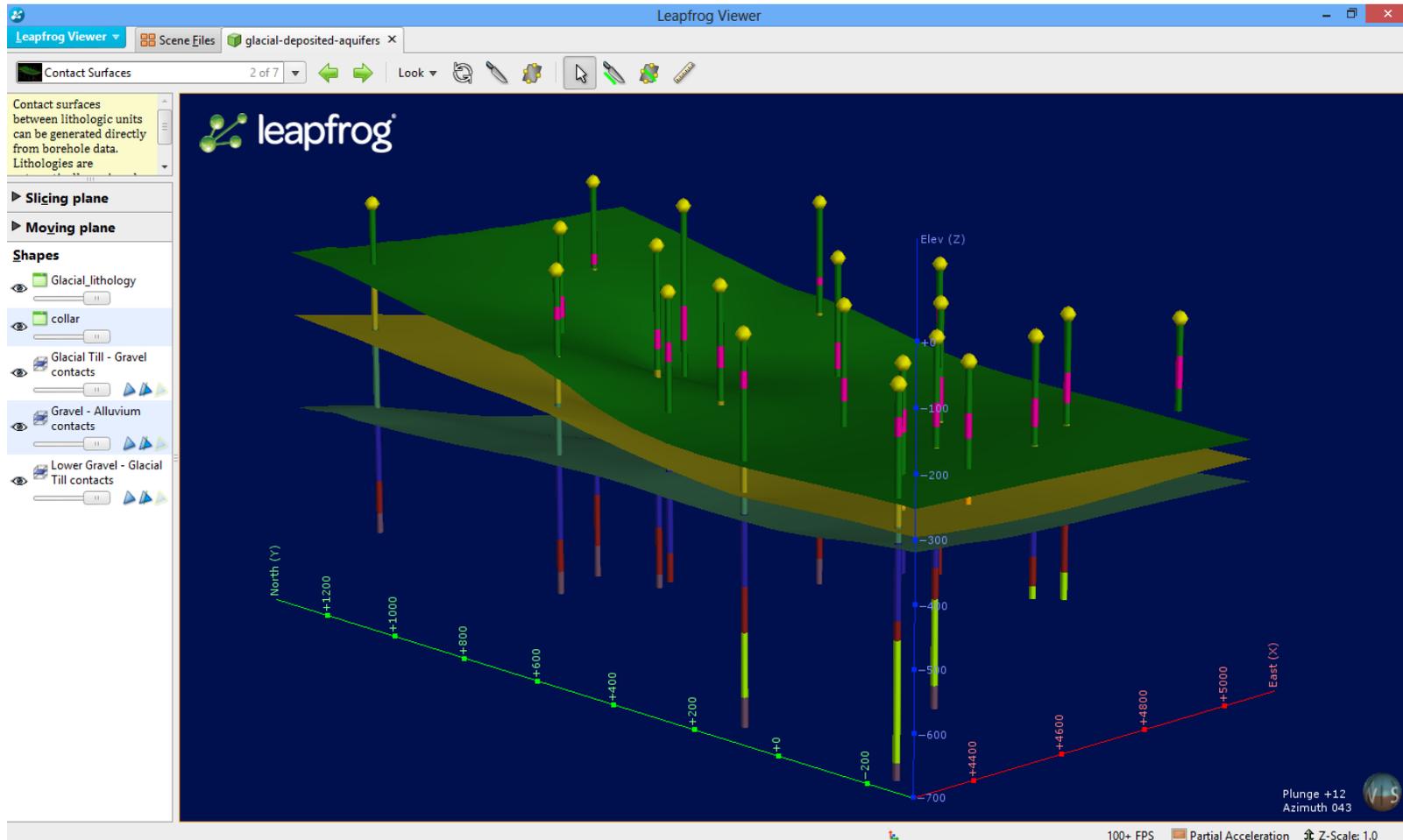


IMAGEN N°04: SOFTWARE LEAPFROG-I ADICIONAL PARA LA SIMULACIÓN PARA GENERACION GEOTERMICA

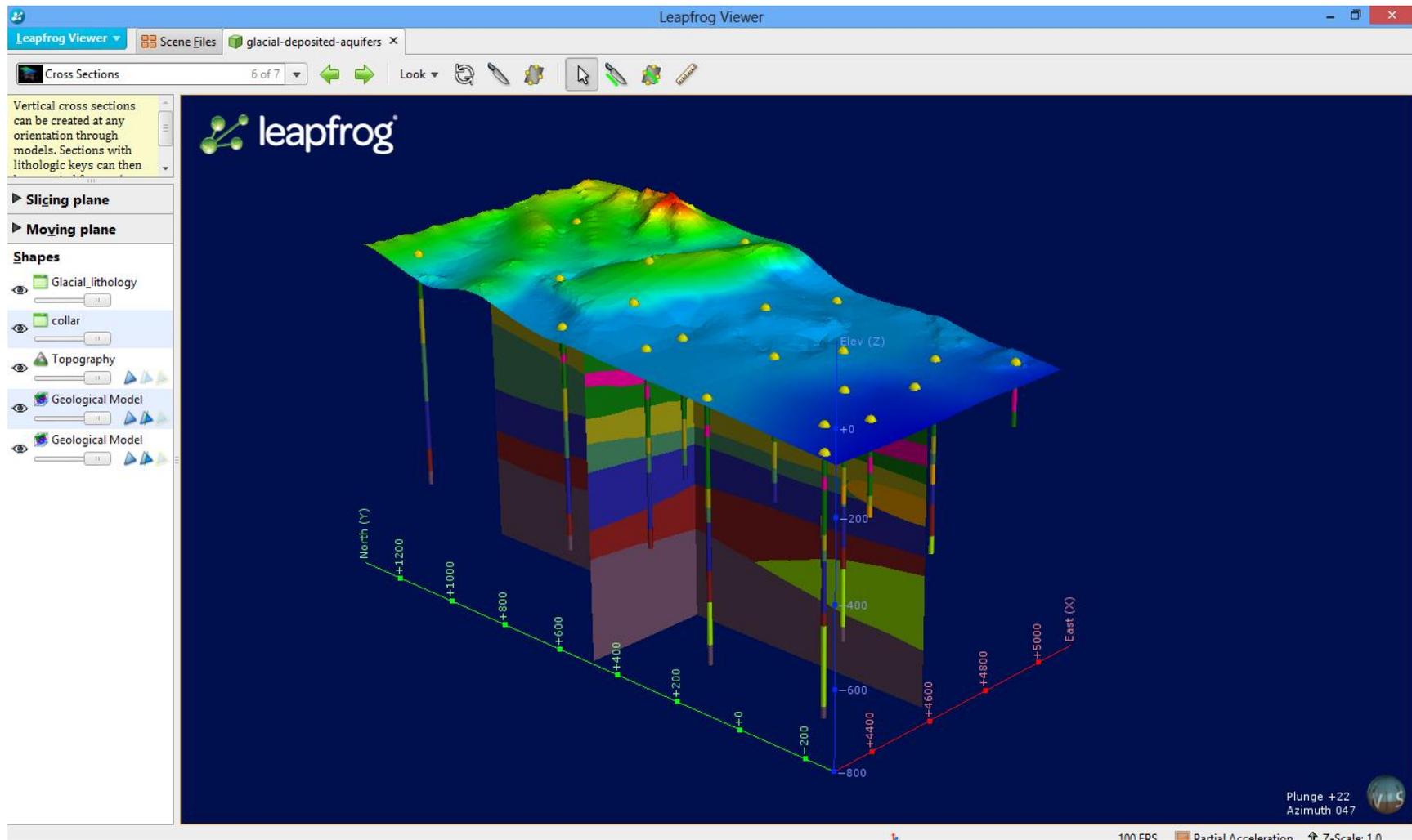
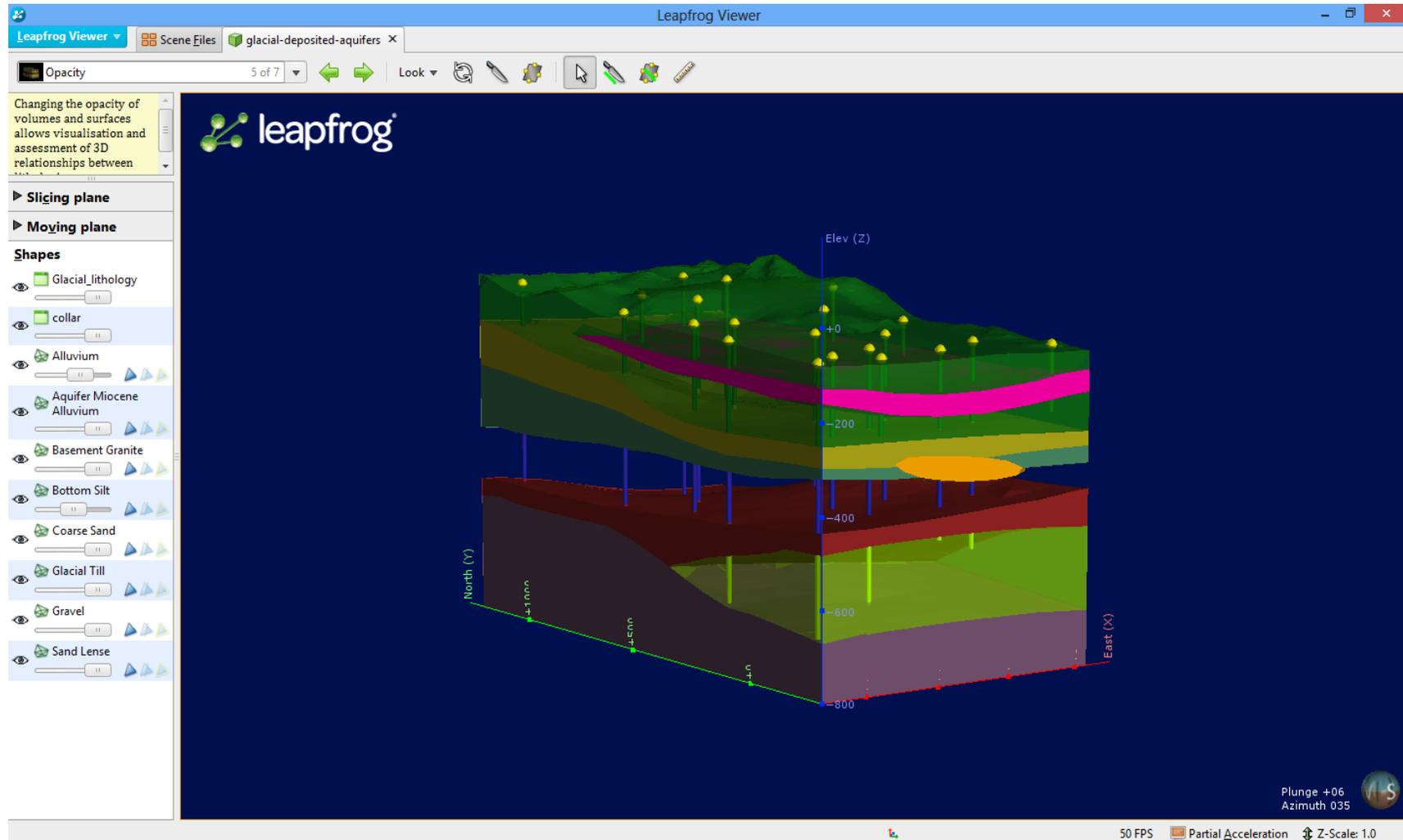


IMAGEN N°05: SOFTWARE LEAPFROG-I ADICIONAL PARA LA SIMULACIÓN PARA GENERACION GEOTERMICA



ANEXO N°04

FOTO N°01 RECOLECCIÓN DE DATOS EN LA ZONA PINAYA REGIÓN PUNO



FOTO N°02 RECOLECCIÓN DE DATOS EN LA ZONA PINAYA REGIÓN PUNO



FOTO N°03 RECOLECCIÓN DE DATOS EN LA ZONA PINAYA REGIÓN PUNO



FOTO N°04 RECOLECCIÓN DE DATOS EN LA ZONA PINAYA REGIÓN PUNO



ANEXO N°05

ESTUDIO GEOQUÍMICO DE LAS FUENTES TERMALES DE LA ZONA GEOTERMAL DE PINAYA, SANTA LUCIA (PUNO).

Vicentina Cruz¹, Koji Matsuda²

¹INGEMMET, Av. Canadá N° 1470, San Borja Lima 41, Perú, Apartado 889 (vcruz@ingemmet.gob.pe, vcruz24@hotmail.com).

²West Japan Engineering Consultants, INC, Space cube Bldg., 2F, 7-11,1-Chome, Haruyoshi Chuo-ku, Fukuoka, Japan, 810-0003 (mazda@wjec.co.jp).

INTRODUCCIÓN

La Zona Geotermal de Pinaya (ZGP) está ubicada en el altiplano de los Andes a 3.5km del centro poblado menor de Pinaya, distrito de Santa Lucia, provincia de Lampa en el Departamento de Puno, a una altitud de 4,400 m.s.n.m. La ZGP se emplaza sobre una amplia explanada y en las laderas de la cordillera de Sillapaca, en la margen oriental del valle al norte de la Laguna Lagunillas (Fig. 1). La ZGP comprende un relieve moderado a suave, con altitudes que oscilan entre los 4,300 a 4,700 msnm, adyacentes a montañas volcánicas. La superficie total donde emergen las aguas geotermales es aproximadamente de 3 a 4 hectáreas, con presencia de afloramientos de sinter y alteración hidrotermal. El clima en invierno es lluvioso y semifrígido, en verano y primavera seco. La frecuencia de heladas supera los 150 días anuales. La temperatura máxima media mensual es poco variable en el año fluctuando alrededor de 13.4 °C. La precipitación varía entre 700 y 1000 mm (www.senamhi.gob.pe). Se observa que la temperatura máxima media mensual es poco variable en el año fluctuando alrededor de 13.4 °C. A la ZGP se puede acceder desde la carretera asfaltada Puno-Arequipa. La superficie está cubierta de tierra suave, la mayor parte del área hay solamente presencia de zonas de pastizales y bofedales (Fig. 2).

Los objetivos del presente estudio, son realizar: (a) una caracterización química e isotópica de las manifestaciones geotérmicas superficiales de la zona de estudio; (b) identificar el origen del agua geotermal utilizando isótopos estables (oxígeno-18 y deuterio); y (c) la estimación de la temperatura del reservorio.

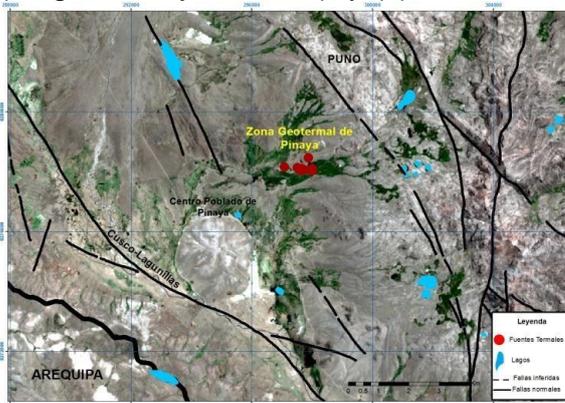


Fig. 1. Mapa de localización de fuentes termales de la ZGP. **Fig. 2.** Vista panorámica de la ZGP.

CONTEXTO GEOLÓGICO

La ZGP se encuentra emplazado en una región de litología variada que incluye afloramientos rocosos de origen marino y continental con sedimentos volcánicos intercalados, cuyas edades van del Jurásico al Cuaternario reciente. La zona es atravesada con sistema de fallas Cusco-Lagunillas de dirección NO-SE (Carlotto, 2013) (Fig. 1) durante los períodos de extensión estructural. Esta estratigrafía ha sido invadido por las intrusiones de composición diorítica y monzoníticos, y posteriormente recubierto por el volcánico Terciario del Grupo Tacaza (McCrea, 2006).

Las rocas en la ZGP es predominante toba félsica con cuarzo, micas y plagioclasas. Además, se observa la presencia de rocas volcánicas lávicas y piroclásticas en la zona, resultado de la actividad eruptiva desarrollada entre 13-10 Ma asociada al Arco Magmático Sillapaca (Aguilar, 2012) de composición andesítica y dacita, algunos de ellos están parcialmente erosionados. En el área, el Grupo

Sillapaca descansa concordante sobre el Grupo Palca, también descansa en discordancia angular sobre el Grupo Tacaza.

Las fuentes termales emergen a nivel superficial en depósitos cuaternarios coluviales con gravas y bloques subangulosas con matriz arenisca y limo. Asimismo, alrededores de estos se observa la presencia de depósitos morrénicos, de fragmentos angulosos a subangulosos, con diámetro variable en matriz, así como la presencia de depósitos de bofedal con intercalación de limos, arenas y niveles orgánicos (Fig. 2).

RESULTADOS

La temperatura de las fuentes termales varía entre 60 hasta 83 °C y el pH entre 6 a 7 con valores de conductividad eléctrica entre 14.8 y 15.98 mS/cm. Las manifestaciones tienen valores de descarga entre 30 y 60 L/min, haciendo un valor total aproximado de todas las descargas de 300 L/min (Tabla 01). Los resultados de la composición química presentan iones mayoritarios de cloruro y sulfato, con valores desde 1610 mg/l a 5508 mg/l y 310 mg/l a 1153 mg/l respectivamente; así como sodio y calcio con concentraciones de 1130 mg/l a 3784 mg/l y 116 mg/l a 366 mg/l respectivamente (Tabla 01).

Tabla 01. Composición química (mg/L) de las manifestaciones geotermales en la ZGP.

Fuente	Código	Temp °C	pH	Cond μ S/cm	Li mg/L	Na mg/L	K mg/L	Ca mg/L	Mg mg/L	Cl mg/L	F mg/L	SO ₄ mg/L	HCO ₃ mg/L	B mg/L	SiO ₂ mg/L	As mg/L	Sr mg/L	¹⁸ O ‰	² H ‰
Río Pinaya (rio arriba)	RPA	4.1	7.17	47	-	3	2	3	1	-	-	6	18	-	31	-	-	-	-
Agua manantial	AGM	9.4	7.02	44	-	3	3	3	1	-	-	7	17	-	27	-	-	-	-
Pinaya I	PIN-I	80.3	6.14	15860	7	3784	225	366	35	5247	3	1044	207	18	86	3	14	-	-
Pinaya II	PIN-II	83.8	6.50	15350	8	3780	219	350	34	5328	3	987	228	18	90	4	15	-	-
Pinaya III	PIN-III	75.5	6.42	14800	7	3513	151	298	26	4996	3	999	205	18	72	3	14	-	-

En el diagrama binario B-Cl (Fig. 5) se observa que la proporción de B/Cl (0.01) es baja, típico de aguas que están interaccionando con rocas subvolcánicas o graníticas, a nivel profundo. En la ZGP se observa afloramientos de roca intrusiva del Eoceno-Oligoceno, asociados a la presencia de Pórfidos- Skarn de Cu-Mo (Au, Zn) y depósitos de Cu-Au-Fe. Por lo que podemos inferir que el reservorio geotérmico se estaría desarrollando sobre y alrededor de un cuerpo intrusivo asociado posiblemente al complejo intrusivo Pinaya. La circulación de fluidos en este entorno posiblemente se estén mezclando entre los fluidos magmáticos altamente salinos, que tienen un tiempo de residencia considerable con los fluidos de origen meteórico de etapas posteriores, las mismas que emergen en superficie favorecido por el sistema de fallas locales y regionales existentes.

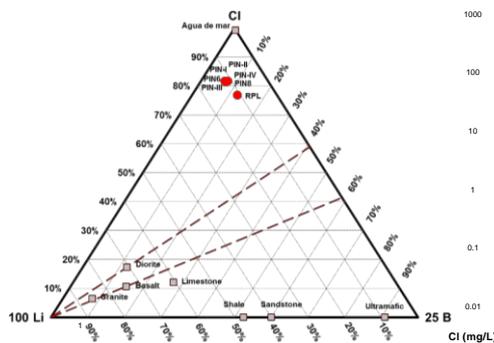


Fig. 4. Diagrama ternario Cl-Li-B. (Shigeno, 1983)

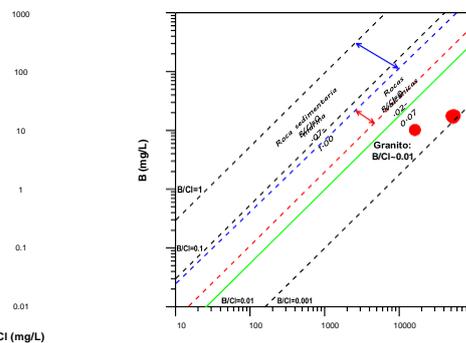


Fig. 5. Diagrama Boro vs Cloruro

GEOINDICADOR DE NA-K- MG

Mediante el diagrama ternario se realizó la evaluación de los datos analíticos de Na, K y Mg (Giggenbach, 1991a) que se muestran en la figura 5, permite observar que las aguas en estudio se ubican en el área de equilibrio químico parcial agua-roca, característico de aguas provenientes de reservorios geotermales. Sin embargo, la temperatura de equilibrio Na-K del reservorio se estima por debajo de 200°C (Figs.6 y 7). Este dato sugiere que en el reservorio se produce una mezcla entre los fluidos geotérmicos con una mayor proporción de agua meteórica, que ingresa desde los alrededores de las rocas intrusivas que afloran en la zona.

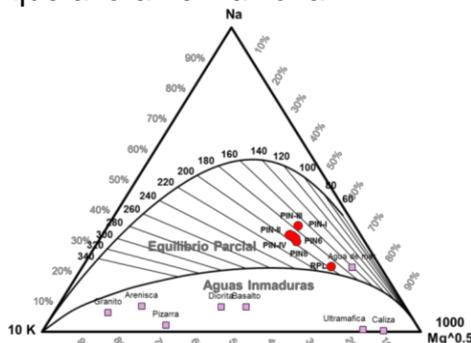


Fig.6. Diagrama ternario (Giggenbach, 1991a) 1988)

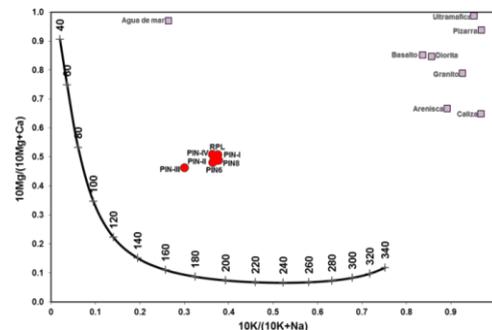


Fig. 7. Grafica Na-K-Ca-Mg (Giggenbach, 1991a)

MODELO DE MEZCLA

La figura 8 muestra el modelo de mezcla sílice-entalpía. Una línea recta que pasa por los puntos de datos y extrapolada hasta que corta la curva de solubilidad de cuarzo, dando una temperatura de 148 °C para la mayoría de las fuentes, siendo ligeramente superiores a los estimados por el geotermómetro de cuarzo. Esto indica que la mayoría de las aguas termales probablemente se están mezclando con aguas más frías en el reservorio o puede ser debido al enfriamiento conductivo que tuvo lugar durante el flujo ascendente de las aguas termales.

RESULTADO ISOTÓPICO

La grafica $\delta^2\text{H} - \delta^{18}\text{O}$ (Fig. 9) muestra que las aguas en la ZGP se localizan muy cerca de la Línea Meteórica Local (Cortecci et al., 2005), lo que indicaría que esta agua se origina de la mezcla de un componente mayoritario de aguas meteóricas y una mínima contribución de fluido magmático, posiblemente asociados a un cuerpo caliente del complejo volcánico Sillapaca.

CONCLUSIONES

La caracterización geoquímica de las aguas termales de la ZGP, indican que son de tipo clorurada- sulfatada- alcalina. El reservorio geotérmico posiblemente se encuentra sobre y alrededor de un cuerpo intrusivo asociado posiblemente al complejo intrusivo Pinaya controlado por el sistema de fallas Cusco-Lagunillas de dirección NO-SE. Por otro lado, la geotermometría química en fase líquida y el modelo de mezcla, permitió estimar la temperatura en profundidad menores a 200°C.

Finalmente, los isotopos estables $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, indican que las aguas termales se originan por la mezcla entre agua meteórica y magmática, siendo el principal componente mayoritario el agua meteórica.

Por lo tanto, el recurso que se presenta en la ZGP puede ser utilizado para generación de energía geotérmica en una planta de ciclo binario y para usos directos como la balneología, calefacción, acuicultura, etc. por lo cual se sugiere ampliar los estudios.

REFERENCIAS

1. Aguilar, R. (2012).- Magmatismo, Tectónica y Metalogenía de los Centros Volcánicos Miocénicos entre Condoroma y Paratia (Cusco-Puno) Sur del Perú, Tesis profesional, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Perú.
2. Carlotto, V. (2013).- Paleogeographic and tectonic controls on the evolution of Cenozoic basins in the Altiplano and Western Cordillera of southern Peru, *Tectonophysics*, 589 (2013) 195–219.
3. Cortecci, G., Boschetti, T., Mussi, M., Lameli, C. H., Mucchino, C. & Barbieri, M. (2005).- New chemical and original isotopic data on waters from El Tatio geothermal field, northern Chile. *Geochemical Journal* 39: 547-571.
4. Giggenbach, W. F., (1988).- Geothermal solute equilibria; derivation of Na-K-Ma-Ca geothermometers. *Geochim. Cosmochim. Acta* 52, 2749-2765.
5. Giggenbach, W.F., (1991a).- Chemical techniques in geothermal exploration. En: D'Amore, F. (Ed.), *Applications of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development*. UNITAR/UNDP Centre on Small Energy Resources, Rome, Italy, pp 119–144.
6. Langelier, W.F. & Ludwing, H.F. (1942) - Graphical methods for indicating the mineral character of natural waters. *Journal of the American Water Works Association*, 34(3): 335-352.

7. Nicholson, K. (1993) - Geothermal fluids: Chemistry and exploration techniques. Berlin: Springer-Verlag, 278 p.
8. McCrea, J. (2006) - Technical Report on the Pinaya Gold-Copper Property, South Central Peru, 43-101 Report Prepared for Acero-Martin Exploration Inc., 46 pp plus appendices.
9. Shigeno, H. & ABE, K. (1983) - B-C1 geochemistry applied to geothermal fluids in Japan, especially as an indicator for deep-rooted hydrothermal systems. En International Symposium on Water-Rock Interaction, 4^o, Misasa 1983. Extended Abstr. 437-440.