



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

Diplomado en Geotermia para América Latina

Edición 2016



**REQUERIMIENTOS TECNICOS Y ECONOMICOS
NECESARIOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL
LABORATORIO DE GEOCIENCIAS EN BOLIVIA**

Presentado por:

Yerko Figueroa Peñarrieta

Asesor del trabajo:

Lic. Edwin Melara

San Salvador, 15 de diciembre del 2016

TABLA DE CONTENIDOS

1. RESUMEN.....	1
2. INTRODUCCIÓN.....	1
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
4. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO	3
5. OBJETIVOS	6
5.1. OBJETIVO GENERAL.....	6
5.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	6
6. MARCO TEÓRICO	6
6.1. Desarrollo geotérmico.....	8
6.1.1. Informaciones preliminares.....	9
6.1.2. Exploración.....	9
6.1.2.1. Exploración Geológica.....	9
6.1.2.2. Exploración Geoquímica.....	9
6.1.2.3. Exploración Geofísica.....	12
6.1.3. Perforación de exploración (pozo de diámetro reducido).....	12
6.1.4. Revisión del proyecto y planificación	12
6.1.5. Desarrollo del campo geotérmico y perforación de producción.....	12
6.1.6. Construcción.....	13
6.1.7. Puesta en Marcha	13
6.1.8. Operación y mantenimiento	13
6.2. Análisis químico cuantitativo.....	13
6.2.1. Elección del método	14
6.2.2. Obtención de la muestra.....	14
6.2.3. Preparación de la muestra.....	14
6.2.4. Eliminación de Interferencias.....	15
6.2.5. Calibración y medida de la concentración.....	15
6.2.5.1. Métodos gravimétricos.....	16
6.2.5.2. Métodos Volumétricos	17
6.2.5.3. Métodos Instrumentales	17
7. METODOLOGÍA.....	19
7.1. TOMA DE MUESTRAS.....	20
7.1.1. Recolección de muestras geológicas.....	20

7.1.1.1.	Muestreo en la exploración geológica superficial.....	20
7.1.1.2.	Muestreo durante la exploración profunda.....	21
7.1.1.3.	Muestreo geológico durante la perforación y desarrollo geotérmico	21
7.1.1.4.	Recolección y muestreo geológico durante la operación y mantenimiento.....	22
7.1.2.	Recolección y muestreo de fluidos geotérmicos para el análisis químico. ..	22
7.1.2.1.	Muestreo de manantiales y pozos de agua caliente	26
7.1.2.2.	Muestreo de fumarolas, vapor seco de pozos y gases de manantiales.	27
7.1.2.3.	Muestreo de fluido bifásico durante la producción y operación del reservorio	28
7.1.2.4.	Otros muestreos geoquímicos	30
7.2.	ADQUISICIÓN DE DATOS, ANÁLISIS CUALITATIVOS Y CUANTITATIVOS ...	31
7.2.1.	Análisis y procesamiento de muestras geológicas.....	31
7.2.1.1.	Análisis macroscópicos y microscópicos	31
7.2.1.2.	Análisis por Difractometría.....	32
7.2.2.	Análisis y procesamiento de muestras geoquímicas.....	32
8.	RESULTADOS	38
8.1.	Requerimientos técnicos para la implementación del Laboratorio de Geo-ciencias	38
8.1.1.	Ambientes, espacios físicos y ubicación	38
8.1.2.	Equipamiento, Reactivos y Consumibles	40
8.1.3.	Organigrama y Recursos Humanos.....	42
8.2.	Requerimientos Económicos	46
8.2.1.	Precios estimados de Inversión.	46
8.2.2.	Costos referenciales para el funcionamiento	49
8.2.3.	Costo de servicio en laboratorios externos	50
8.2.4.	Evaluación Financiera	51
9.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	52
10.	AGRADECIMIENTOS.....	53
11.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54
	ANEXO I. Diagrama de flujo que muestra los pasos del análisis cuantitativo (Skoog, et al., 2005)	58
	ANEXO II. Cotización de costos servicios externos	59
	ANEXO III. Evaluación Financiera para el proyecto sin la implementación del laboratorio de Geo-ciencias.....	61
	ANEXO IV. Evaluación Financiera para el proyecto en el Escenario "A"	62

ANEXO V. Evaluación Financiera para el proyecto en el Escenario “B”	63
ANEXO VI. Evaluación Financiera para el proyecto en el Escenario “C”	64

LISTA DE TABLAS

▪ Tabla 1. Áreas geotérmicas con perspectivas de desarrollo en Bolivia (Bona & Coviello , 2016)	2
▪ Tabla 2. Propiedades físicas y químicas que se emplean en los métodos instrumentales (Skoog, et al., 2001)	18
▪ Tabla 3. Métodos de preservación en muestras de fluidos geotérmicos (Ármansson & Ólafsson, 2007).....	23
▪ Tabla 4. Contenedores y tratamientos para el muestreo de fluidos geotérmicos y manantiales (Elaboración propia)	24
▪ Tabla 5. Puntos característicos de muestreo en las diferentes etapas del desarrollo geotérmico	25
▪ Tabla 6. Etapas del desarrollo geotérmico donde se necesita el análisis de datos geoquímicos como herramienta de estudio	32
▪ Tabla 7. Resumen de los métodos analíticos para los parámetros geotérmicos...	34
▪ Tabla 8. Características físicas y de ubicación para los laboratorios.	40
▪ Tabla 9. Equipamiento, Reactivos y consumibles recomendable para las distintas áreas del Laboratorio de Geo-ciencias	40
▪ Tabla 10. Precios referenciales del equipamiento e instrumentación	46
▪ Tabla 11. Costos referenciales para el funcionamiento del laboratorio de Geo-Ciencias	50
▪ Tabla 12. Costos referenciales de servicio de análisis geoquímico en un laboratorio externo.	51
▪ Tabla 13. Resumen de indicadores financieros	52

LISTA DE FIGURAS

▪ Figura 1. Mapa de las manifestaciones Geotérmicas en Bolivia (Elaboración propia).....	2
▪ Figura 2. Representación Conceptual de los Riesgos y Costos en las Distintas Etapas del Desarrollo de un Campo Geotérmico (ESMAP, 2012)	4
▪ Figura 3. Vista del área geotérmica Sol de Mañana - Proyecto Geotérmico Laguna Colorada	5
▪ Figura 4. Límites de placas actuales. En rojo, los límites divergentes, en negro, los transformantes y la línea con dientes de sierra muestran los márgenes convergentes. El sombreado a rayas rojas indica un límite difuso, donde la deformación provocada por estos procesos ocurre a lo largo de cientos o miles de kilómetros. USGS.....	7
▪ Figura 5. Primera planta geotérmica construida en Lardarello en 1911	8

▪ Figura 6. Sección hipotética a través de la parte más alta de un sistema geotérmico de alta temperatura que representa la formación de CO2 calentado con vapor y aguas sulfatadas ácidas. (Arnórsson, et al., 2007).....	10
▪ Figura 7. Esquema de los métodos de análisis químico cuantitativo. (Harvey, 2000)	16
▪ Figura 8. Esquema de un equipo para el análisis instrumental (Skoog, et al., 2001)	18
▪ Figura 9. Esquema de la metodología en el proceso del análisis químico (Baeza, 1997).....	20
▪ Figura 10. Muestras de núcleos durante la perforación de exploración (Creative Commons)	21
▪ Figura 11. Recipientes de muestras geoquímicas utilizados durante una campaña de muestreo.	25
▪ Figura 12. Equipo para toma de muestras de aguas termales. (Arnórsson, et al., 2006).....	26
▪ Figura 13. Equipo para toma de muestras de vapor de fumarolas (A y B) y gases burbujeantes que atraviesan aguas termales (C).	27
▪ Figura 14. Equipo para toma de muestras de agua y vapor a la descarga de pozos (Arnórsson, et al., 2006).....	28
▪ Figura 15. Equipos para toma de muestras de agua y vapor a la descarga de pozos de vapor húmedo utilizando separador Webre (Arnórsson, et al., 2006)	30
▪ Figura 16. Esquema recomendado para el control de la operación de una planta geotérmica	37
▪ Figura 17. Esquema recomendado para el análisis químico según los parámetros requeridos	38
▪ Figura 18. Esquema de los ambientes necesarios para un laboratorio de geo-ciencias	39
▪ Figura 19. Organigrama referencial para el laboratorio de Geo-ciencias	43

1. RESUMEN

El presente trabajo describe los requerimientos técnicos y económicos necesarios para implementar un laboratorio de Geo-Ciencias diseñadas a las condiciones del sistema geotérmico en Bolivia.

Se definieron metodologías y técnicas de muestreo, recolección de datos, análisis de muestras geoquímicas y geológicas aplicados al campo geotérmico, al control y la operación de plantas geotérmicas.

También se analizan 3 escenarios posibles para la implementación del laboratorio buscando la forma económicamente factible de satisfacer las necesidades técnicas que requiere la explotación geotérmica en Bolivia. Para cumplir el objetivo se realizó el análisis económico del proyecto. El escenario "A" permite un laboratorio con una alta inversión inicial debido a la tecnología de los equipos planteados para un análisis profundo y de mayor exactitud de las variables químicas y geológicas; el escenario "B" con una inversión inicial media, permite contar con los datos geológicos y químicos necesarios con una exactitud que satisface las necesidades técnicas para el desarrollo geotérmico; el escenario "C" permite una inversión inicial baja, prescindiendo la obtención de datos geoquímicos y geológicos secundarios, la inversión inicial es baja en comparación de las demás, pero los costos operacionales suben por la contratación de servicios externos.

Finalmente se detallan los requerimientos técnicos y económicos para lograr el objetivo.

2. INTRODUCCIÓN

Bolivia está localizado en el centro de Sud América, entre los meridianos 57°26' – 69°38' longitud oeste y 9°38' - 22°53' latitud sud. En la década de 1970 el Servicio Geológico de Bolivia (GEOBOL) inició la recopilación de información derivada de anteriores investigaciones mineras, para preparar un inventario de los sitios termales de la región andina del país. La Figura 1 muestra más de 70 manifestaciones termales distribuidas entre la Cordillera Andina Occidental, el Altiplano y la Cordillera Andina Oriental, y se empezó a seleccionar zonas prioritarias para la exploración. (Carrasco, 1975)

Los campos exploratorios más prometedores fueron estudiados por la Empresa Nacional de Electricidad (ENDE) con el apoyo del Programa de las naciones unidas para el desarrollo (PNUD) identificando las áreas de Laguna Colorada, Volcán Sajama y Valle del Río Empexa, la Tabla 1 explica las áreas geotérmicas en Bolivia y su potencial estimado de generación. . (Delgadillo Terceros, 2000)

Tabla 1. Áreas geotérmicas con perspectivas de desarrollo en Bolivia (Bona & Coviello , 2016)

Provincia Geológica	Región Administrativa	Área Geotérmica	Nivel de Estudio	Temperatura estimada/medida (°C)	Potencial Reportado (MWe)
Cordillera Andina Occidental	Potosí	Laguna Colorada	Factibilidad	250 – 260	280 – 370
	Potosí	Valle del Río Empexa	Exploración Superficial	180 – 200	10 – 15
	Oruro	Volcán Sajama	Reconocimiento	230 – 250	n.d.

El área geotérmica que actualmente presenta mayores avances es de Laguna Colorada. Entre 1988 y 1992 fueron perforados seis pozos a profundidad promedio de 1500 metros con una capacidad de generación de entre 6 a 8 MWe cada uno; posteriormente se realizaron estudios por parte de JICA en 2008 que confirmaron la factibilidad para una planta de 100 MWe. (Villaruel, 2014).

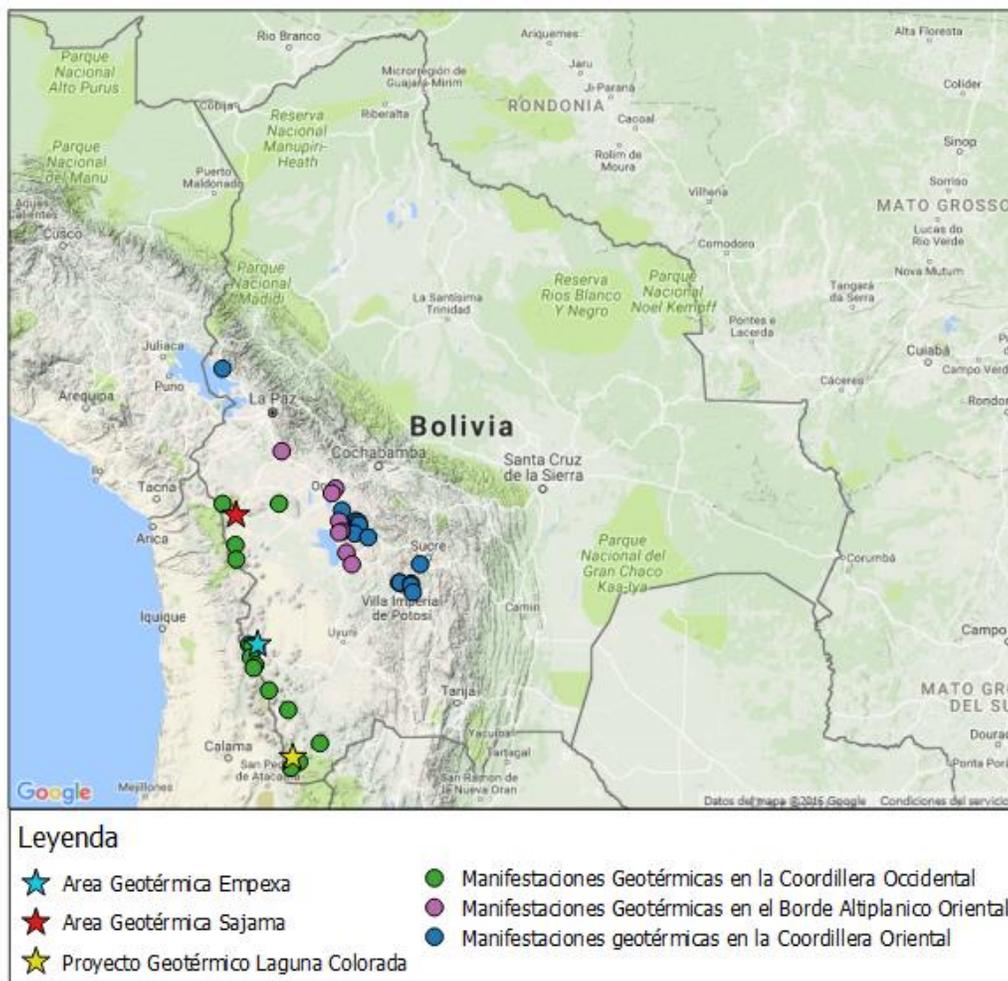


Figura 1. Mapa de las manifestaciones Geotérmicas en Bolivia (Elaboración propia).

En resumen Bolivia cuenta con una gran diversidad en recurso geotérmico; de alta, mediana y baja entalpía para su estudio y aprovechamiento. Actualmente la etapa de exploración, pre-factibilidad y factibilidad fue realizado con consultorías externas contratadas o subcontratas para los servicios de análisis geoquímicos y geológico en laboratorios fuera del país, esto representa una limitante para el desarrollo y explotación de la geotermia; es así que se plantea oportuno estudiar los requerimientos técnicos y económicos para la implementación de un laboratorio de Geo-ciencias, que pueda efectuar los análisis geoquímicos y geológicos necesarios y de esta manera apoyar al avance de la geotermia en Bolivia.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Según el “Plan de Expansión del Sistema Interconectado Nacional 2010-2020”, elaborado por la Comisión Nacional de Despacho de Carga (CNDC), Bolivia espera un 7.0 % de crecimiento anual promedio en la demanda eléctrica; la demanda máxima se registró en septiembre del 2016 con 1433.6 MWe¹ adicionalmente las actividades industriales del suroeste de Potosí se ven influenciados por la explotación minera. Por lo tanto, el desarrollo de nuevas fuentes de energía es un tema prioritario en el país.

Actualmente Bolivia desarrolla en etapa avanzada el proyecto de Laguna Colorada que es uno de los más avanzados en América del Sur. El área se ha caracterizado y ha sido explorada, en diferentes etapas a partir de 1976, Se tiene estimado la instalación de una planta geotérmica de 100 MWe en total con dos unidades de generación de 50 MWe o cuatro unidades generadoras de 25 MWe cada una para el 2020; recientemente el Banco Central de Bolivia otorgó un crédito para el desarrollo piloto de geotérmica de Laguna Colorada de aproximadamente 5MWe con dos turbinas conectadas a pozos en el campo Sol de Mañana². (Bona & Coviello , 2016)

El desarrollo de Laguna Colorada y otros campos geotérmicos como Valle de Empexa o Volcán de Sajama deriva en la necesidad de satisfacer requerimientos técnicos de análisis geoquímico y geológico en las diferentes etapas del proyecto geotérmico, además la falta de servicios de este rubro en Bolivia prioriza la necesidad de contar con un Laboratorio de geo-ciencias que pueda colaborar a los estudios para los nuevos campos geotérmicos y también realizar el seguimiento y control de la explotación del Proyecto Geotérmico Laguna Colorada.

4. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

El desarrollo de los proyectos geotérmicos implica cinco etapas desde el reconocimiento de la superficie hasta la operación y mantenimiento del recurso, seguido de su abandono correspondiente. La Figura 2 presenta una visión conceptual de las distintas etapas del

¹ Cuadro de demanda de Potencia energética según el Comité Nacional de Despacho de Carga (CNDC) ver: <http://www.cndc.bo/media/archivos/boletindiario/demandamax.php>

² Nota de Prensa del Banco Central de Bolivia; ver: https://www.bcb.gob.bo/webdocs/10_notas_prensa/NP_27.pdf

desarrollo geotérmico, junto con la variación del nivel de riesgo y de los rangos normalmente requeridos de inversión de capital. Se puede observar que las etapas que presentan mayor riesgo son las iniciales del desarrollo geotérmico (Etapas I y II), también existe un importante grado de incertidumbre en cuanto a la productividad y temperatura del recurso; es decir, que la posibilidad de perforar pozos comercialmente productivos, que suministren una capacidad de generación específica durante un lapso de tiempo determinado, es poco conocido. Esto genera incertidumbre acerca del costo global de extracción de los fluidos geotérmicos y su sucesiva reinyección en el reservorio. Esta incertidumbre disminuye considerablemente después de los estudios de exploración, modelos conceptuales geológicos, geoquímicos y geofísicos, perforación y prueba de pozos que hayan confirmado la disponibilidad del recurso geotérmico (tras la finalización de la Etapa II), lo que a su vez permite establecer la factibilidad financiera para proceder con la inversión en las subsiguientes etapas de desarrollo del campo geotérmico (Etapas III y IV). (ESMAP, 2012).

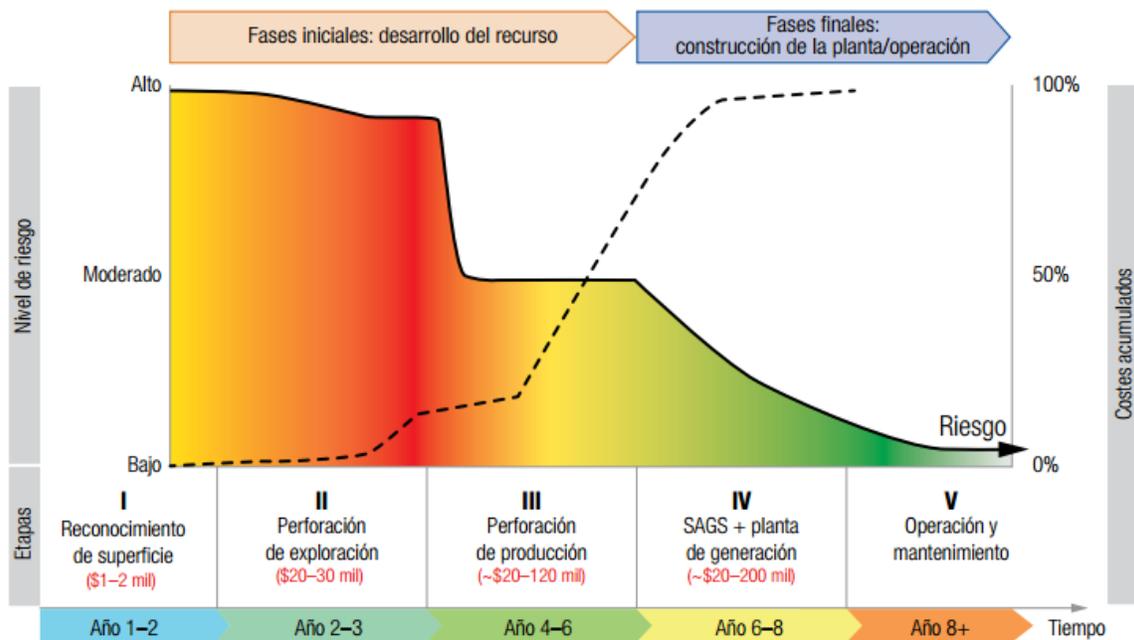


Figura 2. Representación Conceptual de los Riesgos y Costos en las Distintas Etapas del Desarrollo de un Campo Geotérmico (ESMAP, 2012)

La implementación del laboratorio de geo-ciencias está orientado a reducir la incertidumbre en las primeras etapas del desarrollo geotérmico, así también aportar en las etapas posteriores con los seguimientos, controles y mitigaciones ambientales; por ejemplo:

- En la etapa de Reconocimiento de superficie, mediciones de pH, salinidad, conductividad térmica y temperatura en las manifestaciones hidrotermales encontradas; clasificación de las diferentes tipos de aguas y fumarolas; determinación del origen de los fluidos y las zonas de recarga de un sistema geotérmico; determinación de la dirección del flujo geotérmico; geotermometría de

manantiales y estimación de la temperatura de reservorio; límites de las zonas de anomalía.

- En la etapa de perforación de exploración; las determinación de la composición química del fluido profundo permitirá evaluar a mayor precisión las condiciones termodinámicas y fisicoquímicas del fluido geotérmico y los gases no condensables, importante para el diseño de los pozos de diámetro comercial, el sistema de transporte de fluidos y la operación de la planta geotérmica, también se podrá conocer las zonas de producción y alimentación y colaborar a la construcción del modelo conceptual geoquímico del sistema geotérmico.
- En la etapa de perforación de producción; las formaciones geológicas y el control de los fluidos de perforación, cementación, estimulación química y medidas ambientales propias de la etapa, requerirán un seguimiento constante a los parámetros fisicoquímicos y geológicos.
- En la etapa de SAGS³ + Planta de generación; el laboratorio podrá colaborar en el monitoreo de la sostenibilidad del recurso y en evaluación de problemas de incrustación y corrosión, calidad de vapor que llega a las turbinas.
- En la etapa de operación y mantenimiento; se podrá monitorear los campos geotérmicos en explotación y realizar el seguimiento al control, evolución, producción del reservorio; posiblemente uno de los mayores problemas en la operación de las plantas geotérmicas sea la reinyección y las incrustaciones en las líneas y procesos, lo cual amerita un control y procesos de inhibición de las incrustaciones.



• *Figura 3. Vista del área geotérmica Sol de Mañana - Proyecto Geotérmico Laguna Colorada*

³ SAGS: Steam field above ground system

Así mismo es importante mencionar que las condiciones ambientales en la mayor parte de los sistemas geotérmicos en Bolivia son caracterizados por un ecosistema altiplánico andino, donde la precipitación anual es entre 30.5 y 106.6 mm de agua por año⁴; además de la presencia de lagunas naturales derivados de las cuencas endorreicas, muchos de ellos son sitios RAMSAR donde la preservación ambiental es muy importante. (Bona & Coviello , 2016). La legislación Boliviana define el proyecto como categoría 1 con un requerimiento de Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental Analítico Integral (EIA)⁵ el cual define programas de prevención y mitigación (PMM) y plan de aplicación y seguimiento ambiental (PASA) en cada fase del desarrollo geotérmico en Bolivia. Estos controles ambientales necesitaran la herramienta del análisis químico de las fumarolas, manantiales naturales, cuerpos de agua superficiales y subterráneas; control de emisiones en planta, líneas de acarreo y en plataforma de producción. (ENDE, URS, 2010)

5. OBJETIVOS

5.1. OBJETIVO GENERAL

- Determinar los requerimientos técnicos y económicos necesarios para la implementación del Laboratorio de Geo-ciencias en Bolivia

5.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Recomendar aspectos técnicos y económicos necesarios para el diseño e implementación del laboratorio de geo ciencias en Bolivia.
- Definir los parámetros fisicoquímicos y programas de monitoreo necesarios en cada una de las etapas del desarrollo geotérmico.
- Establecer la metodología de análisis apropiada a cada parámetro fisicoquímico.
- Elaborar un análisis técnico-económico de la viabilidad y factibilidad en la implementación del laboratorio de geo-ciencias en Bolivia.

6. MARCO TEÓRICO

La energía geotérmica es el calor natural de la tierra, que es transferido hacia la superficie a través de procesos conductivos y convectivos. Debido a estos procesos, la temperatura de la corteza terrestre aumenta con un gradiente térmico de ~ 30 ° C / km. Suponiendo que la temperatura media anual en la superficie terrestre es de 15 ° C, es posible encontrar una temperatura cercana a 105 ° C a los ~ 3 km de profundidad. Sin embargó, actualmente la

⁴ Información recopilada del Sistema de Procesamiento de datos meteorológicos (SISMET) – SENAMHI BOLIVIA, ver: <http://www.senamhi.gob.bo/sismet/index.php>

⁵ Decreto Supremo Nº 1641, 10 de julio de 2013, <http://www.lexivox.org/norms/BO-DS-N1641.xhtml>

tecnología para el aprovechamiento del recurso a estas profundidades no es económicamente factible. Los límites de las placas tectónicas (Figura 4) representan un motor térmico natural, caracterizados por contener acuíferos calentados por una cámara magmática que libera calor de forma convectiva, Estos acuíferos son llamados reservorios geotérmicos. (Marini, 2004)

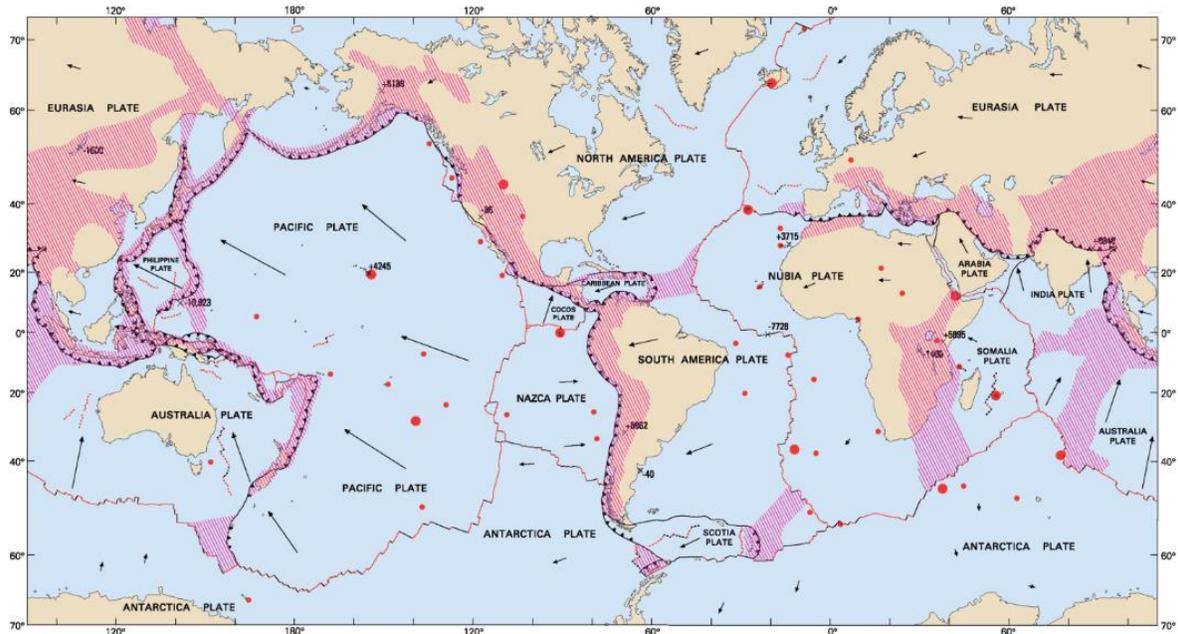


Figura 4. Límites de placas actuales. En rojo, los límites divergentes, en negro, los transformantes y la línea con dientes de sierra muestran los márgenes convergentes. El sombreado a rayas rojas indica un límite difuso, donde la deformación provocada por estos procesos ocurre a lo largo de cientos o miles de kilómetros. USGS

Dado que la energía contenida en los fluidos geotérmicos es mucho menor que el equivalente en la misma cantidad de petróleo, un requisito adicional para la explotación económicamente factible es que los fluidos geotérmicos se encuentren en reservorios de alta permeabilidad. Es así que los sistemas geotérmicos explotables se pueden dividir en dos grupos, según su entorno geológico (Marini, 2004):

- (1) Sistemas situados en áreas de volcanismo activo o magmatismo reciente;
- (2) Sistemas ubicados en otros marcos geológicos.

Los sistemas geotérmicos de alta temperatura (mayores a 180°C) generalmente son estudiados para la generación de energía eléctrica; las técnicas, estudios de exploración y caracterización de un sistema geotérmico conllevan un modelo geológico y geoquímico conceptual en primera instancia; seguidos por un modelo geofísico y geotérmico general. (Marini, 2004)

La generación de Energía eléctrica a partir de la geotérmica empezó en 1904, en Lardarello (Región de Tuscany al noroeste de Italia) con un generador experimental de 10KW (Figura 5). Desde entonces ha sido investigado y desarrollado alrededor del mundo; en la

actualidad, la generación eléctrica a partir de la geotermia es de 10 898 MWe en 24 países. (Monroy, 2016)



Figura 5. Primera planta geotérmica construida en Lardarello en 1911⁶

Las etapas del desarrollo geotérmico (Figura 2), de manera cuantitativa y/o cualitativa deberán necesitar de estudios, programas de control y seguimientos constantes.

6.1. Desarrollo geotérmico

Los proyectos geotérmicos pueden dividirse en una serie de fases de desarrollo antes de iniciar la operación y mantenimiento (O & M). Se necesita aproximadamente de cinco a siete años para desarrollar una planta geotérmica. El tiempo de desarrollo del proyecto puede variar dependiendo de cada sitio o país. Algunas de las razones son las condiciones geológicas, la información disponible sobre la fuente, el clima institucional y regulatorio, la política, las financiaciones y otros factores.

Monroy en 2016, definió las fases del desarrollo geotérmico clasificados en:

- Información preliminar.
- Exploración.
- Perforación de exploración.
- Revisión del proyecto y planificación.
- Desarrollo del campo geotérmico y perforación de producción.
- Construcción.
- Puesta en Marcha.
- Operación y Mantenimiento.

⁶ Imagen: <http://www.reuk.co.uk//OtherImages/lardarello-steam.jpg>

6.1.1. Informaciones preliminares

Es la fase inicial del reconocimiento del área geotérmica, están basados en estudios previos disponibles, generalmente estudios gubernamentales o regionales, El reconocimiento de las áreas involucran, caminos de acceso, comunidades locales, alojamientos y seguridad. (Monroy, 2016)

6.1.2. Exploración

Los estudios de exploración comienzan con la recolección de la información geológica, geoquímica, geofísica, mediciones de flujo de calor, hidrogeología y lineamiento ambiental base obtenidos del área. Es una fase multidisciplinaria donde se incluyen métodos de exploración de superficie y construcción de modelos conceptuales independientes e integrados. (Monroy, 2016)

6.1.2.1. Exploración Geológica

Un estudio geológico de superficie para la exploración geotérmica debe orientarse a obtener los principales elementos geológicos, lo que debería conducir a la construcción de un modelo conceptual geológico. Normalmente, un mapa geológico muestra la distribución de unidades de roca y estructuras a lo largo de un área de interés, representada en una superficie plana. Los parámetros a considerar para la elaboración de los mapas geológicos son la litología, las muestras de roca, geomorfología, estructuras geológicas (fallas y fracturas) y las manifestaciones hidrotermales. El objetivo de la exploración geotérmica es conocer el entorno donde puede estar el recurso geotérmico. Para ello es necesario estudiar la relación entre las estructuras volcánicas y el entorno tectónico, priorizando los episodios volcánicos recientes y conocer las condiciones hidrogeológicas y vías de circulación de los fluidos.

Las etapas de una exploración geológica abarcan desde la planificación, observación y colección de muestras, Análisis de laboratorio y la escritura del reporte.

Durante el trabajo de campo se recogen numerosas muestras de rocas, que son enviadas al laboratorio para análisis petrográfico para obtener la clasificación de las rocas de las diferentes unidades litológicas mapeadas. Este tipo de análisis se puede verificar utilizando los resultados del análisis químico de las rocas (por medio de los elementos principales). Algunas de estas muestras también son enviadas a un laboratorio especializado para obtener la edad de algunas unidades de rocas con el fin de proporcionar información sobre los episodios volcánicos. (Quezada, 2015)

6.1.2.2. Exploración Geoquímica

El estudio geoquímico está diseñado para estudiar el entorno básico del yacimiento geotérmico mediante muestreo y análisis de fluidos geotérmicos como agua de superficie, agua subterránea, agua caliente, vapor natural y gas. El resultado permite determinar la temperatura del agua caliente a la profundidad del depósito en base a sus elementos químicos en solución, estimar la velocidad de circulación de agua caliente y aclarar el

historial de agua caliente (origen y recarga del fluido). Esta información da una idea del grado de permeabilidad asociado con el yacimiento. (Monroy, 2016)

Para un mejor entendimiento los fluidos geotérmicos aplicados al diseño de un laboratorio, se puede clasificar en dos categorías, basándose en los procesos de diferenciación geoquímica que tienen lugar durante la evolución del fluido (Figura 6).

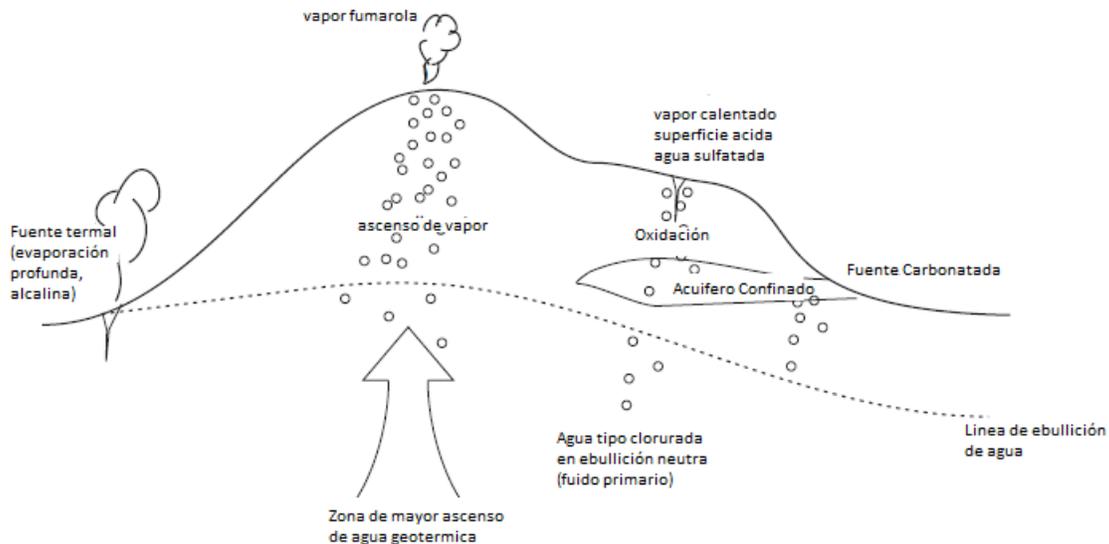


Figura 6. Sección hipotética a través de la parte más alta de un sistema geotérmico de alta temperatura que representa la formación de CO₂ calentado con vapor y aguas sulfatadas ácidas. (Arnórsson, et al., 2007)

a) Fluidos geotérmicos primarios

Pueden ser una mezcla constituida de dos o más fluidos tales como agua meteórica, agua de mar y/o volátiles magmáticos. Entre los principales tipos de fluidos primarios se encuentran las aguas Na-Cl, aguas sulfatadas y salmueras de alta salinidad (Ármansson & Ólafsson, 2007)

Los procesos más importantes que conducen a la formación de fluidos geotérmicos secundarios son:

- 1) Ebullición por despresurización.
- 2) Separación de fases de fluidos salinos.
- 3) Condensación de vapor, en agua subterránea poco profunda o agua superficial para producir aguas: ácido-sulfatadas, carbonatadas o bicarbonatadas sódicas.
- 4) Mezcla de CO₂ gaseoso de una fuente profunda con agua termal subterránea.
- 5) Mezcla de fluidos geotérmicos con agua subterránea más somera y fría.

b) Fluidos geotérmicos secundarios

Aguas sulfatos ácidos calentados con vapor: En muchos campos geotérmicos de alta temperatura las manifestaciones superficiales más representativas son las fumarolas, también están las aguas superficiales calentadas con vapor y suelo alterado intensamente caliente. La condensación del vapor de H₂S, soportada por la pérdida de calor o la mezcla con agua superficial y la oxidación del H₂S, conduce a la formación de azufre nativo, tiosulfato, varios polisulfuros y sulfatos. Las aguas sulfato-ácidas calentadas con vapor se caracterizan por una baja concentración de cloruros y relativamente alta concentración de sulfatos. No es raro que el pH de estas aguas sea <1. Debido a su bajo pH, estas aguas a menudo contienen muchos metales (por ejemplo, Al, Fe, Mn, Cr) en altas concentraciones. El agua ácida disuelve eficazmente los minerales primarios de rocas volcánicas comunes dejando un residuo rico en sílice amorfa, sulfuros, sulfato de aluminio y esmectita o caolinita (Arnórsson, et al., 2007)

Aguas bicarbonatadas: Son también conocidas (aguas ricas en CO₂), las aguas termales y no termales ricas en carbonatos son particularmente comunes en zonas de actividad volcánica, pero también se encuentran en zonas sísmicamente activas carentes de actividad volcánica. Además, las aguas-CO₂ se producen en los límites de los sistemas geotérmicos volcánicos (por ejemplo, volcanes activos). Algunas aguas- CO₂ se forman mediante la mezcla de las aguas del manto con aguas subterráneas o superficiales. En sistemas geotérmicos volcánicos las aguas-CO₂ se pueden formar por condensación de vapor que contiene CO₂. (Arnórsson, et al., 2007).

Aguas de mezcla: En la zona de “ascenso de fluido” de los sistemas geotermiales asciende agua en ebullición o no, y se puede mezclar con agua somera. Alternativamente, el fluido térmico que se mezcla con el agua subterránea más fría puede estar en dos fases (líquido y vapor). Estas aguas han sido estudiadas con el objetivo de evaluar la temperatura del componente agua caliente en la mezcla de agua, en gran medida para fines de exploración geotérmica. (Arnórsson, et al., 2007).

La aplicación de técnicas químicas se ha convertido en una parte integral de cualquier programa de exploración geotérmica. Las aguas y los gases descargados en la superficie generalmente llevan impresiones de sus historias más profundas con ellos. Los componentes encontrados en estos fluidos se han subdividido en no reactivos o marcadores (Cl, B, Li, Rb, Cs, N₂, He y Ar) y reactivos o geo indicadores (Na, K, Mg, Ca, H₂, H₂S, CH₄, CO₂ y SiO₂) (Giggenbach, 1991) Los procesos más importantes que afectan a las composiciones de fluidos geotérmicos incluyen la disolución total irreversible de los minerales de roca primarios y la precipitación de minerales secundarios. El proceso de disolución conduce a concentraciones aumentadas de los componentes acuosos, incluyendo Cl, Br y B conservadores. Otros componentes, llevados a disolución por disolución mineral de roca primaria, se eliminan nuevamente por precipitación de minerales secundarios o hidrotermales.

6.1.2.3. Exploración Geofísica

La exploración geofísica incluye mediciones por gravedad, sísmica y magnética. Para la exploración geotérmica los métodos geofísicos más importantes son las mediciones de resistividad. Se aplican diversos métodos de resistividad, incluyendo Schlumberger, TDEM (Electromagnético en dominio del tiempo) y MT (Magneto Telluric). La prospección TEM delinea el km más alto del reservorio y el levantamiento MT puede detectar zonas de flujo de calor a mayores profundidades, hasta decenas de km. Las anomalías de resistividad se utilizan para delinear la extensión probable del campo geotérmico y definir las zonas de flujo ascendente y de salida. La exploración geofísica con mediciones de gravedad de Bouguer complementa las mediciones MT y TEM. Los resultados de la prospección geofísica combinada con datos geológicos, pueden conducir a la ubicación de la fuente de calor y definir los objetivos potenciales de perforación. (Monroy, 2016)

6.1.3. Perforación de exploración (pozo de diámetro reducido).

Esta fase exploratoria tiene como objetivo principal confirmar la existencia y el potencial del recurso geotérmico. Además, con esta fase se conocen la geología del pozo, las propiedades termodinámicas y los bordes del reservorio. Un programa de perforación está diseñado, por lo general un conjunto de tres a cinco de tamaño completo, de 2500 a 3000 metros de profundidad, los pozos geotérmicos se perforan sobre la base del modelo conceptual. Cabe mencionar que los planes de perforación tienen que ser evaluados continuamente durante la actividad de perforación debido a los resultados de las pruebas de pozos. La ubicación de las torres de perforación dependerá de consideraciones ambientales en el área. El primer pozo es tal vez el más crítico, ya que está destinado a maximizar la información del fondo de pozo. (Monroy, 2016)

6.1.4. Revisión del proyecto y planificación

En esta fase, el tamaño explotable del recurso se establece sobre la base del modelo conceptual de la fuente de calor, la estructura geológica, los fluidos de circulación y las características del reservorio. Una estrategia de desarrollo debe hacerse junto con el diseño conceptual del sistema de recolección y reinyección de fluidos. El diseño inicial de la central, la ubicación y la interconexión a la red eléctrica se establecen en esta etapa. El estudio de factibilidad mostrará las estimaciones de costos del proyecto, los plazos de desarrollo y los análisis económicos y financieros bajo escenarios de demanda de energía probable. (Monroy, 2016)

6.1.5. Desarrollo del campo geotérmico y perforación de producción.

Esta fase implica la perforación de pozos de producción y reinyección necesarios para completar la estrategia de desarrollo de campo de acuerdo con el objetivo de capacidad de potencia. Además, marca el comienzo del diseño detallado, la adquisición y construcción

de la tubería y la estación de separación en la plataforma del pozo para conectar los pozos de producción a la central eléctrica y los sistemas de reinyección. Dependiendo del programa de perforación, se requiere una o más plataformas de perforación. Una regla práctica comúnmente utilizada es que cada pozo de producción exitoso producirá 5 MW de energía eléctrica en la planta de energía. Hoy en día, el programa de perforación permite perforar hasta cuatro pozos direccionales desviados uno de otro. Este esquema de desarrollo resulta en un campo de producción muy compacto y puede ser altamente aplicable en terreno accidentado y montañoso. (Monroy, 2016)

6.1.6. Construcción

El sistema de acarreo del fluido geotérmico se coordina con cualquier obra civil e infraestructura necesarias para permitir la construcción de la central eléctrica. La electricidad generada es enviada a una subestación y de allí a la red de transmisión. Las centrales eléctricas a menudo se construyen con contratos de ingeniería de adquisición y construcción. (Monroy, 2016)

6.1.7. Puesta en Marcha

La puesta en marcha de la central eléctrica es la fase final antes de que la planta inicie operaciones comerciales. Esta fase generalmente implica resolver muchos problemas técnicos y contractuales con el proveedor de la planta. El objetivo principal es optimizar el sistema de producción e inyección para permitir la recuperación y utilización de energía más eficiente. Esta etapa puede llevar varios meses. (Monroy, 2016)

6.1.8. Operación y mantenimiento

La operación y el mantenimiento se pueden dividir en O&M para el reservorio (pozos, tuberías, infraestructura, etc.) y el O&M de la planta de energía (turbina, generador, sistema de enfriamiento, subestación, etc.). El mantenimiento adecuado de todas las instalaciones garantiza un factor de alta disponibilidad y un factor de capacidad para la planta de energía, y asegurar una producción constante de vapor desde los pozos geotérmicos. Las operaciones de planta de energía necesitan personal técnico bien entrenado, para una planta de energía geotérmica de 30 MW completamente automatizada se requieren aproximadamente 20 técnicos. Esto no se aplica en todos los países, ya que por razones de demanda de energía cuando se produce un despliegue de la planta de energía y la participación geotérmica es muy importante, esta central eléctrica debe restablecerse lo antes posible y esto exige que los técnicos estén disponibles en el lugar. (Monroy, 2016)

6.2. Análisis químico cuantitativo.

Un análisis químico cuantitativo típico incluye la secuencia de pasos que se muestra en el diagrama de flujo del ANEXO I. En algunos casos, es posible omitir uno o más de esos

pasos. Por ejemplo y como sucede en la geotermia, si la muestra ya es líquida, se omitirá el paso de la disolución. En el paso de la medida, se determina la cantidad relativa del analito presente en las muestras. En el paso final se evalúa la calidad de los resultados y se estima su fiabilidad. (Skoog, et al., 2005)

6.2.1. Elección del método

El primer paso esencial de todo análisis cuantitativo es la elección de un método, como se muestra en la ANEXO I. El método elegido suele ser un término medio entre la exactitud necesaria, por un lado, y por el otro lado el tiempo y dinero disponible para el análisis. Una segunda consideración relacionada con los factores económicos es el número de muestras que se analizará. Si son muy numerosas, es posible dedicar un tipo significativo a operaciones preliminares, como las de montaje y calibración de instrumentos y equipos, así como a la preparación de soluciones estándar o patrones. (Skoog, et al., 2005)

6.2.2. Obtención de la muestra

El siguiente paso en el análisis cuantitativo es la obtención de la muestra. A fin de tener información significativa, se debe efectuar el análisis de una muestra que tenga la misma composición que el resto del material del cual se obtuvo. *El muestreo es el proceso para obtener una pequeña masa de un material cuya composición represente con exactitud a todo el material muestreado.* (Skoog, et al., 2005)

6.2.3. Preparación de la muestra

El tercer paso del análisis es la preparación de la muestra. En ciertos casos no se requiere preparación de la muestra antes del paso de medida. Por ejemplo, una vez obtenida una muestra de agua de un río, lago o manantial, es posible medir directamente su pH. En muchos casos, debe prepararse la muestra de distintas maneras:

Preparación de muestras de laboratorio

Las muestras líquidas presentan una leve diferencia a la vez que relacionada con los problemas en el paso de preparación. Si se permite que estén en recipientes abiertos, el disolvente podría evaporarse y con ello se modificaría la concentración del analito.

Definición de réplicas de muestras

Muchos análisis se llevan a cabo con réplicas de muestras, cuya masa o volumen se determinan con mediciones cuidadosas en las que se usa una balanza analítica o un dispositivo volumétrico preciso. La realización de réplicas mejora la calidad de los resultados y constituye una medida de fiabilidad. Las medidas cuantitativas de réplicas de muestras suelen promediarse y luego se aplican diversas pruebas estadísticas a los resultados para establecer la fiabilidad.

Preparación de disoluciones: Cambios físicos y químicos

La mayoría de los análisis se llevan a cabo en disoluciones de la muestra preparadas con un disolvente adecuado. En teoría, el disolvente debe disolver toda la muestra, incluido el analito, de manera rápida y completa. Las condiciones de disolución deben ser tales que resulten imposibles las pérdidas del analito. Desafortunadamente, numerosos materiales que deben analizarse son insolubles en disolventes comunes, como por ejemplo son silicatos, en este caso se debe realizar una modificación química, con procesos como calentamiento, disoluciones ácidas, básicas, oxidantes, reductores o una combinación de estos. También podría ser necesaria su ignición al aire o con oxígeno, el proceso de preparación de disoluciones puede variar según el analito que se desea analizar. (Skoog, et al., 2005)

6.2.4. Eliminación de Interferencias

Una vez que la muestra está en disolución y se ha convertido el analito en una forma apropiada para su medida, el paso siguiente es eliminar sustancias de la muestra que interfieran a su medición. Pocas propiedades químicas o físicas de importancia en el análisis químico son exclusivas de una especie química. Por el contrario, las reacciones utilizadas y las propiedades medidas son características de un grupo de elementos o compuestos. Las especies ajenas al analito con efecto en la medida final se llaman interferencias o interferentes. Debe idearse un plan para aislar los analitos de las interferencias antes de emprender la medida final, este plan dependerá de su naturaleza química. (Skoog, et al., 2005)

Los análisis químicos de los fluidos geotérmicos necesitan una atención especial en comparación con las muestras normales de agua dulce debida principalmente al hecho que a menudo son altamente salinos, con sólidos disueltos totales de hasta decenas de gramos por litro. Además de esto, a menudo contienen ácido bórico y otros ácidos débiles y por lo tanto pueden introducir un efecto de matriz que puede ser una causa de resultados analíticos no confiables para HCO_3 . (Zhong-he & Ámannsson, 2005)

6.2.5. Calibración y medida de la concentración.

Es en esta etapa donde los resultados analíticos dependen de una medición final para alguna propiedad fisicoquímica, energética u óptica del analito; esta propiedad varía de manera conocida y reproducible con la concentración del analito, la Figura 7 muestra un esquema de los métodos de análisis cuantitativo. (Skoog, et al., 2005)

Según Harvey 2000, las etapas para la medida de concentración existen diferentes técnicas de medición que varían desde la química analítica clásica (métodos gravimétricos y volumétricos) hasta la química analítica moderna (métodos instrumentales). (Harvey, 2000)

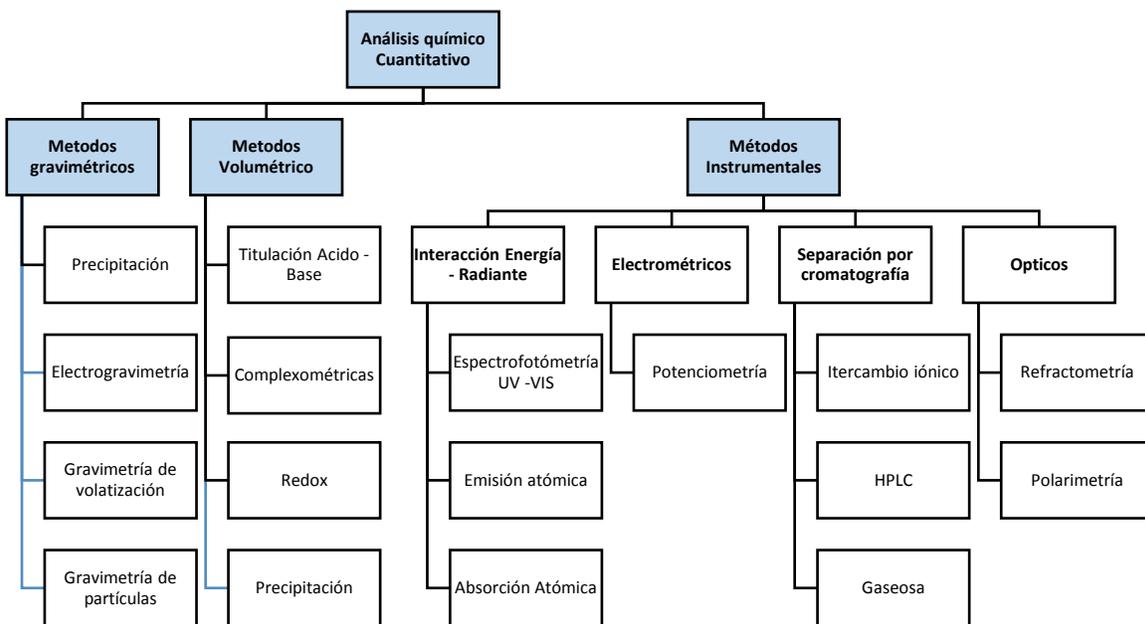


Figura 7. Esquema de los métodos de análisis químico cuantitativo. (Harvey, 2000)

6.2.5.1. Métodos gravimétricos

El principio de los métodos gravimétricos son la medición de la masa o cambio de masa. Esto sugiere que hay al menos dos maneras de usar la masa como una señal analítica, podemos medir la masa de un analito colocándola en una balanza y registrando su masa, de la misma forma podemos determinar un analito gravimétricamente determinando directamente su masa, o la masa de un compuesto que contiene el analito. Alternativamente, podemos determinar un analito indirectamente midiendo un cambio en la masa debido a su pérdida, o la masa de un compuesto formado como el resultado de una reacción que implica el analito. (Harvey, 2000)

Los métodos gravimétricos también pueden clasificarse según la forma de cuantificación de la masa; cuando la señal es la masa de un precipitado, lo llamamos **método de gravimetría de precipitación**. En el **método electro gravimetría** el analito se deposita como una película sólida sobre un electrodo en una celda electroquímica. La reducción también se puede utilizar en electro gravimetría, un ejemplo es la electrodeposición de Cu sobre un cátodo Pt. Cuando se utiliza energía térmica o química para eliminar una especie volátil, llamamos **método de gravimetría de volatilización**. Al determinar el contenido de humedad de los alimentos, la energía térmica vaporiza el H₂O. Finalmente, en la **gravimetría de partículas**, el analito se determina después de su extracción de la matriz de muestra por filtración o extracción. La determinación de sólidos en suspensión es un ejemplo de gravimetría en partículas. (Harvey, 2000)

6.2.5.2. Métodos Volumétricos

Los métodos volumétricos, son ampliamente utilizados en química analítica para la determinación de ácidos, bases, oxidantes, reductores, iones metálicos, proteínas y otras especies. Se basan en una reacción entre el analito y un reactivo patrón, conocido como valorante. La reacción tiene una estequiometría conocida y reproducible. En una valoración se determina el volumen o masa del valorante necesario para reaccionar esencialmente de manera completa con el analito y se emplea este volumen para obtener la cantidad de analito. (Skoog, et al., 2005)

Los métodos volumétricos están clasificados en cuatro grupos basados del tipo de reacción:

- **Valoraciones ácido base** o de neutralización, son utilizados para la determinación de cantidades de ácidos y bases, además pueden ser empleados para monitorear el avance de reacciones según el pH, el punto final de la valoración es visualizado a través de un indicador.
- **Valoraciones complexométricas**, una de las principales aplicaciones de estas reacciones es la valoración de cationes, se basan en la formación de complejos donde los iones metálicos reaccionan con dadores de pares de electrones para formar compuestos de coordinación o complejos
- **Valoraciones de precipitación**, son las reacciones donde el analito y el titulante forman una solución insoluble que se puede observar ya sea por el viraje de color o por la formación de cristales
- **Valoraciones REDOX⁷**, está basado en la oxidación de soluciones, al igual que las reacciones ácido base, el punto de equivalencia de la valoración es dado por el cambio de estado de oxidación del analito con respecto a un oxidante o reductor.

6.2.5.3. Métodos Instrumentales

Los métodos instrumentales se basan en la medición de las propiedades físicas de los analitos tales como conductividad, potencial de electrodo, absorción o emisión de la luz, razón masa a carga y fluorescencia. Además de algunas técnicas de separación cromatográficas como etapa previa a su determinación cualitativa o cuantitativa. (Rubinson & Rubinson, 2001),

⁷ REDOX bajo la nomenclatura IUPAC (International Unión of Puré and Applied Chemistry) son las reacción de Oxido Reducción. (<https://goldbook.iupac.org/RT06783.html>)

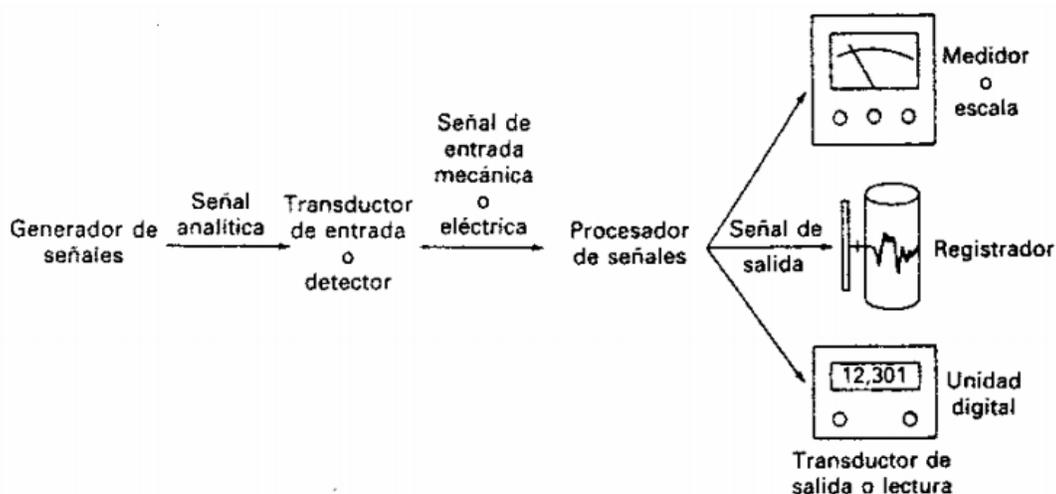


Figura 8. Esquema de un equipo para el análisis instrumental (Skoog, et al., 2001)

Un instrumento para el análisis está constituido como máximo por cuatro componentes fundamentales. Como se muestra en la Figura 8, estos componentes son un generador de señales, un transductor de entrada (denominado detector), un procesador de la señal y un transductor de salida o dispositivo de lectura. La Tabla 2 muestra las propiedades químicas y físicas que se emplean en los métodos instrumentales. Así, un instrumento analítico puede considerarse como un dispositivo de comunicación entre el sistema en estudio y el científico. (Skoog, et al., 2001)

Tabla 2. Propiedades físicas y químicas que se emplean en los métodos instrumentales (Skoog, et al., 2001)

Propiedades	Métodos Instrumentales
Emisión de la radiación	Espectroscopía de emisión (rayos X, UV, visible, de electrones, Auger); fluorescencia, fosforescencia y luminiscencia (Rayos X, UV y visible)
Absorción de la radiación	Espectrofotometría y fotometría (rayos X, UV, visible, IR); Espectroscopia fotoacústica; resonancia magnética nuclear y espectroscopia de resonancia de espín electrónico
Dispersión de la radiación	Turbidimetría, nefelometría, Espectroscopía Raman
Refracción de la radiación	Refractometría, terferometría
Difracción de la radiación	Métodos de difracción de rayos X y de electrones
Rotación de la radiación	Polarimetría; dispersión rotatoria óptica; dicroísmo circular
Potencial eléctrico	Polarimetría; cronopotenciometría
Carga eléctrica	Culombimetría
Corriente eléctrica	Polarografía; amperometría
Resistencia eléctrica	Conductimetría
Masa	Gravimetría (micro-balanza de cristal de cuarzo)
Razón masa a carga	Espectrometría de masas
Velocidad de reacción	Métodos cinéticos
Propiedades térmicas	Gravimetría y volumetría térmica; calorimetría de barrido diferencial; análisis térmico diferencial; métodos de conductividad térmica
Radioactividad	Métodos de activación y de dilución isotópica

Un generador de señales produce una señal que denota la presencia y, con frecuencia la concentración del analito. En muchos casos, el generador de señales es simplemente un compuesto o un ion generado a partir del propio analito; en un análisis por emisión atómica, el generador de señales son los átomos excitados o los iones del analito que emiten fotones de radiación; en otros instrumentos el generador de la señal es considerablemente más elaborado. (Skoog, et al., 2001)

Un **transductor o detector** convierte un tipo de energía (o señal) en otro. Por ejemplo el termopar, convierte una señal de calor radiante en un voltaje eléctrico; la fotocélula convierte la luz en una corriente eléctrica; el brazo de una balanza, convierte una diferencia de masa en un desplazamiento del brazo de la balanza respecto a la horizontal. Los transductores que actúan sobre una señal química se denominan detectores. La mayor parte de los detectores convierten las señales analíticas en un voltaje o corriente eléctricos que se amplifican o modifican fácilmente para accionar un dispositivo de lectura. (Skoog, et al., 2001)

El **procesador de señales** modifica la señal transducida procedente del detector de tal forma que se adecue al funcionamiento del dispositivo de lectura.

Una señal puede definirse como la salida de un transductor respondiendo al sistema químico de interés. La señal puede dividirse en dos partes, una causada por el (los) analito (s) y la otra por los componentes de la matriz de la muestra, y por la instrumentación analizada en la medición. Esta última parte de la señal se conoce como ruido. (Skoog, et al., 2001)

Un **dispositivo de lectura** es un transductor que convierte una señal procesada en una señal que puede ser entendida por el analista. Por lo general, la señal transducida toma la forma de la posición de una aguja en un medidor de escala, de una salida de un tubo de rayos catódicos, de un trazo en un registrador de papel, de una serie de números en una pantalla digital, o del ennegrecimiento de una placa fotográfica. En algunas ocasiones, el dispositivo de lectura da directamente la concentración de analito. (Skoog, et al., 2001)

7. METODOLOGÍA

La metodología planteada para definir los requerimientos técnicos para la implementación de un laboratorio de geo-ciencias en Bolivia se basó en los fundamentos del método científico, que puede resumirse en un proceso analítico general consistente en un conjunto de procedimientos realizados para solucionar un determinado problema. En la Figura 9 se esquematiza este proceso.

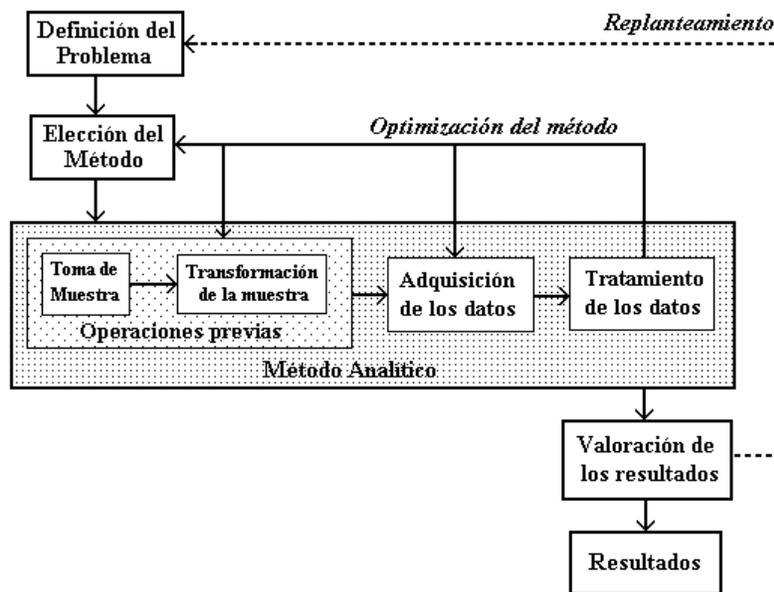


Figura 9. Esquema de la metodología en el proceso del análisis químico (Baeza, 1997)

Como se puede observar los métodos analíticos están presentes en la resolución de problemas, técnicas de exploración, control y seguimiento en geología-química de sistemas geotérmicos de baja y alta temperatura.

Dentro de la metodología planteada se priorizaron 3 etapas:

- Toma de muestras, como la recolección de muestras geológicas y fluidos geotérmicos analizables.
- Adquisición de los datos, como análisis químico y geológico cualitativo y cuantitativo.
- Valoración de los resultados, como la interpretación y análisis de los datos obtenidos para el control y seguimiento del sistema geotérmico.

7.1. TOMA DE MUESTRAS

7.1.1. Recolección de muestras geológicas

7.1.1.1. Muestreo en la exploración geológica superficial

Durante la etapa de exploración superficial, la recolección de muestras se concentra en los mapeos de campos geológicos y se lleva a cabo en el campo con el propósito de recolectar datos. Estos datos pueden ser recogidos en forma de fotografías, medidas, notas y muestras físicas. Por lo tanto, el personal asignado debe estar equipado con todas las herramientas necesarias además de estar preparado para tomar nota de las características geológicas del sitio y del entorno de exploración. Cuando se trata de una buena estrategia durante la fase de planificación, las incidencias desafortunadas en el terreno se abordan con prontitud, sin interrupciones importantes del programa de campo; es aconsejable

planificar estudios de campo durante las estaciones secas; también, es recomendable comenzar el trabajo de mapeo muy temprano en la mañana para lograr la recolección suficiente de datos antes de la afección de las condiciones climáticas. En climas más fríos se suele planificar la campaña para el verano. Por lo tanto, no se debe exceder de horas de trabajo en el campo y esto debe ser acordado entre el personal asignado. Se debe alentar el trabajo en equipo, dado que es probable que se hagan más observaciones y que se discutan cuestiones polémicas y contenciosas. Un proyecto de mapeo debe ser tanto cualitativo como cuantitativo. Debe hacerse hincapié en la precisión mientras se toman lecturas y todos los datos posibles deben ser recogidos. (Muthoni, 2012)

7.1.1.2. Muestreo durante la exploración profunda

Una vez llevado a cabo la exploración superficial de un sistema geotérmico, la exploración y evaluación del sistema geotérmico se basa principalmente en la información obtenida de los pozos (pozos exploratorios y de producción) perforados en el embalse. Se obtienen muestras geológicas (núcleos y brocas) de los pozos para determinar la litología y alteración de las rocas. (Steingrímsson & Gudmundsson, 2006)



Figura 10. Muestras de núcleos durante la perforación de exploración (Creative Commons)

7.1.1.3. Muestreo geológico durante la perforación y desarrollo geotérmico

Durante la perforación de pozos de diámetro comercial, Aproximadamente 400 muestras de perforación se recogen a intervalos entre 2 a 10 m. Las muestras son analizadas por el fundamento de la geología sub-superficial, la distribución de las zonas de alteración y la historia de alteración del pozo. Los recortes son llevados a la superficie a través del lodo de perforación, agua (o aire) y vertidos en una mesa vibradora. Las muestras son etiquetadas por la compañía de perforación con profundidad, fecha y nombre del pozo. Después del lavado a fondo, las muestras se estudian bajo un microscopio binocular y de polarización

petrográfica o difracción de rayos X, El análisis geológico en esta etapa es utilizado para interpretar todos los datos de perforación y geología, así como para trazar zonas de minerales de alteración, litología, posibles intrusiones y posibles acuíferos con trancos geofísicos. La comparación de datos de registros geofísicos con análisis geológico macroscópico, microscópico y de difracción nos ayudan a encontrar posibles acuíferos y posibles intrusiones. (Eshaghpour, 2003)

7.1.1.4. Recolección y muestreo geológico durante la operación y mantenimiento

Así mismo, durante la operación y mantenimiento de la planta se realiza el muestreo regular para el control y seguimiento al recurso geotérmico, las corrosiones y las incrustaciones, con programas de muestreo semestral en los equipos, accesorios, sistemas de acarreo y componentes de la planta geotérmica.

7.1.2. Recolección y muestreo de fluidos geotérmicos para el análisis químico.

La recolección de muestras para el análisis químico es el primer paso en el proceso del análisis químico que eventualmente produce resultados que proporcionan información importante para la construcción del modelo de un sistema geotérmico. Es imperativo que este paso se lleve a cabo correctamente porque todos los pasos subsiguientes dependen de él. Hay varios peligros inherentes en la colección de la muestra geotérmica como el terreno que puede ser riesgoso y el manejo de sustancias químicas corrosivas.

Existe una necesidad evidente de contar con personal bien entrenado para llevar a cabo esta tarea. Los errores más comunes cometidos durante el muestreo incluyen el uso de recipientes inadecuados, limpieza inadecuada y tratamiento inadecuado para la conservación de muestras. (Ármansson & Ólafsson, 2010)

Este apartado será una recolección de la información sobre la metodología de recolección de muestras estudiada por Orkustofnun, Island GeoSurvey (ISOR), Sheppard, Giggenbach y Marini (Ólafsson, 1988) (Sheppard & Giggenbach, 1985) (Marini, 2004).

Para la recolección y muestreo de fluidos hidrotermales es recomendable tomar un número razonable de muestras de aguas termales y no termales, distribuidas por toda la zona a investigar, y ejecutar los análisis a la brevedad posible.

a) Recipientes contenedores y métodos de preservación de muestra

Los recipientes de plástico son propicios para campañas de campo debido a ser ligero, robusto y tolerante a golpes. Sin embargo, la mayoría de los plásticos son relativamente permeables y permiten que el aire atmosférico sea fácilmente atravesado, desencadenando reacciones de oxidación, también los líquidos pueden evaporarse fácilmente a través de ellos, causando la concentración y posible sobresaturación de constituyentes. Muchos plásticos también están llenos de posibles sitios de adsorción para los constituyentes de la muestra y pueden disminuir sus concentraciones.

El vidrio es frágil y relativamente pesado pero tiene una mayor propiedad hermética que el plástico. Por lo tanto, los recipientes de vidrio son preferibles para la conservación de los constituyentes afectados por el aire atmosférico. Los componentes que son sensibles a la luz se recogen en botellas ámbar.

Si los recipientes no han sido previamente limpiados y preparados específicamente para una determinada tarea, deben enjuagarse al menos tres veces con el líquido de la muestra antes de la recolección. (Ármansson & Ólafsson, 2007)

Algunos componentes pueden ser alterados durante la recolección de muestras y el análisis si no se toman precauciones especiales. Las razones comunes para los cambios de concentración son la interacción con la materia en suspensión, la adsorción en las paredes de los recipientes, la actividad biológica, las reacciones REDOX, la polimerización y la precipitación. Se necesitan diferentes métodos de conservación para evitar estas razones y, por lo tanto, la muestra total comprenderá varias sub-muestras. Los métodos de conservación pueden ser físicos o químicos y los más comunes se enumeran en la Tabla 3. Es deseable que las muestras se mantengan relativamente frías. Por lo tanto, el fluido que está por encima de la temperatura ambiente debe ser enfriado a temperatura ambiente utilizando un intercambiador de calor, usualmente un serpentín sumergido en agua fría, durante la recolección. Las muestras de vapor deben ser recogidas en NaOH en botellas de doble válvula pasando por el intercambiador de calor o un condensador para su enfriamiento. (Ármansson & Ólafsson, 2007)

Tabla 3. Métodos de preservación en muestras de fluidos geotérmicos (Ármansson & Ólafsson, 2007)

Tipo de preservación	Método	Propósito	Usado para
Físico	Filtración	Prevenir la interacción y reacción con partículas suspendidas	Aniones y Cationes
	Congelación	prevenir la actividad Biológica	Nutrientes
	Contención Hermética sin aire	Prevenir la interacción con el aire atmosférico	Analitos volátiles
	Análisis in-situ	Prevenir las reacción y sub-reacciones de la fuente	Constituyentes reactivos
Químico	Adición de Base	Absorción de gases ácidos	CO ₂ , H ₂ S en el vapor, S ₃₄ en vapor
	Adición de Acido	Prevenir la adsorción en las paredes del recipiente	Cationes
	Precipitación	Prevenir las reacciones en cadena por el cambio de concentración y otro factor	Sulfito para preservar a sulfatos
	Esterilización	Prevenir la actividad biológica, usando HgCl o formaldehido	δ14C, δ34S
	Dilución	Prevenir la polimerización y precipitación	Sílice
	REDOX	Cambiar el estado de oxidación al menos volátil	Hg
	Intercambio iónico	Concentrar y evitar la adsorción de las paredes del recipiente en los elementos traza	Cationes traza.
	Extracción	Concentrar y evitar la adsorción de las paredes del recipiente en los elementos traza	Cationes traza.

Entonces, según el tipo de análisis que se desea realizar, el parámetro fisicoquímico y el método de conservación de las muestras de fluidos geotérmicos se pueden clasificar según la Tabla 4

Tabla 4. Contenedores y tratamientos para el muestreo de fluidos geotérmicos y manantiales (Elaboración propia)

Fase	Tratamiento	Especificación	Parámetros a determinar:
Vapor	Ninguno, botella de vidrio o plástico; es recomendable vidrio color ámbar	RU-V	H2 Y O18
	Preservación, recipiente de vidrio tipo botellón de Giggenbach de doble válvula preservado con ácido bórico.	RP-V	NH3
	Ninguno, botellón de plástico	FU-V	Aniones ⁸
	0.8 mL. de HNO ₃ (concentrado) en 200 mL de muestra	FA-V	Cationes ⁹
	Botellón de Giggenbach con una válvula de paso, preservado con NaOH	Ai-V	CG, H2S, CO2
Líquido	Filtración, recipiente plástico o vidrio con cierre hermético sin contacto con el aire atmosférico	FU-L	Aniones
	Filtración y acidificación, recipiente plástico	FA-L	Cationes
	Ninguno, botella de vidrio o plástico; es recomendable vidrio color ámbar	RU-L	H2 Y O18
	Dilución; de 10 mL de muestra en 100 mL aforado con agua desionizada	RD-L	SiO2
	Preservación, recipiente de vidrio color ámbar con adición de H2SO4	PS-L	NH3

Los puntos de muestreo dependerán del tipo de análisis geoquímico que se desea realizar, independiente de las etapas de desarrollo geotérmico y según los objetivos que se desean encontrar generalmente son tomados en puntos predeterminados, la Tabla 5 nos muestra una matriz de puntos preferenciales de muestreo.

⁸ Aniones: referido a los parámetros iónicos de carga negativa; en geotermia: Cloruros, Sulfatos, Bicarbonatos, Carbonatos.

⁹ Cationes: referido a los parámetros iónicos de carga positiva; en geotermia: Sodio, Potasio, Calcio, Magnesio, Boro, Litio, Hierro, Níquel, Mercurio, Cesio, Rubidio, Aluminio, Cobre, Plomo, Zinc, Arsénico, Cadmio, Cromo, Plomo.

Tabla 5. Puntos característicos de muestreo en las diferentes etapas del desarrollo geotérmico

AREA DE MUESTREO	PUNTO DE MUESTREO	TIPO DE MUESTRA																
		AGUA GEOTÉRMICA					VAPOR CONDENSADO					GASES		AGUA SUPERFICIAL				
		FU-L	FA-L	RU-L	RD-L	PS-L	RU-V	RP-V	FU-V	FA-V	Ai-V	RP-V	Ai-V	FU-L	FA-L	RU-L	RD-L	PS-L
Pozos de producción	Cabezal de pozo	X	X	X	X	X	X					X	X					
	Tanque de agua	X	X	X	X	X												
	Separador Ciclónico						X	X	X	X	X	X	X					
	Línea de acarreo bifásico	X	X	X	X	X	X											
	Línea al separador atmosférico	X	X	X	X	X												
	Vertedero	X	X	X	X	X												
Pozos de reinyección	Cabezal de pozo	X	X	X	X	X												
	Línea de reinyección	X	X	X	X	X												
Central geotérmica	Flashers								X	X								
	Colectores								X	X								
	Separadores de Humedad								X	X	X							
Manifestaciones Naturales	Manantiales Naturales												X	X	X	X	X	
	Aguas subterráneas												X	X	X	X	X	
	Ríos												X	X	X	X	X	
	Fumarolas	X	X	X	X	X	X		X	X		X	X					

Los recipientes generalmente utilizados bajo la clasificación de la Tabla 5 se ilustran en la Figura 11.



Figura 11. Recipientes de muestras geoquímicas utilizados durante una campaña de muestreo.

7.1.2.1. Muestreo de manantiales y pozos de agua caliente

Las condiciones y características iniciales del sitio de muestreo deben ser analizadas previamente. Se deben seleccionar sitios específicos para el muestreo, considerando parámetros como la temperatura y condiciones climatológicas. En lo posible, la campaña debe llevarse a cabo al final de la estación seca, para obtener muestras de agua menos afectadas por la mezcla con el agua lluvia superficial (Marini, 2000). El procedimiento para el muestreo de pozos de agua caliente debe ser de conexión un serpentín de refrigeración al cabezal del pozo o a una tubería del pozo como se muestra en la Figura 12 (A). Si la temperatura del agua es menor de 40° C, no será necesario un serpentín de enfriamiento, al igual que cuando un pozo, este presurizado, no será necesaria una bomba peristáltica para filtrar la muestra. El diseño del aparato necesario para recoger las muestras de aguas superficiales se presenta en la Figura 12 (B). Si la abertura es pequeña y en una pendiente, es conveniente colocar un embudo justo debajo de la abertura y dejar que el flujo de agua baje por gravedad en el tubo a la bomba peristáltica.

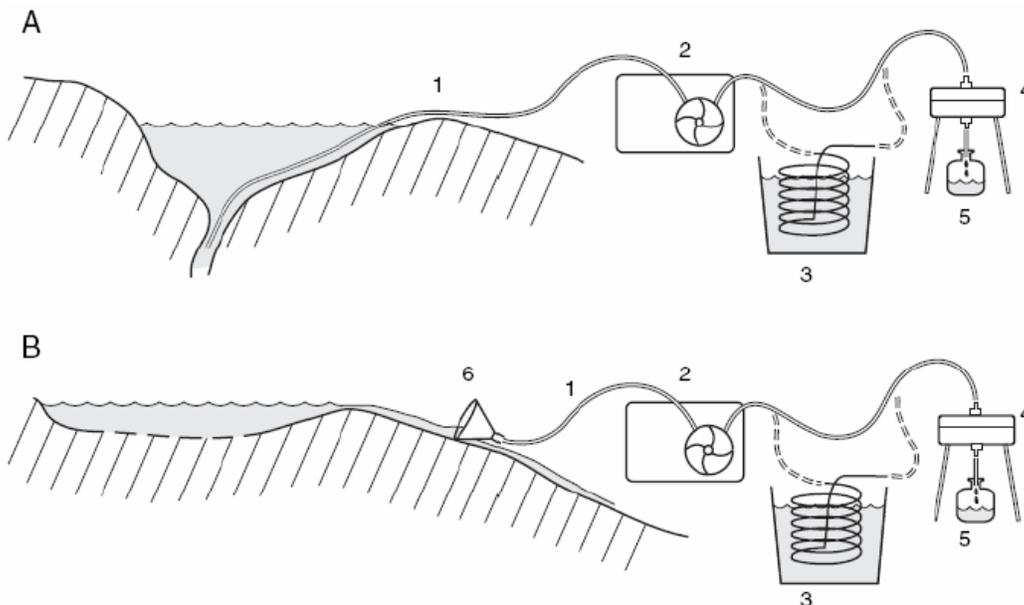


Figura 12. Equipo para toma de muestras de aguas termales. (Arnorsson, et al., 2006).

(1) tubo de silicona de 1/4" de diámetro. (2) bomba peristáltica (3) recipiente con agua fría y serpentín de refrigeración de acero inoxidable (N316). (4) soporte de filtro de teflón con 20 cm de diámetro membrana de filtro de 0,2 μ m. (5) botella para la muestra. (6) embudo, de diámetro de 10 cm que se adapte a los tubos de silicona.

Las muestras para determinación de isótopos estables de hidrógeno ($\delta^2\text{H}$), oxígeno-18 ($\delta^{18}\text{O}$) y carbono $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{14}\text{C}$ deben ser enfriadas, filtradas y almacenadas en botellas de vidrio con tapas herméticas para evitar la evaporación y el intercambio con la atmósfera. Para la determinación de isótopos de carbono, la muestra debe ser dosificada con unas cuantas gotas de solución 1% HgCl_2 para impedir los cambios en el contenido de isótopos de carbono por la actividad biológica.

7.1.2.2. Muestreo de fumarolas, vapor seco de pozos y gases de manantiales.

Las fumarolas seleccionadas para muestrear pueden ser pequeñas pero lo importante es que tengan una buena descarga de vapor y que salgan a una velocidad considerable. En lo posible se deben evitar charcos de lodo o de agua superficial calentados con vapor. La fase gaseosa descargada de estas manifestaciones termales tiende a tener bajas concentraciones de H_2S debido a que se oxidan con el oxígeno disuelto del agua superficial a través de la cual pasa el vapor. El muestreo y análisis de vapor de las fumarolas proporciona información sobre las concentraciones de gases en el vapor. Es importante medir la temperatura al momento del muestreo el fin de eliminar dudas sobre la naturaleza de la descarga. Los tipos de muestras de vapor de fumarolas que se recojan dependerá de los parámetros de control físico-químicos y componentes isotópicos que se van a analizar la Figura 13 muestra los tres tipos de captaciones de fumarolas y aguas termales. (Guijarro, 2014)

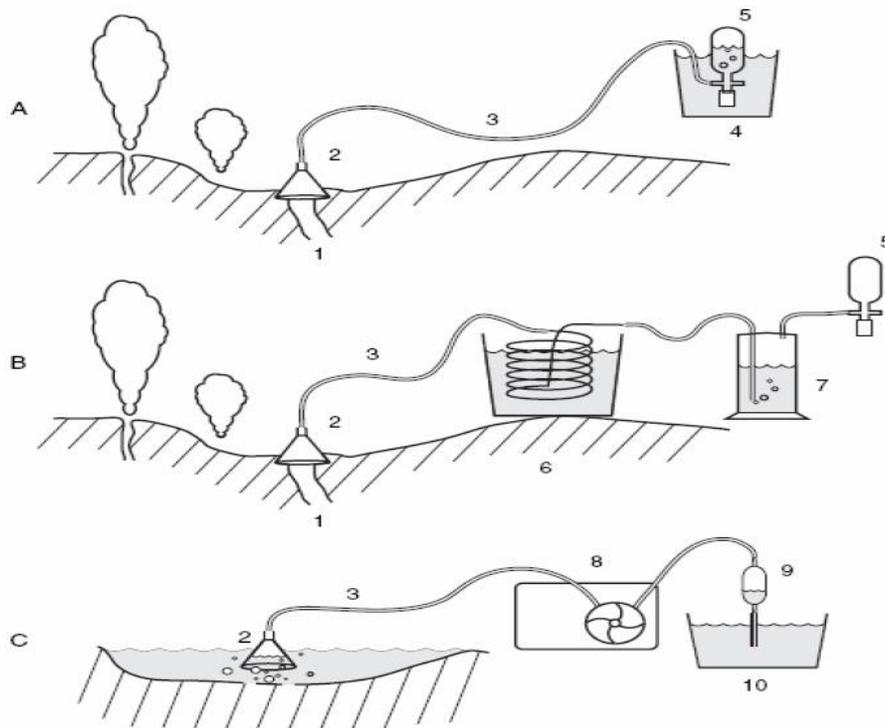


Figura 13. Equipo para toma de muestras de vapor de fumarolas (A y B) y gases burbujeantes que atraviesan aguas termales (C).

(1) Salida de vapor, (2) Embudo, (3) manguera de silicona de diámetro 1/4" de pared gruesa (es permeable a los gases pero permite su uso en un amplio rango de temperatura (0-100 °C). Se puede usar manguera de Tygon que tiene muy baja permeabilidad a la mayoría de los gases). (4) Balde con agua de fría, (5) Bombilla de muestreo de gases, 300 ml, (6) Balde con agua fría, y serpentín de enfriamiento hecho de acero inoxidable (N316). (7) la botella de lavado (aproximadamente 300 ml) para coleccionar el condensado. (8) bomba peristáltica. (9) botella de muestreo con válvulas de cierre en ambos extremos, 300 ml, (10) balde pequeño con agua para evitar entrada de aire en el bulbo. (Arnorsson, et al., 2006).

7.1.2.3. Muestreo de fluido bifásico durante la producción y operación del reservorio

Para obtener muestras representativas de la descarga de pozos, es necesario recoger por separado cada una de las fases, agua líquida y vapor. Esto se puede hacer con un separador de vapor en el cabezal del pozo como en la Figura 14 o utilizando un separador Webre que se conecta en la tubería bifásica donde se transporta el fluido descargado desde el cabezal del pozo. La relación de agua a vapor que entra al serpentín de enfriamiento no puede suponerse que es la misma que la descarga total. Para calcular la composición de la descarga total desde el análisis de muestras de agua y de vapor, es necesario disponer de datos sobre la presión de separación y la entalpía de descarga y relacionar las composiciones en función a las presiones tomadas para el vapor y líquido. (Guijarro, 2014)

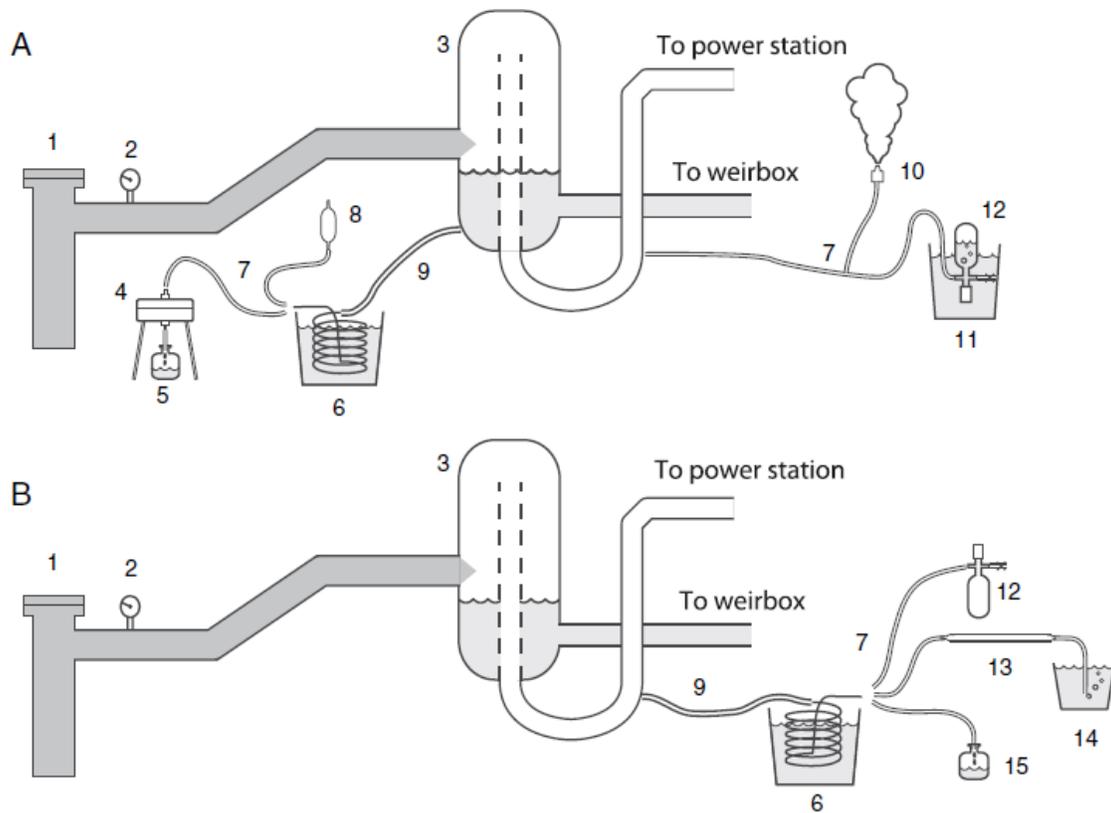


Figura 14. Equipo para toma de muestras de agua y vapor a la descarga de pozos (Arnorsson, et al., 2006).

(1) Cabezal del pozo, (2) Manómetro. (3) separador de vapor del cabezal del pozo, (4) soporte de filtro de teflón con 20 cm de diámetro, y membrana de filtración de 0,2 μm . (5) botella de muestreo, (6) balde con agua fría y serpentín de enfriamiento de acero (N316), (7) manguera de silicona de 1/4" de pared gruesa, (8) botella de muestreo con válvula de paso en ambos extremos, 300 mL, (9) tubo de acero con revestimiento de teflón, (10) válvula atmosférica de una vía, (11) balde con agua fría, (12) botella de muestreo de gas, 300 ml, (13) tubería de cobre (aproximadamente 30 cm de largo), con abrazaderas especiales en ambos extremos, para la toma de muestras de gases nobles y gases individuales para mediciones isotópicas, (14) balde pequeño con agua para evitar que el aire entre en la tubería de cobre, (15) botella de muestreo para condensado para la determinación de NH_3 , $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$

Muestreo de agua y vapor usando separador Webre en la descarga de un pozo de vapor húmedo

Cuando se colectan muestras usando un separador Webre, se debe evitar la contaminación de las muestras de vapor con agua líquida y mucho más, que las muestras de agua se contaminen con vapor.

La manera más segura de recoger una **fase de agua líquida libre de vapor** es ajustando el separador Webre de tal manera que la válvula de agua este relativamente cerrada y la válvula de vapor relativamente abierta. De esta manera el separador se mantiene lleno de agua, y se tiene una descarga de vapor muy húmedo, una forma de verificar fácilmente es pasando una herramienta o cualquier otro objeto a través del flujo el cual lo mojará, ver Figura 15 A

Para colectar **muestras de vapor**, se debe invertir el ajuste de las válvulas; la válvula de vapor debe estar ligeramente abierta y la válvula de agua bien abierta. De esta manera el separador se llena con vapor de agua, y una mezcla de agua y vapor es descargado por la válvula de agua ver Figura 15 B. Cuando el vapor es seco, se puede pasar una mano rápidamente a través de la columna de humo sin percibir dolor o daño. La condensación de vapor en el separador Webre debe reducirse al mínimo aislando contra la pérdida de calor, por ejemplo con lana de vidrio.

El vapor también puede ser recolectado como condensado con la ayuda de un serpentín de refrigeración como se muestra en la Figura 15 C. Alternativamente, una muestra de vapor puede ser recogida en una botella con gases evacuados mediante la inmersión de esta botella en agua fría. Este último método de muestreo de vapor requiere una válvula de retención en el tubo atmosférico entre el serpentín de refrigeración y la botella de muestreo de gas, o entre el separador y el bulbo de muestreo de gas, para asegurarse de que la presión no se acumule en el bulbo, ya que puede hacer que el tubo sea expulsado o la botella explote.

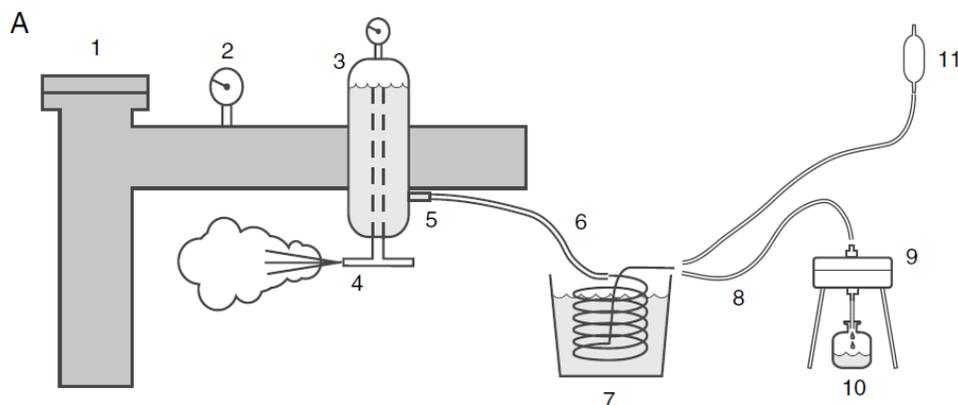


Figura 15. Equipos para toma de muestras de agua y vapor a la descarga de pozos de vapor húmedo utilizando separador Webre (continua...)

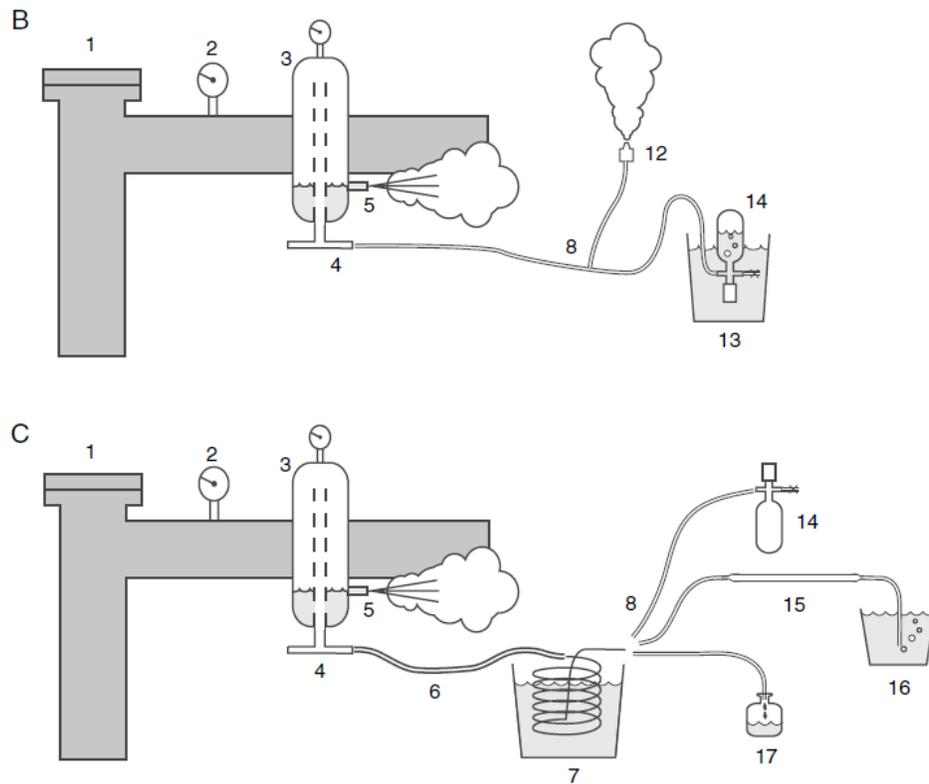


Figura 15. Equipos para toma de muestras de agua y vapor a la descarga de pozos de vapor húmedo utilizando separador Webre (Arnorsson, et al., 2006)

- (1) cabezal de pozo, (2) Manómetro, (3) separador de vapor Webre, (4) válvula de salida de vapor, (5) válvula de salida de agua, (6) tubos de acero con revestimiento de teflón, (7) Balde con agua fría y serpentín de refrigeración (aproximadamente 6 m de longitud) de acero inoxidable (N316), (8) manguera de silicona de 1/4" de diámetro de pared gruesa que puede estar conectado, ya sea al soporte del filtro o a la botella de muestreo de gases con válvula de cierre en los dos extremos, (9) soporte del filtro de teflón de 20 cm de diámetro con membrana de filtro 0,2 μm , (10) botella de muestreo, (11) botella de muestreo de gas con válvula de paso en ambos extremos, 300 ml, (12) válvula atmosférica de una vía, (13) balde con agua fría, (14) botella de muestreo de gas, 300 ml, (15) tubería de cobre, para la toma de muestras de los gases nobles y mediciones isotópicas, (16) balde pequeño con agua para evitar que el aire entre en la tubería de cobre, (17) botella de muestra para el condensado para la determinación de NH_3 , $\delta^{2}\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$

7.1.2.4. Otros muestreos geoquímicos

Muestreo de agua a profundidad

Para la realización de este muestreo, el pozo no debe poseer presión en el cabezal. Se usa una herramienta especial que puede ser de dos tipos: Klyen o Kuster. La herramienta se introduce por la tubería a la profundidad deseada y a través de un dispositivo de reloj, se abre para dejar entrar el agua, recuperándose posteriormente. Una vez afuera, la

herramienta es enfriada y se colecta la muestra, para análisis de cationes, aniones e isótopos.

Muestreo de trazadores químicos

- TFT: Tracer Flow Testing:

Estas pruebas se realizan para determinar el flujo de vapor que provee un pozo de producción, para iniciar la etapa de generación eléctrica; en el cual se inyecta una mezcla de alcohol isopropílico y benzoato de sodio. Por afinidad de solubilidad de los trazadores, se colectan muestras para análisis de benzoato de sodio en la fase acuosa y para análisis de isopropanol en la fase de vapor.

- Sulfonatos:

Se inyecta una mezcla de varias sales sulfónicas en los pozos reinyectores y se toman muestras en los pozos productores para analizar en el agua la presencia de Sulfonatos, de esta manera se verifica si existe interconexión entre pozos productores y reinyectores. Y de existir interconexión se puede proyectar el tiempo en el cual puede ocurrir su enfriamiento y tratar de ejecutar una explotación sostenible para aumentar su tiempo de vida útil.

7.2. ADQUISICIÓN DE DATOS, ANÁLISIS CUALITATIVOS Y CUANTITATIVOS

Siguiendo con la metodología de proceso de análisis, la adquisición de datos es la caracterización ya sea química, fisicoquímica, geológica o según los requerimientos de interpretación de las muestras tomadas.

7.2.1. Análisis y procesamiento de muestras geológicas

La metodología para el análisis de muestras geológicas se plantea en forma de macroscopía, microscopía y difracción; con identificación de la cristalografía y mineralogía principal utilizando un microscopio estereoscópico, donde se espera identificar minerales de alteración hidrotermal característicos de yacimientos geotérmicos. Para un análisis más detallado de la muestra se espera contar con un análisis microscópico utilizando un microscopio petrográfico polarizado y la difracción de Rayos X, esto permitirá una mayor exactitud en la interpretación de los resultados.

7.2.1.1. Análisis macroscópicos y microscópicos

El reconocimiento macroscópico de minerales se realiza fundamentalmente a partir de las observaciones de sus propiedades físicas. Las consideraciones que se toman en cuenta para el análisis macroscópico son: El hábito¹⁰, los agregados cristalinos, la exfoliación, dureza, tenacidad, peso específico, color, color de raya, brillo y magnetismo. Este tipo de análisis generalmente son realizados con materiales básicos de geología y una lupa estereoscópica

¹⁰ El hábito es la apariencia morfológica externa de un determinado monocristal

Para el análisis microscópico de las muestras geológicas se considera la preparación de las láminas delgadas o secciones delgadas que es la preparación de la muestra geológica en una lámina de vidrio (portas) donde con la ayuda de resina epoxi se adhiere la roca de un espesor promedio de 30 μm para su estudio con microscopio petrográfico. También se puede realizar esta preparación en sedimentos sueltos si previamente se les añade una resina que, al consolidar, se comporta como si fuera el cemento de la roca.

7.2.1.2. Análisis por Difractometría

La técnica de difracción de rayos X ha sido ampliamente utilizada en la caracterización de materiales, que cumplen con la condición de tener una estructura cristalográfica definida, la información obtenida de la interacción entre los rayos X y los cristales se basa en la difracción producida por un conjunto de átomos en un arreglo ordenado, un proceso de dispersión coherente que se origina por el choque de los fotones incidentes contra los electrones firmemente ligados a los átomos.

Las muestras son pulverizadas mediante un mortero vibrador o un instrumento de pulverización, hasta alcanzar una estructura tipo talco para disminuir la rugosidad en la superficie de la muestra montada; la cantidad de muestra debe ser la suficiente para cubrir completamente el área en el cual incide el haz de rayos X.

7.2.2. Análisis y procesamiento de muestras geoquímicas

Para plantear una metodología óptima en el análisis de muestras químicas geotérmicas, se analizaron inicialmente las etapas del desarrollo donde es necesario contar con la herramienta del análisis químico ya sea para estudios iniciales, control o seguimiento al reservorio y la planta, en la Tabla 6, se puede apreciar los seguimientos recomendables en el desarrollo geotérmico.

Tabla 6. Etapas del desarrollo geotérmico donde se necesita el análisis de datos geoquímicos como herramienta de estudio

Etapas del Desarrollo Geotérmico	Descripción
Informaciones preliminares.	<ul style="list-style-type: none"> • Identificación de fumarolas, Manantiales, Alteraciones hidrotermales en suelos y rocas, ríos, fuentes, pozos de agua, etc. • Identificación de las condiciones bases y características ambientales del área previo a la ejecución del proyecto.
Exploración.	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluación del origen de los fluidos. • Determinación de las características químicas del fluido geotérmico en relación a la composición química de aguas superficiales y de acuíferos subterráneos. • Estimar temperaturas de reservorio y presión parcial de gases. • Definir las propiedades químicas de los fluidos geotérmicos con respecto a normativas medioambientales, corrosión, incrustación y otros aspectos técnicos. • Proponer un modelo hidrogeológico del sistema geotérmico en estudio (delimitación de zonas de recarga, descarga, patrón de flujos, etc.) <p style="text-align: right;"><i>(Continua...)</i></p>

Etapa del Desarrollo Geotérmico	• Descripción
(...Continuación) Perforaciones de exploración	<ul style="list-style-type: none"> • Química de fluido descargado y reservorio; composición inicial, problemas potenciales. • Características termodinámicas y químicas (zonas producción ó alimentación – correlación de acuíferos). • Monitoreo (cambios químicos temporales). • Identificación impacto ambiental (deposición aguas, gases, emisión fluidos ácidos etc.).
Revisión del proyecto y planificación.	<ul style="list-style-type: none"> • Actualización del modelo conceptual. • Actualización de las condiciones ambientales y programas de prevención y mitigación ambiental.
Desarrollo geotérmico y producción de pozos.	<ul style="list-style-type: none"> • Química de fluido descargado y reservorio; composición inicial, problemas potenciales. • Características termodinámicas y químicas (zonas producción o alimentación – correlación de acuíferos). • Monitoreo (cambios químicos temporales). • Identificación impacto ambiental (deposición aguas, gases, emisión fluidos ácidos etc.). • Control en la perforación, fluidos de perforación y aspectos ambientales.
Construcción.	<ul style="list-style-type: none"> • Monitoreo (control evolución producción, procesos en el reservorio, problemas asociados).
Puesta en Marcha.	<ul style="list-style-type: none"> • Reinyección (sólidos, trazadores y efectos TMD). • Calidad del fluido (potencial incrustante & corrosión, valoración económica de especies químicas).
Operación y Mantenimiento	<ul style="list-style-type: none"> • Impacto ambiental

Se ha observado que en diferentes laboratorios del rubro, se utilizan distintos procedimientos para el análisis de los constituyentes, por ejemplo la concentración de sílice, que es un parámetro importante en las investigaciones geotérmicas las técnicas varían desde volumétricas hasta instrumentales. Es por tal motivo que se debe utilizar procedimientos estandarizados con el fin de garantizar la comparabilidad de los resultados.

Las metodologías planteados es una recopilación de la estandarización realizado por Pang Zhong-he and Halldór Ármannsson en 2005. (Zhong-he & Ámannsson, 2005), que a la vez es una adaptación de la APHA AWWA, WEF y del IAEA¹¹, para análisis de matrices geotérmicas. En la Tabla 7, se muestra un resumen de la metodología para cada componente.

¹¹ APHA: American Public Health Association, AWWA: American Water Works Association
 WEF: Water Environment Federation, IAEA: International Atomic Energy Agency

Tabla 7. Resumen de los métodos analíticos para los parámetros geotérmicos

	Método	Reactivos	Equipo
Aluminio (Al)	[APHA 3111]. La muestra que contiene aluminio es aspirada directamente en una llama de óxido nitroso acetileno en un equipo de absorción atómica, a absorbancia de 309.3 nm que se compara con la curva de un estándar.	Solución estándar Cilindro de gas óxido nitroso Cloruros de potasio	Espectrómetro de Absorción Atómica
	[APHA 3120] La muestra es aspirada dentro de una radiofrecuencia generada por el plasma de argón acoplado inductivamente y la intensidad de emisión del espectro de aluminio es medida por el instrumento y comparada con estándares. La intensidad de la longitud de onda para la medición es 308,22 nm o alternativo.	Solución estándar Cilindro de gas Argón	Espectrómetro de Emisión Atómica con Plasma Acoplado Inductivamente
Amoniaco (NH3)	[APHA 4500]. El amoniaco es determinado mediante un potenciómetro con electrodo selectivo después de elevar el pH de la muestra entre 10-14	Solución estándar Cilindro de gas óxido nitroso Cloruros de potasio	Espectrómetro de Absorción Atómica
Bicarbonatos y Carbonatos	[APHA 2320]. Las concentraciones de las especies de bicarbonato y carbonato se determinan a partir del pH de la muestra, titulando la muestra hasta un pH 8.3 (si la muestra tiene un pH > 8,3), luego hasta pH de 4.5 con estándar de HCl. La concentración de las especies se calcula a partir de las reacciones de equilibrio de carbonato y bicarbonato.	Solución estándar de HCl, solución estándar de NaOH, bicarbonato de sodio y soluciones buffer de pH	Titulador potenciométrico automático (con electrodo de pH)
Boro (B)	[APHA 3120]. La muestra es aspirada dentro de una radiofrecuencia generada por el plasma de argón acoplado inductivamente y la intensidad de emisión del espectro de boro es medida por el instrumento y comparada con estándares. La intensidad de la longitud de onda es 249.68 nm o alternativa	Solución estándar de boro	Espectrómetro de Emisión Atómica con Plasma Acoplado Inductivamente
	[Cogbill and Yoe (1955); Krug et al. (1981) Edwards (1980); Kirst and Rump (1992); Shucker et al. (1975)]. Este método está basado en el complejo de boro con azometina H para formar un complejo amarillo que puede ser analizado por espectrofotométricamente a 410 nm	ácido acético glacial, acetato de amonio, EDTA, ácido ascórbico, soluciones buffer, azometina H, soluciones estándar de Boro	Espectrofotómetro UV-VIS
Calcio (Ca)	[APHA 3111]. Las muestras que contienen calcio son aspiradas dentro de una flama de aire-acetileno u óxido nitroso-acetileno y es determinado por absorción a una intensidad de 422.7 nm.	Solución estándar de Ca Gas óxido nitroso Cloruro de lantano, Cloruro de potasio, nitrato de estroncio	Espectrómetro de Absorción Atómica
	[APHA 3120]. La muestra es aspirada dentro de una radiofrecuencia generada por el plasma de argón acoplado inductivamente y la intensidad de emisión del espectro de boro es medida por el instrumento y comparada con estándares. La intensidad de la longitud de onda es 249.68 nm o alternativa	Solución estándar de Calcio	Espectrómetro de Emisión Atómica con Plasma Acoplado Inductivamente (Continua...)

	Método	Reactivos	Equipo
Cloruros (Cl)	(...Continuación) [APHA 4110B]. Los componentes aniónicos son separados en columnas de intercambio catiónico, sulfonadas recubiertas con resina aniónica finamente molida. Una solución de carbonato de sodio/ bicarbonato de sodio es usada como solvente de elución.	Solución estándar de cloruros Eluyente carbonato de sodio/bicarbonato de sodio	Cromatógrafo de Iones con detector de conductividad eléctrica y membrana de supresión
	[APHA 4500-Cl]. AgCl precipita cuantitativamente como nitrato de plata al añadir un titulante el punto final es indicado por un gráfico de datos de conductancia versus incrementos de volumen de nitrato de plata adicionado. La intersección de las dos líneas en el gráfico indica el punto final.	Solución estándar de cloruro de sodio Solución estándar de nitrato de plata, HNO3	Titulador potenciométrico automático (con electrodo de Ag-AgCl)
Fluoruros (F)	[APHA 4110B]. Los componentes aniónicos son separados en columnas de intercambio catiónico, sulfonadas recubiertas con resina aniónica finamente molida. Una solución de carbonato de sodio/ bicarbonato de sodio es usada como solvente de elución.	Solución estándar de cloruros Eluyente carbonato de sodio/bicarbonato de sodio	Cromatógrafo de Iones con detector de conductividad eléctrica y membrana de supresión
	[APHA 4500-F]. La concentración de fluoruros se mide con un electrodo específico que de fluoruros que contiene cristales de fluoruro de lantano.	Solución estándar de fluoruros 1-10 ug/L TISAB (Total ionic strength adjustment buffer)	Titulador potenciométrico automático (con electrodo selectivo de Fluoruro)
Hierro (Fe)	[APHA 3111]. Muestras acuosas es de hierro son aspiradas directamente en una llama aire-acetileno y medido a una longitud de onda de 248.3 nm	Solución madre de Hierro Cilindro de gas óxido nitroso Cloruro de potasio	Espectrómetro de Absorción Atómica
	[APHA 3120]. La muestra es aspirada dentro de una radiofrecuencia generada por el plasma de argón y la intensidad de emisión del espectro de hierro es analizada por el instrumento y comparada con estándares. La intensidad de la longitud de onda para la medición es 261.19 o alternativo.	Solución estándar de Hierro	Espectrómetro de Emisión Atómica con Plasma Acoplado Inductivamente
Litio (Li)	[APHA 3111]. Las muestras de litio son aspiradas directamente en una llama aire-acetileno y litio es determinado por absorción a una longitud de onda de 670.8 nm	Solución estándar de litio Cloruro de potasio	Espectrómetro de Absorción Atómica
	[APHA 3120]. La muestra es aspirada dentro de una radiofrecuencia generada por el plasma de argón y la intensidad de emisión del espectro de litio es analizada por el instrumento y comparada con estándares.	Solución estándar de Litio	Espectrómetro de Emisión Atómica con Plasma Acoplado Inductivamente
Magnesio (Mg)	[APHA 3111]. La muestra que contiene magnesio es aspirada directamente en una llama de aire-acetileno a una absorbancia de 285.2 nm	Solución estándar de Magnesio Cloruro de potasio	Espectrómetro de Absorción Atómica
	[APHA 3120]. La muestra es aspirada dentro de una radiofrecuencia generada por el plasma de argón y la intensidad de emisión del espectro de magnesio es medida por el instrumento y comparada con estándares. La intensidad de la longitud de onda es de 279.55 nm o alternativa.	Solución estándar de Magnesio	Espectrómetro de Emisión Atómica con Plasma Acoplado Inductivamente (Continua...)

	Método	Reactivos	Equipo
pH	(...Continuación) [APHA 4500-H+]. El pH de una solución se determinado midiendo el potencial de la solución entre los electrodos de vidrio y de referencia.	Agua desionizada, buffers de pH	Medidor de pH
Potasio (K)	[APHA 3111]. El potasio es determinado por aspiración de la muestra dentro de una llama aire-acetileno, la intensidad de absorbanca del potasio es de 766.5 nm	Solución estándar de Potasio Cloruro de potasio	Espectrómetro de Absorción Atómica
	[APHA 3120]. La muestra es aspirada dentro de un plasma de argón y la intensidad de emisión del espectro de potasio es analizada y comparada con la de estándares.	Solución estándar de Potasio	Emisión Atómica con Plasma Acoplado Inductivamente
Silice (SiO ₂)	[APHA 4500-SiO ₂]. La sílice soluble reacciona con el ión molibdato para producir un complejo amarillo verdoso el cual luego se reduce para producir un complejo azul que es medido a 815 nm o con sensibilidad reducida a 640-700 nm	Sulfito de sodio, bisulfito de sodio, bicarbonato de sodio, ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, metasilicato de sodio	Espectrofotómetro UV-VIS
	[APHA 3111]. La muestra es aspirada dentro de una llama óxido nitroso-acetileno. La intensidad de absorbanca del silicio es 251.6 nm.	Solución estándar de silicio o metasilicato de sodio Cilindro de gas óxido nitroso	Espectrómetro de Absorción Atómica
	[APHA 3120]. La muestra es aspirada dentro de un plasma de argón y la intensidad de emisión del espectro es analizada y comparada con estándares. La intensidad de la longitud de onda es 288.16 nm.	Solución estándar de Silice	Emisión Atómica con Plasma Acoplado Inductivamente
Sodio (Na)	[APHA 3111]. La muestra que contiene sodio es aspirada en una llama de aire-acetileno en un equipo de absorción atómica. La intensidad de absorbanca del sodio es de 589 nm.	Solución estándar de Sodio Cloruro de potasio	Espectrómetro de Absorción Atómica
	[APHA 3120]. La muestra es aspirada dentro de un plasma de argón y la intensidad de emisión del espectro es analizada y comparada con estándares	Solución estándar de Sodio	Emisión Atómica con Plasma Acoplado Inductivamente
Sulfatos (SO ₄)	[APHA 4110B]. Los componentes aniónicos son separados en columnas de intercambio catiónico sulfonadas recubiertas con resina aniónica finamente molida. Una solución de carbonato de sodio/ bicarbonato de sodio es usada como solvente de elución. Los iones son detectados con un detector de conductividad.	Ácido sulfúrico, sulfato de sodio u otro estándar de sulfato, NaHCO ₃ , Na ₂ CO ₃	Cromatógrafo de Iones con detector de conductividad eléctrica y membrana de supresión
	[Giggenbach and Goguel (1989)]. Este método es aplicable para aguas no tratadas y está basado en la reacción de sulfato con cromato de bario para formar sulfato de bario insoluble. Los iones cromato liberados son determinados espectrofométricamente a una longitud de onda de 385 nm.	Ácido acético glacial, carbonato de calcio, hidróxido de amonio concentrado, HCl, etanol absoluto, indicador de bromofenol, NaOH, soluciones estándar.	Espectrofotómetro UV-VIS

Para la optimización del análisis químico en especial en la etapa de operación y mantenimiento también se plantea la implementación de un laboratorio en sitio de operación, con facilidad de análisis rápido para la toma de decisiones en el control y la operación de la planta geotérmica.

En adición, la organización para el análisis químico es sugerida según la Figura 16 .

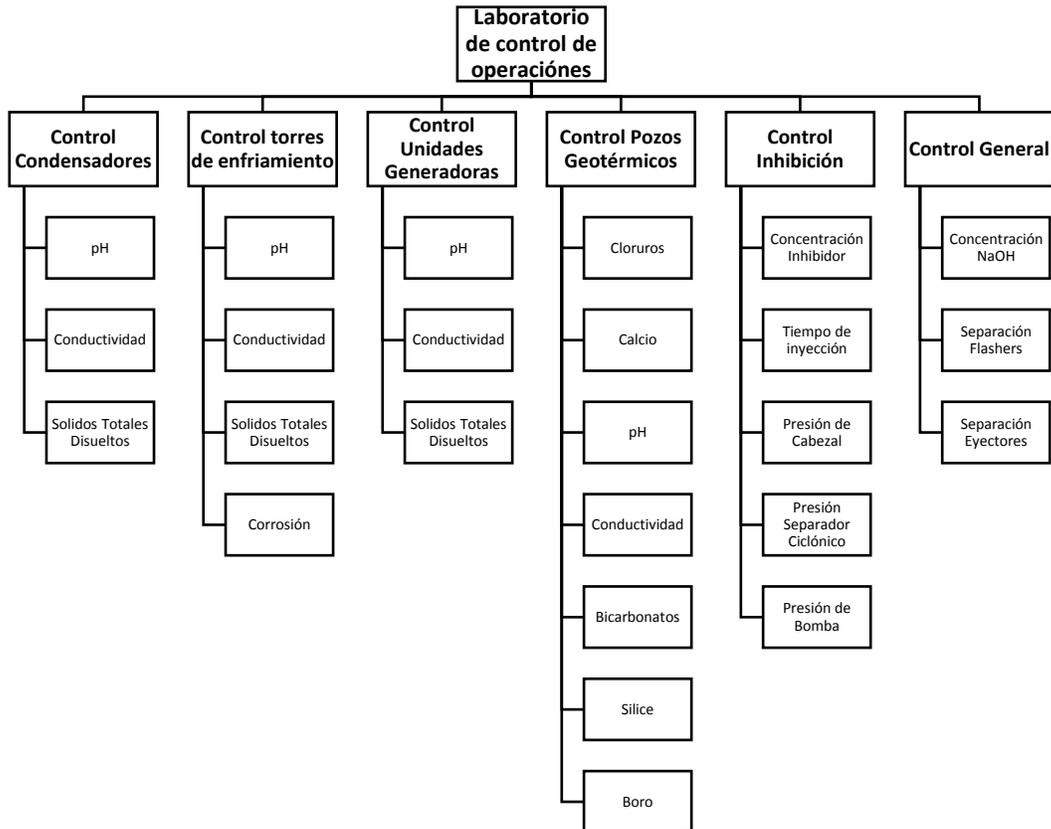


Figura 16. Esquema recomendado para el control de la operación de una planta geotérmica

De la misma forma se plantea la implementación de un laboratorio de seguimiento especializado, según la metodología de análisis químico este deberá contar con equipamiento de análisis instrumental, para las áreas de:

- Isotopos estables.
- Potenciometría y espectrofotometría.
- Emisión y Absorción Atómica.
- Cromatografía

La Figura 17 muestra un esquema recomendado para dicho laboratorio.

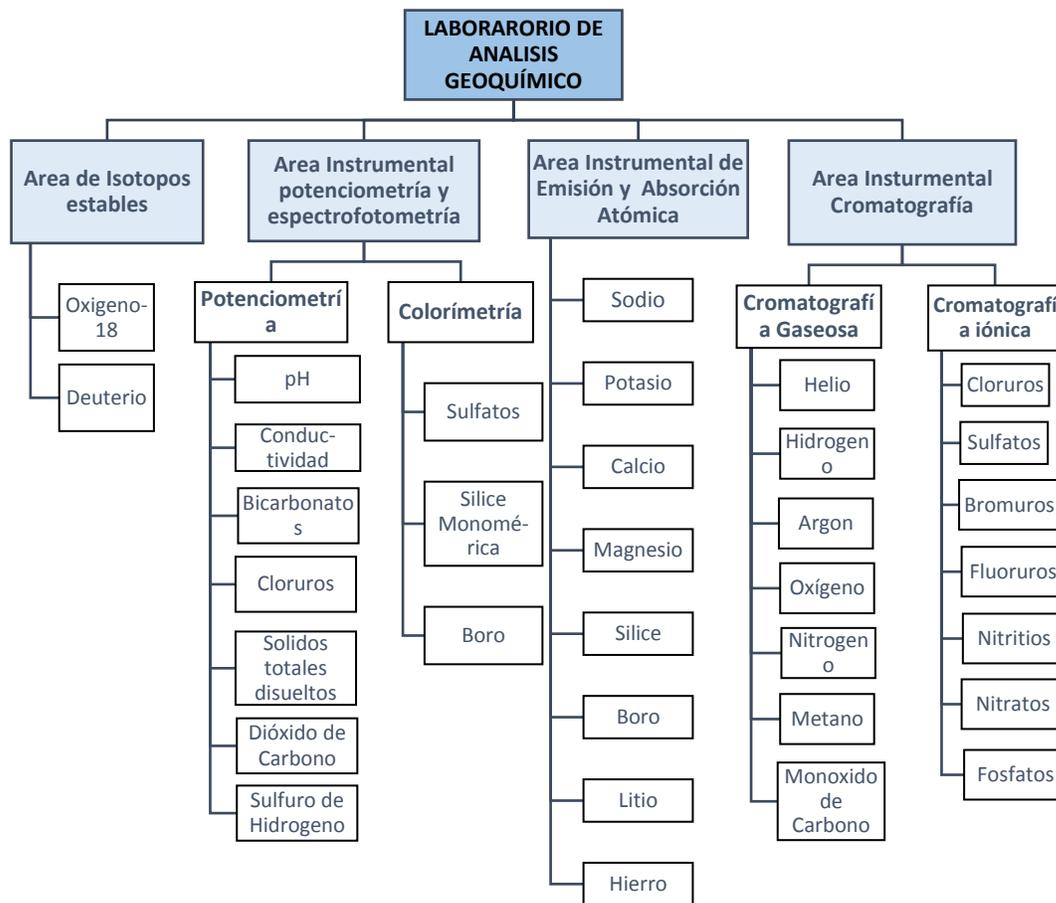


Figura 17. Esquema recomendado para el análisis químico según los parámetros requeridos

8. RESULTADOS

8.1. Requerimientos técnicos para la implementación del Laboratorio de Geo-ciencias

Con lo planteado en el punto 7. Metodología, los requerimientos técnicos dependerán de los alcances que se desean implementar en el análisis geológico, geoquímico y ambiental (ver Tabla 6. Etapas del desarrollo geotérmico donde se necesita el análisis de datos geoquímicos como herramienta de estudio)

8.1.1. Ambientes, espacios físicos y ubicación

Para la implementación del laboratorio de geo-ciencias se considera un manejo en dos puntos; el primero debido a las características de control in situ que deberá estar en la planta geotérmica, la segunda, al ser un laboratorio de características geológicas y geoquímicas especializadas deberá cumplir los requisitos de logística con los campos

geotérmicos principales de Bolivia, acceso a proveedores, servicios técnicos, operaciones climáticas y ambientales optimas de operación para los equipos.

La Figura 18 muestra una organización de los ambientes requeridos según las áreas de análisis para el laboratorio.

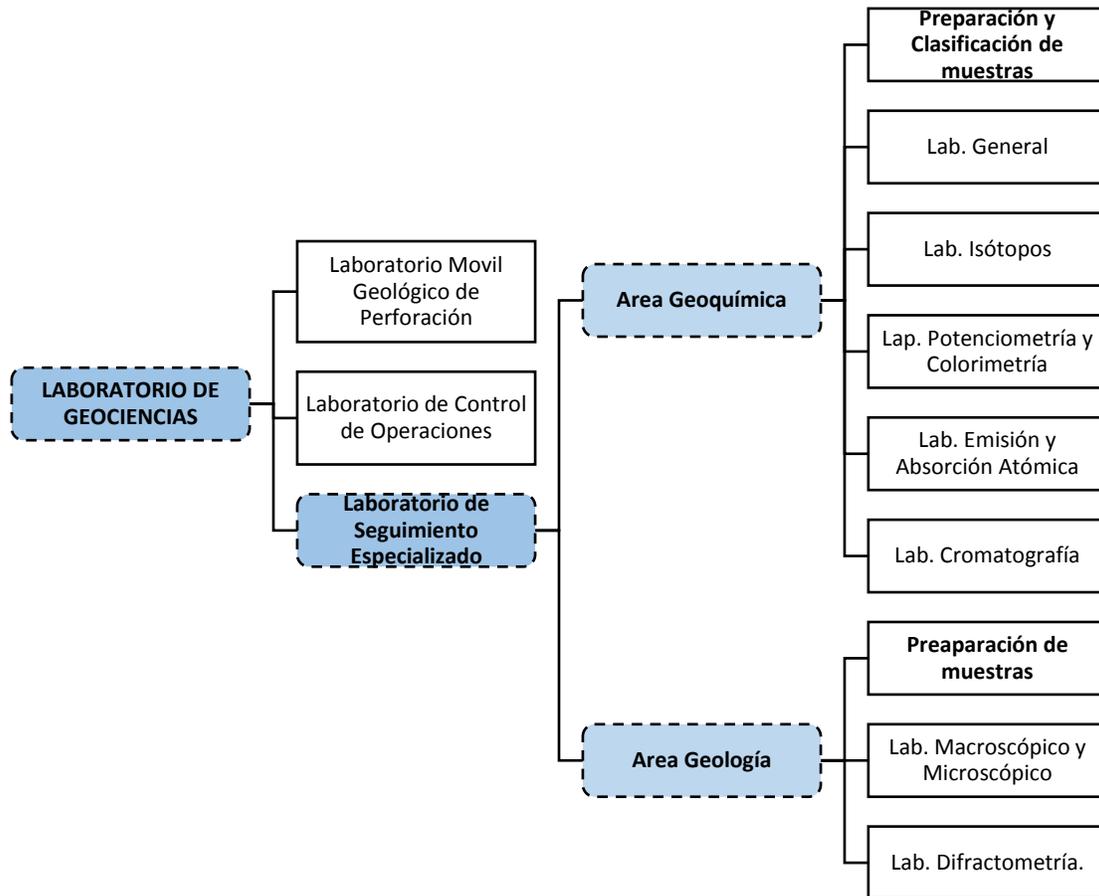


Figura 18. Esquema de los ambientes necesarios para un laboratorio de geo-ciencias

La Tabla 8 muestra las recomendaciones de las características sugeridas de los ambientes; para el laboratorio de seguimiento especializado se consideraron las ciudades de La Paz y Cochabamba por ser focos intermedios de contacto logístico con proveedores de materiales, reactivos y servicios técnicos. La Paz se encuentra a una distancia de 670 Km de Laguna Colorada, 200 Km de Sajama y 350 Km de Empexa; en cambio Cochabamba se encuentra a una distancia de 570 Km de Laguna Colorada, 304 Km de Sajama y 400 Km de Empexa.

Tabla 8. Características físicas y de ubicación para los laboratorios.

Ambiente	Localización	Justificación	Características sugeridas
Laboratorio de Control de Operaciones	Planta Geotérmica	Al ser un laboratorio de Control y seguimiento a las operaciones y mantenimiento de la planta geotérmica, debe estar ubicado en el sitio	Ambiente de 125 m2, repartidos en un laboratorio principal de 100 m2 equipado con mesones de análisis, climatización, paredes de material liso, ductos de ventilación para extracción de gases, duchas y lavaojos de auxilio; y una oficina de 25 m2, equipado con estantería, escritorios y un computador.
Laboratorio de control de la perforación	Plataforma de perforación	Al ser un laboratorio de control y caracterización de la geología de perforación y los fluidos de perforación, debe estar ubicado en el sitio del desarrollo,	Ambiente de 64 m2 aproximadamente, repartidos en un área de preparación de muestras y otro de análisis de perforación; deberá contar con estantería móvil, soportes para los equipos, instalaciones hídricas y eléctricas complementarias
Laboratorio de seguimiento especializado	Ciudad Intermedia, La Paz o Cochabamba	Este laboratorio no solo debe prestar los servicios a una planta geotérmica, sino a todas las áreas geotérmicas posibles, debe tener condiciones logísticas de acceso, provisión de reactivos, materiales y soporte técnico	Ambiente alrededor de 700 m2, repartidos en 2 áreas con 6 laboratorios (5 de geoquímica y 2 de geología) cada uno de aproximadamente 80 m2 equipados con mesones y estantería para análisis, ductos de ventilación y extracción de gases, duchas y lavaojos de auxilio, Salas de servicios auxiliares, instalaciones hídricas, eléctricas complementarias y de respaldo para contingencias; a la vez también deberá contar con 3 oficinas de aproximadamente 60 m2 cada uno, equipados con estantería y escritorios de oficina, computadores personales.

8.1.2. Equipamiento, Reactivos y Consumibles

Las técnicas de análisis geológico y geotérmico que se pretenden implementar serán instrumentales. En base a la metodología de análisis para cada parámetro en las diferentes etapas del desarrollo geotérmico, se elaboró la Tabla 9 que muestra el equipamiento recomendable para cada área del laboratorio de geo-ciencias, además de los principales reactivos y consumibles requeridos.

Tabla 9. Equipamiento, Reactivos y consumibles recomendable para las distintas áreas del Laboratorio de Geo-ciencias

	Laboratorio	Equipamiento	Reactivos y Consumibles
PLANTA GEOTERMICA	Laboratorio de Control de Operaciones	<ul style="list-style-type: none"> • Espectrofotómetro UV – VIS. • pHmetro digital. • Conductímetro digital. • Potenciómetro electrodo de pH. • Destilado de agua. • Desionizador de agua. • Densímetro digital portable. • Balanza analítica. • Balanza semi-analítica. • Bureta digital analítica. • Micropipetas. • Nitrogenador de muestras. • Material básico de laboratorio (*) 	<ul style="list-style-type: none"> • Gas Nitrógeno. • Soluciones Buffer pH. • Peróxido de hidrogeno. • Solución de amoniaco 25%. • Ácido Nítrico p.a. • Hidróxido de Sodio. • Soluciones estándar y reagentes para Cloruros. • Soluciones estándar y reagentes para Boro. • Soluciones estándar y reagentes para Sílice. • Soluciones estándar y reagentes para Calcio. <p style="text-align: right;">(Continúa...)</p>

	Laboratorio	Equipamiento	Reactivos y Consumibles
AREA GEOLOGÍA	Laboratorio de Control de perforación.	<ul style="list-style-type: none"> Microscopio estereoscópico. Cortadora de muestras. Pulidora de muestras. Herramientas para análisis (pinzas, espátula, reglas, pizeta, HCl). Densímetro digital. Equipo de medición de propiedades reológicas. pHmetro digital. Conductímetro. 	<ul style="list-style-type: none"> Secciones de láminas delgadas Resina de epoxi. Endurecedor de resina. Papel lija 60, 120, 180, 240, 320, 600. Silicón abrasivo. Cemento termoplástico. Electrodos de pH, Conductividad.
	Preparación de muestras	<ul style="list-style-type: none"> Equipo pulidora de muestras. Equipo cortadora de muestras. Estufa eléctrica de secado. Equipo de corte de precisión de muestras. Pulverizador de muestras. 	<ul style="list-style-type: none"> Secciones de láminas delgadas Resina de epoxi. Endurecedor de resina. Papel lija 60, 120, 180, 240, 320, 600. Silicón abrasivo. Cemento termoplástico.
	Laboratorio Macroscópico y Microscópico	<ul style="list-style-type: none"> Microscopio estereoscópico. Microscopio petrográfico de luz polarizada. Microscopio electrónico de barrido. 	
	Laboratorio Difracción Rayos X	<ul style="list-style-type: none"> Equipo de difracción de Rayos X Juego de tamices 	<ul style="list-style-type: none"> Placas para muestras.
AREA GEOQUÍMICA	Área de preparación y clasificación de muestras	<ul style="list-style-type: none"> Separadores de muestras tipo Webre. Condensadores de serpentín. Equipo de ultrasonido para limpieza. Nitrogenador de muestras. Bomba de vacío. Bomba peristáltica. Embudos de captación de fumarolas. pHmetro y Conductímetro portable. Pinzas de brazo larga para muestreo. 	<ul style="list-style-type: none"> Frascos y recipientes de muestreo. Ampollas de Giggenbach de simple paso. Ampollas de Giggenbach de doble paso. Soportes de filtro de teflón. Tubos de conexión de acero revestido de teflón. Tuberías de cobre. 1/4". Mangueras de silicona 1/4". Filtros de 0.2 µm. Tuberías de titanio 1/4".
	Laboratorio General	<ul style="list-style-type: none"> Material básico de laboratorio (*). Destilador de Agua. Desionizador de agua. Balanza Analítica. Balanza Semi-analítica. Campanas de extracción de gases. 	<ul style="list-style-type: none"> Materiales y reactivos básicos de laboratorio (**).
	Laboratorio de Isótopos	<ul style="list-style-type: none"> Espectroscopio Laser Espectrómetro de masas 	<ul style="list-style-type: none"> Soluciones Estándar de Deuterio y de Oxígeno 18. Filtros 0.2 µm. Pipetas. Viales para muestras. Filtros deshumidificadores.

(Continua...)

	Laboratorio	Equipamiento	Reactivos y Consumibles
	Laboratorio de Potenciometría y Colorimetría	<ul style="list-style-type: none"> • pHmetro digital. • Conductímetro digital. • Potenciómetro de electrodo selectivo Amoniaco. • Potenciómetro de electrodo selectivo Sulfuro de Hidrogeno. • Potenciómetro de electrodo selectivo Dióxido de Carbono. • Titulador potenciométrico automático con electrodo de pH. • Titulador potenciométrico automático con electrodo de plata. • Espectrofotómetro UV-VIS. 	<ul style="list-style-type: none"> • Electrodos selectivos de H₂S, CO₂, pH, Conductividad, Ag. • Soluciones de relleno Soluciones estandarizados. • Micropipetas. • Ácido acético glacial, carbonato de calcio, hidróxido de amonio concentrado, HCl, etanol absoluto, indicador de bromofenol, NaOH, soluciones estándar. • Sulfito de sodio, bisulfito de sodio, bicarbonato de sodio, ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, hidróxido de sodio o de amonio, molibdato de amonio, ácido oxálico, metasilicato de sodio.
	Laboratorio de Emisión y Absorción atómica	<ul style="list-style-type: none"> • Espectrómetro de Absorción Atómica (AAS), Acoplado con llama y horno de grafito. • Espectrómetro de Emisión Atómica con plasma acoplado inductivamente (ICP-AES). 	<ul style="list-style-type: none"> • Soluciones estándares de Na, K, Ca, Mg, Si, B, Li, Fe. • Agua desionizada. • Filtros 0.2 µm. • Viales para muestras. • Acetileno. • Óxido Nitroso. • Capsulas de grafito. • Argón
	Laboratorio de Cromatografía	<ul style="list-style-type: none"> • Cromatógrafo iónico con detector de conductividad eléctrica y membrana de supresión. • Cromatógrafo de gases, con detector de FID y CD. • Cromatógrafo de gases, acoplado a un espectrómetro de masas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Gases de arrastre: <ul style="list-style-type: none"> ○ Nitrógeno. ○ Helio. ○ Hidrogeno. ○ Aire (cero). ○ Argón. ○ Filtros de humedad. ○ Jeringas de Inyección.
	Equipos portables de exploración en campo	<ul style="list-style-type: none"> • Equipo portable de análisis de Mercurio. • Equipo portable de análisis de Sulfuro de Hidrogeno. • pHmetro y Conductímetro digital Portable. • Equipo portable de medición de H₂S, CO₂ (Espectrometría IR, Celda electroquímica). • Equipo portable de medición de Radón y Torón. 	
AREA AMBIENTAL	Equipos portables de monitoreo en campo	<ul style="list-style-type: none"> • Equipo de medición de CO₂. • Equipo de monitoreo de H₂S (corto plazo). • Equipo de monitoreo de H₂S (largo plazo con datta logger). • Sonómetro digital. 	

8.1.3. Organigrama y Recursos Humanos

Para las operaciones del laboratorio de Geo-ciencias se necesitará profesionales técnicos de las áreas de química, geología y ambiental; las actividades que se desarrollan principalmente son de toma y recolección de muestras, análisis fisicoquímico e

interpretación de resultados. La Figura 19 muestra un organigrama referencial del laboratorio de Geo-ciencias.

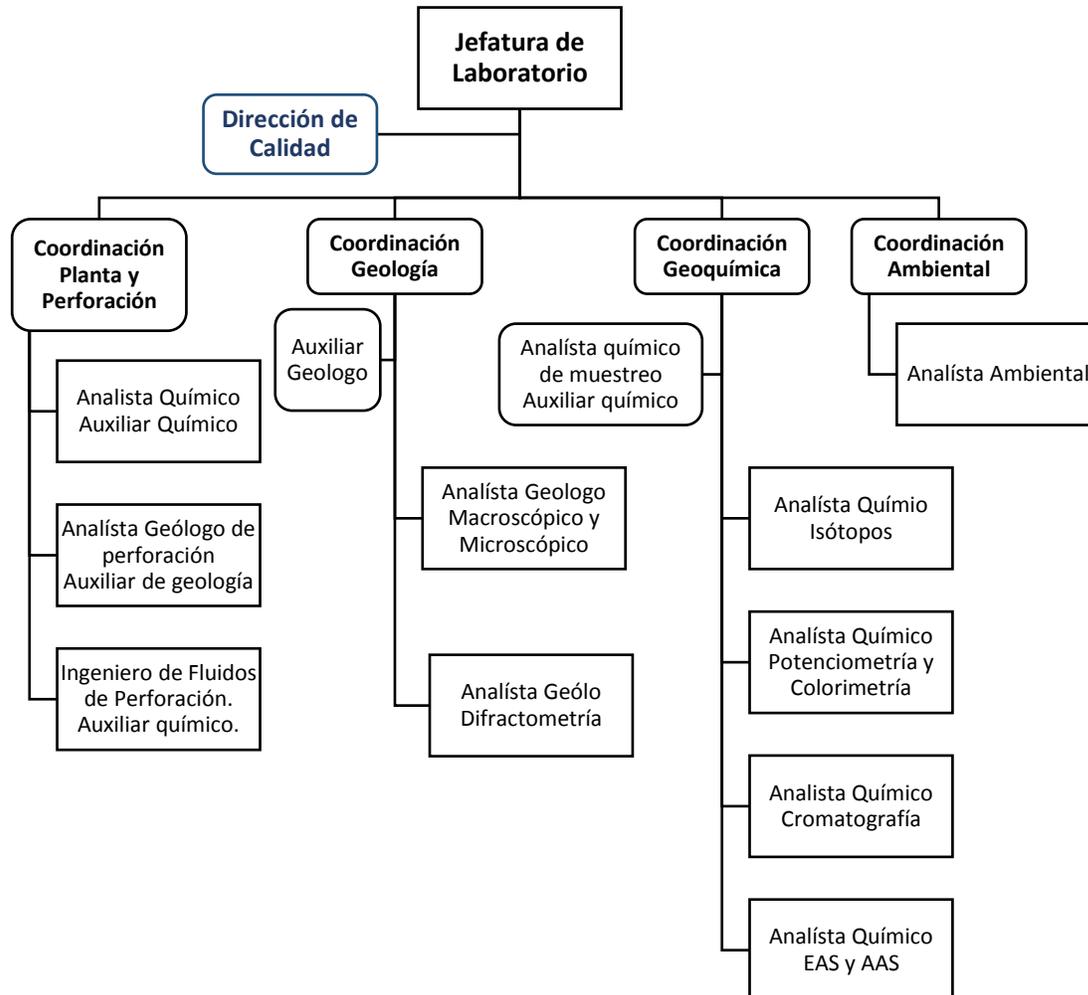


Figura 19. Organigrama referencial para el laboratorio de Geo-ciencias

Funciones principales de un Analista de Químico de Laboratorio:

- Ejecutar análisis físico-químicos, en las diferentes áreas de Laboratorio de acuerdo a la capacitación recibida y a las destrezas desarrolladas en técnicas específicas de análisis, efectuando el control de calidad de los resultados de análisis.
- Elaborar informes de resultados de análisis químicos para entregar al cliente o área solicitada.
- Diseñar, planificar y ejecutar pruebas de validación e implementación de técnicas de análisis químico.

- Comunicar a los clientes los procedimientos de muestreo que se deben efectuar para los diferentes fluidos a analizar y las técnicas que dispone el Laboratorio para su respectivo análisis.
- Solicitar la compra de los reactivos, instrumentos, materiales, repuestos y accesorios requeridos para la ejecución de los análisis específicos de su área.
- Participar en la recepción de bienes y servicios de su área.
- Colaborar en el orden, limpieza y mantenimiento del laboratorio.
- Elaborar el programa de mantenimiento y calibración de los equipos asignados y darle seguimiento.
- Apoyar en las actividades de muestreo cuando sea necesario.
- Elaborar especificaciones técnicas para adquisición de equipos nuevos.

Funciones principales de un Auxiliar de Análisis químico

- En campo, realizar el muestreo de fluidos geotérmicos para su posterior análisis en el Laboratorio.
- Realizar mediciones in-situ de parámetros físico-químicos durante las actividades de muestreo.
- Registrar la información de campo obtenida durante las actividades de muestreo.
- Ejecutar análisis físico-químicos de laboratorio que le sean asignados.
- Preparar, limpiar y dar mantenimiento el material y equipo necesario para realizar los muestreos.

Funciones principales de un Analista Geólogo de Laboratorio:

- Ejecutar análisis macroscópicos, microscópicos y difractómetros, en las diferentes áreas de Laboratorio de acuerdo a la capacitación recibida y a las destrezas desarrolladas en técnicas específicas de análisis, efectuando el control de calidad de los resultados de análisis.
- Elaborar informes de resultados de análisis geológicos para entregar al cliente o área solicitada.
- Diseñar, planificar y ejecutar pruebas de validación e implementación de técnicas de análisis geológico.
- Solicitar la compra de los reactivos, instrumentos, materiales, repuestos y accesorios requeridos para la ejecución de los análisis específicos de su área.
- Participar en la recepción de bienes y servicios de su área.
- Colaborar en el orden, limpieza y mantenimiento del laboratorio.
- Elaborar el programa de mantenimiento y calibración de los equipos asignados y darle seguimiento.
- Apoyar en las actividades de muestreo cuando sea necesario.
- Elaborar especificaciones técnicas para adquisición de equipos nuevos.

Funciones principales de un Auxiliar de Análisis geológico

- En campo, realizar el muestreo de recortes y formaciones geológicas para su posterior análisis en el Laboratorio.

- Realizar mediciones in-situ de parámetros característicos de campo y formaciones geológicas durante las actividades de muestreo.
- Registrar la información de campo obtenida durante las actividades de muestreo.
- Preparación de la muestra geológica de acuerdo a la capacitación recibida y a las destrezas desarrolladas en técnicas específicas.
- Preparar, limpiar y dar mantenimiento el material y equipo necesario para realizar los muestreos y la preparación de muestras

Funciones principales de un Analista Geólogo de Perforación:

- Ejecutar análisis macroscópicos, microscópicos en las diferentes profundidades del desarrollo de campo y perforación geotérmica de acuerdo a la capacitación recibida y a las destrezas desarrolladas, efectuando el control de calidad de los resultados de análisis.
- Elaborar informes de resultados de análisis geológicos, información litológica ,características de las unidades geológicas, tipo de roca, estratigrafía, grado de fracturamiento, mineralogía de alteración hidrotermal, Facies de minerales hidroalterados, niveles arcillosos, correlación de zonas permeables, temperatura estimada, condiciones del pozo.
- Solicitar la compra de los instrumentos, materiales, repuestos y accesorios requeridos para la ejecución de los análisis.
- Participar en la recepción de bienes y servicios de su área.
- Colaborar en el orden, limpieza y mantenimiento del laboratorio.
- Elaborar el programa de mantenimiento y calibración de los equipos asignados y darle seguimiento.
- Apoyar en las actividades de muestreo cuando sea necesario.
- Elaborar especificaciones técnicas para adquisición de equipos nuevos.

Funciones principales de un Analista Ambiental

- Ejecutar monitoreos de ruido, emisiones de H₂S y CO₂ durante la perforación y las operaciones de la planta geotérmica de acuerdo a la capacitación recibida y a las destrezas desarrolladas, efectuando el control de calidad de los resultados de análisis.
- Elaborar informes de resultados de análisis ambientales, adecuados a la legislación ambiental referente y los programas de mitigación y prevención ambiental.
- Trabajar en coordinación con la unidad ambiental.
- Participar en la recepción de bienes y servicios de su área.
- Colaborar en el orden, limpieza y mantenimiento del laboratorio.
- Elaborar el programa de mantenimiento y calibración de los equipos asignados y darle seguimiento.
- Apoyar en las actividades de muestreo cuando sea necesario.
- Elaborar especificaciones técnicas para adquisición de equipos nuevos.

8.2. Requerimientos Económicos

Para evaluar la viabilidad y factibilidad del proyecto, es necesario realizar un análisis económico de los requerimientos necesarios con el objetivo de la implementación del laboratorio de geo-ciencias, como referencia para este análisis se consultó a un laboratorio especializado en el rubro que actualmente brinda los servicios de análisis químico y geológico.

Se planteó 3 escenarios para la evaluación:

El escenario A, Incluye la compra de un espectrómetro de emisión atómica con plasma inducido (EA-ICP), un espectrómetro de masas para análisis de isótopos y un difractor de rayos X; prescindiendo la adquisición de un espectrómetro de Absorción Atómica y de un espectrómetro laser. Este escenario se puede definir como el más exacto¹² y completo en cuantificación de parámetros químicos y geológicos, por sus características tecnológicas requiere una mayor inversión inicial.

El escenario B, Incluye la adquisición de un espectrómetro de Absorción Atómica, Cromatografía iónica, y un espectrómetro laser para el análisis de isótopos estables; prescindiendo de los equipos de ICP, Espectrómetro de masas y difractor de rayos X. Este escenario se puede definir de exactitud necesaria para los análisis químicos y geológicos, sin embargo al prescindir de algunos equipos el tiempo de análisis puede ser mayor.

El escenario C, Incluye prescindir de tituladores automáticos, Difractor de rayos X, Espectroscopio laser, espectrómetro de masas, ICP, Cromatógrafo iónico y equipos portables de exploración geoquímica de campo. Este escenario sería el menos favorable técnicamente debido a una menor exactitud en los análisis y económicamente supondría en la contratación de servicios externos y profesionales.

8.2.1. Precios estimados de Inversión.

La Tabla 10 muestra los precios referenciales para la inversión inicial del proyecto,

Tabla 10. Precios referenciales del equipamiento e instrumentación

	Equipamiento	Precio Referencial (USD)	Escenarios			Referencia
			"A"	"B"	"C"	
PLANTA	1. Infraestructura y Obras civiles					
	Adquisición de terreno	150 000	SI	SI	NO	SIB, 2015
	Obras civiles	245 000	SI	SI	SI	SIB, 2015
	2. Laboratorio de Control de Operaciones					
	Espectrofotómetro UV – VIS.	12 500	SI	SI	SI	TSC 2013
pHmetro digital.	2 500	SI	SI	SI	TSC 2013 (Continua...)	

¹² Exactitud es definido como la sumatoria de las variables de veracidad y precisión en el análisis cuantitativo.

	Equipamiento	Precio Referencial (USD)	Escenarios			Referencia
			"A"	"B"	"C"	
	Conductímetro digital.	3 050	SI	SI	SI	TSC 2013
	Potenciómetro con electrodo de pH.	12 025	SI	SI	NO	TSC 2013
	Destilado de agua.	1 780	SI	SI	SI	TSC 2013
	Desionizador de agua.	5 570	SI	SI	SI	TSC 2013
	Densímetro digital portable.	4 900	SI	NO	NO	TSC 2013
	Balanza analítica.	4 810	SI	SI	SI	TSC 2013
	Balanza semi-analítica.	2 230	SI	SI	SI	TSC 2013
	Bureta digital analítica.	1 630	SI	SI	NO	TSC 2013
	Micropipetas. (X4)	1 850	SI	SI	SI	TSC 2013
	Nitrogenador de muestras.	350	SI	SI	SI	n/a
	Material básico de laboratorio (*)	5 000	SI	SI	SI	C.A.S.A.
PERFORACION	3. Laboratorio de Control de perforación.					
	Microscopio estereoscópico.	3 750	SI	SI	SI	TSC 2013
	Cortadora de muestras.	9 000	SI	SI	SI	SV, 2016
	Pulidora de muestras.	6 000	SI	SI	SI	SV, 2016
	Herramientas para análisis (pinzas, espátula, reglas, pizeta, HCl).	500	SI	SI	SI	SV, 2016
	Densímetro digital.	4 900	SI	SI	NO	TSC 2013
	Equipo de medición de propiedades reológicas.	2 000	SI	SI	SI	YPFB
	pHmetro digital.	400	SI	SI	SI	TSC 2013
	Conductímetro.	400	SI	SI	SI	TSC 2013
GEOLOGIA	4. Preparación de muestras Geológicas					
	Equipo pulidora de muestras.	4 200	SI	NO	NO	SV, 2016
	Equipo cortadora de muestras.	5 000	SI	NO	NO	SV, 2016
	Estufa eléctrica de secado.	1 728	SI	SI	NO	TSC 2013
	Equipo de corte de precisión de muestras.	8 500	SI	NO	NO	SV, 2016
	Pulverizador de muestras.	7 200	SI	NO	NO	SV, 2016
	5. Laboratorio Macroscópico y Microscópico					
	Microscopio estereoscópico.	3 750	SI	NO	NO	TSC 2013
	Microscopio petrográfico de luz polarizada.	6 500	SI	NO	NO	SV, 2016
	6. Laboratorio Difracción Rayos X					
Equipo de difracción de Rayos X	400 000	SI	NO	NO	SV, 2016	
Juego de tamices	500	SI	NO	NO	TSC 2013	
GEOQUIMICA	7. Área de preparación y clasificación de muestras					
	Separadores Vapor-Líquido de muestras. (X2)	3 500	SI	SI	SI	SV, 2016
	Condensadores de serpentín. (X2)	4 000	SI	SI	SI	SV, 2016
	Equipo de ultrasonido para limpieza.	1 000	SI	SI	SI	TSC 2013 (Continua...)

Equipamiento	Precio Referencial (USD)	Escenarios			Referencia
		"A"	"B"	"C"	
Nitrogenador de muestras.	350	SI	SI	SI	n/a
Bomba de vacío.	5 600	SI	SI	SI	TSC 2016
Bomba peristáltica.	1 500	SI	SI	SI	TSC 2016
Embudos de captación de fumarolas.	300	SI	SI	SI	n/a
pHmetro y Conductímetro portable.	2 500	SI	SI	SI	TSC 2013
Brazos muestreadores.	500	SI	SI	SI	n/a
8. Laboratorio General					
Material básico de laboratorio (*).	5 000	SI	SI	SI	C.A.S.A.
Destilador de Agua.	2 500	SI	SI	SI	TSC 2013
Desionizador de agua.	5 750	SI	SI	SI	TSC 2013
Balanza Analítica.	4 810	SI	SI	SI	TSC 2013
Balanza Semi-analítica.	2 230	SI	SI	SI	TSC 2013
Campanas de extracción de gases. (X3)	29 400	SI	SI	SI	TSC 2013
9. Laboratorio de Isotopos					
Espectroscopio Laser	85 000	NO	SI	NO	Sv, 2016
Espectrómetro de masas	350 000	SI	NO	NO	Ec, 2016
10. Laboratorio de Potenciometría y colorimetría					
pHmetro digital.	2 500	SI	SI	SI	TSC 2013
Conductímetro digital.	3 050	SI	SI	SI	TSC 2013
Potenciómetro de electrodo selectivo Amoniaco.	3 800	SI	SI	SI	Ec, 2016
Potenciómetro de electrodo selectivo Sulfuro de Hidrogeno.	17 000	SI	SI	SI	Ec, 2016
Potenciómetro de electrodo selectivo Dióxido de Carbono.	15 000	SI	SI	SI	Ec, 2016
Titulador potenciométrico automático con electrodo de pH.	12 025	SI	SI	SI	Ec, 2016
Titulador potenciométrico automático con electrodo de plata.	13 200	SI	SI	SI	Ec, 2016
Espectrofotómetro UV-VIS.	13 500	SI	SI	SI	Ec, 2016
11. Laboratorio de Emisión y Absorción Atómica					
Espectrómetro de Absorción Atómica (AAS), Acoplado con llama y horno de grafito.	100 000	NO	SI	SI	Ec, 2016
Espectrómetro de Emisión Atómica con plasma acoplado inductivamente (ICP-AES).	220 000	SI	NO	NO	Ec, 2016
12. Laboratorio de Cromatografía					
Cromatógrafo iónico con detector de conductividad eléctrica y membrana de supresión.	75 000	SI	SI	NO	Ec, 2016
Cromatógrafo de gases, con detector de FID y CD.	145 000	SI	SI	SI	Ec, 2016 (Continua...)

	Equipamiento	Precio Referencial (USD)	Escenarios			Referencia
			"A"	"B"	"C"	
	13. Equipos Portables de exploración en campo					
	Equipo portable de análisis de Mercurio.	18 000	SI	SI	NO	SV, 2016
	Equipo portable de análisis de Sulfuro de Hidrogeno.	17 000	SI	SI	NO	SV, 2016
	pHmetro y Conductímetro digital Portable.	3 500	SI	SI	NO	SV, 2016
	Equipo portable de medición de H2S, CO2 (Espectrometría IR, Celda electroquímica).	40 000	SI	SI	NO	SV, 2016
	Equipo portable de medición de Radón y Torón.	15 000	SI	SI	NO	SV, 2016
AMBIENTAL	14. Equipos portables de monitoreo en Campo					
	Equipo de medición de CO2.	15 000	SI	SI	SI	SV, 2016
	Equipo de monitoreo de H2S (corto plazo).	17 000	SI	SI	SI	SV, 2016
	Equipo de monitoreo de H2S (largo plazo con datta logger).	18 000	SI	SI	SI	SV, 2016
	Sonómetro digital.	500	SI	SI	SI	SV, 2016
	15. Servicios Auxiliares y de seguridad					
	Computadores (x5)	8 000	SI	SI	SI	SV, 2016
	Equipos de protección eléctrica	5 000	SI	SI	SI	SV, 2016
	COSTO TOTAL		2 013 538	1 037 988	519 205	
	IMPREVISTOS Y CONTINGENCIAS (Considerado el 15% de la inversión total)		302 031	155 698	77 881	
	COSTO TOTAL GENERAL		2 315 569	1 193 686	597 086	

SIB, 2015: Los costos fueron estimados en base al precio referencial de la Sociedad de Ingenieros de Bolivia, precio de terreno a 150 USD/m2 y obras civiles (350\$/m2)

TSC 2008: Basado en el Catalogo de Thomas Scientific, al precio mostrado en catalogo se le agrego la correlación al mercado de Bolivia

C.A.S.A: Basado en el material de vidrio adquirido por el Laboratorio de Aguas y Saneamiento Ambiental, UMSS en 2015

YPFB: Basado en las adquisiciones para fluidos de perforación de Yacimientos Petrolíferos fiscales Bolivianos

SV, 2016: Basado en las adquisiciones de un laboratorio de Geotermia en El Salvador

Ec, 2016: Basado en las adquisiciones de un laboratorio de Geotermia en Ecuador

8.2.2. Costos referenciales para el funcionamiento

La estimación de los costos referencial está estimado para el desarrollo geotérmico a nivel de exploración en las áreas de Empexa y Sajama; a nivel de producción para Laguna Colorada, con una planta de 4 unidades generadoras para un total de 100 MWe y una planta piloto de 5 MWe, perforación de 25 pozos entre productores, re-inyectores, fallidos y futuros pozos de reposición, la Tabla 11 muestra la estimación sugerida para el funcionamiento del laboratorio de geo-ciencias.

Tabla 11. Costos referenciales para el funcionamiento del laboratorio de Geo-Ciencias

ITEM	Detalle de Costos	Costo Referencial por Escenarios (USD / año)		
		A	B	C
Costos Administrativos y de Operación	Personal y Recursos Humanos Jefe de Laboratorio (x1) Analistas Químicos, Geológico, Ambiental (x8) Auxiliar de laboratorio (x3)	225 000	213 750	157 500
	Costos de Operación (*) Transporte y Logística Mano de Obra indirecta Otros costos de Operación	20 000	20 000	20 000
	Costos de Suministros Energía Eléctrica Agua Otros	12 000	12 000	12 000
	Costos de Administración Materiales y suministros de administración Gastos generales de administración	5 000	5 000	5 000
Área Geoquímica	Reactivos y Consumibles	12 000	9 000	8 000
	Mantenimiento Instalación	9 000	7 000	6 000
	Mantenimiento Equipos	25 000	17 000	15 000
Área Geología	Reactivos y Consumibles	8 000	7 000	6 000
	Mantenimiento Equipos	7 000	6 000	5 000
Área Ambiental	Mantenimiento Equipos	10 000	10 000	10 000
TOTAL COSTOS ANUALES		333 000	306 750	244 500

(*) Para los costos de operación viajes logísticos bimestrales hacia la planta geotérmica, contratación de mano de obra indirecta local para la colaboración a los muestreos

8.2.3. Costo de servicio en laboratorios externos

Actualmente en Bolivia no existe un laboratorio especializado en geotermia que pueda cubrir el servicio externo; a nivel de Latinoamérica se consultó a un laboratorio especializado en El Salvador (ver ANEXO II), los costos del servicio son variables y se resume en la Tabla 12, este indicador nos ayudará a estimar los costos de servicios ofertados.

Tabla 12. Costos referenciales de servicio de análisis geoquímico en un laboratorio externo.

ITEM	Detalle de Costos	Costo Referencial (USD)	Costo Estimado para cada Escenario en (USD / año)		
			A	B	C
GEOQUÍMICA (*)	Pozos Productores con Separador ciclónico individual (6):	37 500	266 500	266 500	195 000
	Gases: He, H2, Ar, O2, N2, CH4, CO, CO2, NH3 y H2S.				
	En la fase vapor: Na, K, Ca, Mg, Li, Fe, Cl, SO4, HCO3, SiO2, B, F, TDS, pH, C.E.				
	En la fase líquida: Na, K, Ca, Mg, Li, Fe, Al, As, Cl, SO4, H2S, HCO3/CO3, SiO2, B, F, NH3, TDS, pH, C.E.				
	Pozos Productores en Cabezal (4):				
	Gases: He, H2, Ar, O2, N2, CH4, CO, CO2, NH3 y H2S.				
	En la fase líquida: Na, K, Ca, Mg, Li, Fe, Al, As, Cl, SO4, H2S, HCO3/CO3, SiO2, B, F, NH3, TDS, pH, C.E.				
	Salmuera de Reinyección (1)				
	En la fase líquida: Na, K, Ca, Mg, Li, Fe, Al, As, Cl, SO4, HCO3/CO3, SiO2 total y monomérica, B, F, TDS, pH, C.E.				
	Separador de Humedad				
	Gases: He, H2, Ar, O2, N2, CH4, CO, CO2, NH3 y H2S.				
	Vapor geotérmico: Na, K, Ca, Cl, SiO2, B, SO4, Fe, TDS, pH y C.E.				
Gases Difusos (1 sondeo)	75 000	150 000	150 000	-	
Toma y medición de datos					
GEOLOGÍA (**)	Control de la perforación (por día)	1 890	170 100	170 100	170 100
	Macroscopía y petrografía de la perforación				
	Difractometría de Rayos X (por muestra)	140	42 000	-	-
Caracterización cristalográfica					
COSTO TOTAL			628 600	586 600	365 100

(*) Se considera un escalamiento de 7 con una periodicidad de 4 veces al año, costos de envío a 10000 USD y dos sondeos de geoquímicos línea base.

(**) Se considera la perforación de un pozo de reposición anualmente, se considera aproximadamente 300 muestras por año.

Para la evaluación financiera, estos costos se serían igual a los ingresos anuales del laboratorio.

8.2.4. Evaluación Financiera

Para el análisis económico y la evaluación financiera primeramente se considera la contratación de todos los servicios del análisis químico por parte de un laboratorio externo; seguido de la propuesta de implementación considerando la vida útil de la inversión en 10

años. La evaluación financiera nos presenta la factibilidad económica del proyecto, se realizó el análisis para los 3 escenarios considerando una inflación de la proyección de costos e ingresos de entre 4% a 6% anualmente¹³, tampoco se consideraron los impuestos debido a ser un servicio interno el desarrollo geotérmico de Bolivia, los resultados se presentan de manera resumida en la Tabla 13 y de manera amplia en los ANEXOS III, IV, V y VI.

Tabla 13. Resumen de indicadores financieros

Descripción	SIN LABORATORIO	Escenario "A"	Escenario "B"	Escenario "C"
Inversión Inicial [USD]	0	2 315 569	1 366 186	878 835
V.A.N. (10%) [USD]	- 4 207 099	- 66 848	711 743	- 308 638
T.I.R. (%)		9.40%	19.94%	-0.86%
B/C		0.99	0.91	0.76

Se puede observar que el único escenario factible¹⁴ es el "B", con una recuperación de la inversión inicial entre el sexto y séptimo año de servicio.

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se evaluó los requisitos necesarios para la implementación de un laboratorio de Geo-Ciencias especializado en geotermia en Bolivia; que dará soporte en las diferentes etapas del desarrollo geotérmico desde la exploración superficial hasta la operación y mantenimiento. Esta implementación permitirá una autosuficiencia en la obtención de datos, además de un manejo óptimo y eficiente de los reservorios geotérmicos en Bolivia.
- Se definieron las fases del desarrollo geotérmico, estudios, controles, mitigaciones y optimizaciones en donde será necesario contar con el análisis químico y geológico como parte de los requerimiento técnicos del proyecto, se puede observar una gran demanda de estos servicios, actualmente no existe un laboratorio que ofrezca servicios de análisis especializado en geotermia en Bolivia, esto hace que exista una necesidad prioritaria para la implementación del mismo.
- Inicialmente se concluye que existe una necesidad técnica de contar con los servicios de un laboratorio en Bolivia; para definir la forma óptima de implementación

¹³ Datos obtenidos del Banco Mundial a través del Fondo Monetario Internacional:
<http://datos.bancomundial.org/indicador/FP.CPI.TOTL.ZG?end=2015&locations=BO&start=1994>

¹⁴ Se considera una rentabilidad mínima esperada de la inversión (TIR) del 12.57% como factible económicamente (Ministerio de Planificación y desarrollo).

se realizó un análisis económico considerando tres escenarios. Es importante mencionar que los precios estimados para la evaluación financiera son referenciales y fueron basados en actividades de otros laboratorios en el rubro e indicadores del Banco Mundial.

- Considerando la No factibilidad económica de los escenarios “A” y “C”, la implementación del laboratorio de Geo-Ciencias no puede ser considerado económicamente como una herramienta de generación de utilidades, más al contrario se define como un “gasto” necesario para el desarrollo geotérmico del país que debe ser absorbido dentro de las utilidades por generación de energía eléctrica, es decir que debido a la necesidad técnica de contar con los servicios de análisis químico-geológico y al no disponer con un laboratorio especializado en geotérmica en Bolivia, es muy recomendable técnicamente la implementación del mismo.
- El escenario “B”, en resumen es un laboratorio que permite satisfacer las necesidades técnicas del sistema geotérmico, prescindiendo de equipos de alta tecnología, cuenta con una inversión inicial de aproximadamente USD 1 400 000, con una recuperación de la inversión entre el sexto y séptimo año y una tasa interna de retorno (T.I.R.) del 19.94%; estos indicadores concluyen que es un escenario factible económicamente y a la vez ofrece una ventaja importante comparando con el envío de muestras para su análisis al exterior o la contratación de servicios externos.
- Una de las mayores ventajas para la implementación del laboratorio de Geo-ciencias es la autosuficiencia en el control, seguimiento y operación del desarrollo geotérmico; al prescindir de los servicios externos, se logra la formación continua del personal en geotermia, la generación de empleos directos e indirectos, la confidencialidad, eficiencia y confiabilidad de los resultados.
- Uno de los mayores retos para la implementación del laboratorio, será la capacitación del personal técnico y la fuente de financiamiento, como se explicó en el punto 7. Metodología, existen procedimientos y técnicas de análisis químicos-geológicos que son diferentes para el rubro de la geotermia a los métodos clásicos de análisis, como por ejemplo análisis de aguas o petrografía de minerales no alterados hidrotermalmente. Es recomendable buscar fuentes de cooperación o programas de capacitación en geotermia para lograr una competencia técnica, transferencia de conocimientos y tecnología al personal que estará a cargo del laboratorio.

10. AGRADECIMIENTOS

Primeramente quiero agradecer a Dios por brindarme la oportunidad de superarme personalmente y bendecirme con la vida, mis amigos y mi familia; ¡Gracias por siempre estar conmigo!

No temas, porque yo estoy contigo; no desmayes, porque yo soy tu Dios que te esfuerzo; siempre te ayudaré, siempre te sustentaré con la diestra de mi justicia. (Isaías 41:10)

A mi amada familia, mis padres Emilio y Mireya que son mi fuente de ejemplo y enseñanzas para mi realización personal.

Un agradecimiento muy especial a Vannya Mendiola con quien encontré algo más de una linda amistad, por apoyarme en cumplir este reto.

Al personal integrante de la Universidad de las Naciones Unidas (UNU-GTP), Fondo Nórdico Para el Desarrollo (NFD), Universidad de El Salvador (UES), LaGeo, por la excelente capacitación recibida, por no escatimar esfuerzos para ofrecernos una estadía bonita y confortable en El Salvador.

A mi tutor, Edwin Melara y el equipo del laboratorio químico por las enseñanzas, ayuda y la colaboración brindada para realizar el proyecto.

A la Empresa Nacional de Electricidad (ENDE) y mis compañeros del Proyecto Geotérmico Laguna Colorada, por confiar y postular a mí persona para recibir la capacitación.

A mis compañeros y amigos del diplomado y de mi país Bolivia.

11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ármannsson, H. & Ólafsson, M., 2007. *Geothermal sampling and analysis*, Lake Naivasha, Kenya: Short Course II on Surface Exploration for Geothermal Resources, UNU-GTP and KenGen.

Ármannsson, H. & Ólafsson, M., 2010. *Collection of geothermal fluids for chemical analysis*, Lake Bogoria and Naivasha, Kenya.: Short Course V on Exploration for Geothermal Resources; UNU-GTP, KenGen and GDC.

Arnórsson, S. y otros, 2006. Sampling and Analysis of Geothermal Fluids. *Geofluids*, Volume 6, Issue 3., pp. 203-216.

Arnórsson, S., Stefánsson, A. & Bjarnason, J. Ö., 2007. Fluid-Fluid Interaction in Geothermal Systems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, Vol 65, pp. 1-54.

Bona, P. & Coviello, M. F., 2016. *Valoración y gobernanza de los proyectos geotérmicos en América del Sur.*, Santiago, Chile.: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

Carrasco, 1975. *Recursos Geotérmicos en Bolivia. Proyecto de prospección minera en la Cordillera.*, La Paz. Bolivia: Servicio Geológico de Bolivia..

Delgadillo Terceros, Z., 2000. *State of Geothermal Resources in Bolivia. Laguna Colorada Project.* Kyushu-Tohoku, Japan: World Geothermal Congress.

Eshaghpour, M., 2003. Borehole Geology and Alteration Mineralogy of well HE-9 In Hellisheidi Geothermal Field, SW-Iceland. *GEOTHERMAL TRAINING PROGRAMME*, Number 8, pp. 165-186.

ESMAP, 2012. *Handbook on Planning and Financing Geothermal Power Generator. Main Findings and Recommendations.*, Washington D.C.: The World Bank.

GEOBOL, E. -, 1976. *Evaluación primaria de los recursos geotérmicos en Bolivia*, Cochabamba: ENDE - GEOBOL.

Giggenbach, W. F., 1991. Chemical techniques in geothermal exploration. *Applications of geochemistry in geothermal reservoir development UNITAR/UNDP*, pp. 119-142.

Guijarro, Y., 2014. *Requisitos técnicos y económicos necesarios para efectuar la implementación de un laboratorio geoquímico en Ecuador.*, San Salvador, El Salvador.: Universidad de El Salvador, F.I.A., Unidad de postgrados.

Harvey, D., 2000. *MODERN ANALYTICAL CHEMISTRY*. s.l.:McGraw-Hill Higher Education.

Marini, L., 2004. *Geochemical techniques for the exploration and exploitation of geothermal energy*, Viareggio, Italia.: Consultant in Applied Geochemistry.

Monroy, A., 2016. *Phases of Geothermal Development*, Santa Tecla, El Salvador: SDG Short Course I on Sustainability and Environmental Management of Geothermal Resource Utilization and the Role of Geothermal in Combating Climate Change; UNU-GTP and LaGeo.

Muthoni, L., 2012. *Geological Field mapping*, Lake Bogoria and Lake Naivasha, Kenya.: Short Course VIII on Exploration for Geothermal Resources, UNU-GTP, GDC and KenGen.

Ólafsson, M., 1988. *Sampling methods for geothermal fluid and gases*, Reykjavik, Iceland.: Orkustofnun report, OS-88041.

Quezada, A., 2015. *Geological field mapping for geothermal explartion*, Santa Tecla, El Salvador.: Short Course VII on Surface Exploration for Geothermal Resources, UNU-GTP and LaGeo.

Rubinson, K. & Rubinson, J., 2001. *Análisis Instrumental*. Primera ed. Madrid, España.: Pearson Educación.

Sheppard, D. & Giggenbach, W., 1985. *Methods for the analysis of geothermal and volcanic waters and gases*, New Zealand.: Department of Scientific and Industrial Research.

Simmons, S., 1998. Geochemistry lecture notes. *Geothermal Institute, The University of Aucland, Vol 18*, pp. 1-78.

Skoog, D. A., Holler, F. J. & Crouch, N. T. A., 2001. *Principios del Análisis Instrumental*. Quinta ed. Madrid, España: McGraw-Hill.

Skoog, D., West, D., Holler, J. & Crouch, S., 2005. *Fundamentos de Química Analítica*. Octava ed. México: International Thomson Editores.

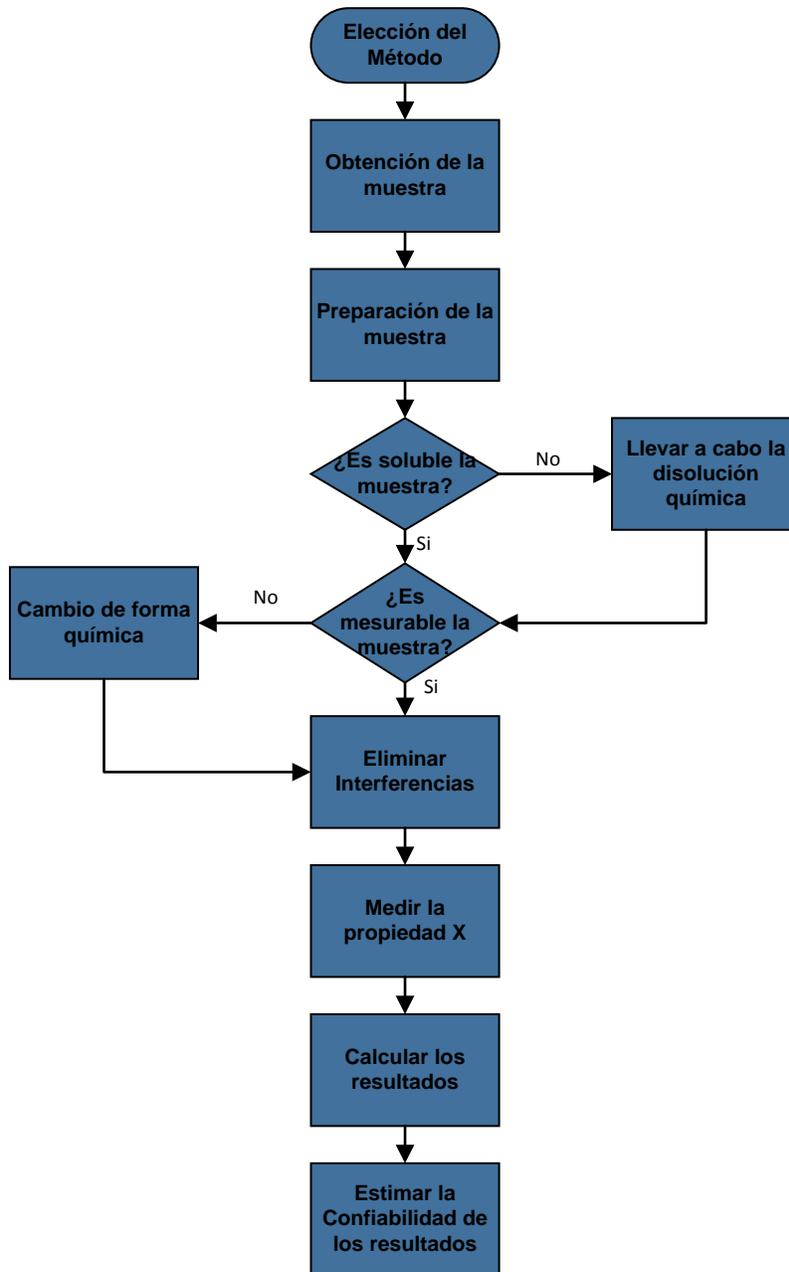
Steingrímsson, B. & Gudmundsson, Á., 2006. *GEOHERMAL BOREHOLE INVESTIGATIONS DURING AND AFTER DRILLING*, San Salvador, El Salvador.: Workshop for Decision Makers on Geothermal Projects in Central America, UNU-GTP.

Villarroel, D., 2014. *Geothermal Development in Bolivia. Documento presentado en: "Short Course VI on Utilization of Low- and Medium Enthalpy Geothermal Resources and Financial Aspects of Utilization"*, Santa Tecla, El Salvador.: UNU-GTP y LaGeo S.A. de C.V..

Zhong-he, P. & Ámannsson, H., 2005. *Analytical Procedures and Quality Assurance for Geothermal Water Chemistry*, Beijing and Reykjavik: United Nations University, Geothermal Training Programme.

12. ANEXOS

ANEXO I. Diagrama de flujo que muestra los pasos del análisis cuantitativo (Skoog, et al., 2005)



ANEXO II. Cotización de costos servicios externos

06 de Diciembre de 2016

Cotización No. 2016-000

Señores
Diplomado Geotermia /UES
Presente.

Atención: Ing. Yerko Figueroa

Estimados Señores

Atentamente sometemos a su consideración nuestra oferta para el servicio de muestreo y análisis de laboratorio para caracterización química de 6 (seis) pozos productores y sus respectivos separadores ciclónicos, 4 (cuatro) pozos productores en cabezal, 1 punto de salmuera de reinyección y vapor en un separador de humedad en Campo.

1. OFERTA TÉCNICA

La presente oferta comprende actividades de muestreo y análisis químicos en fluidos geotérmicos, tal como se detallan a continuación:

Pozos Productores con Separador ciclónico individual (6):Gases: He, H₂, Ar, O₂, N₂, CH₄, CO, CO₂, NH₃ y H₂S.En la fase vapor: Na, K, Ca, Mg, Li, Fe, Cl, SO₄, HCO₃, SiO₂, B, F, TDS, pH, C.E.En la fase líquida: Na, K, Ca, Mg, Li, Fe, Al, As, Cl, SO₄, H₂S, HCO₃/CO₃, SiO₂, B, F, NH₃, TDS, pH, C.E.**Pozos Productores en Cabezal (4):**Gases: He, H₂, Ar, O₂, N₂, CH₄, CO, CO₂, NH₃ y H₂S.En la fase líquida: Na, K, Ca, Mg, Li, Fe, Al, As, Cl, SO₄, H₂S, HCO₃/CO₃, SiO₂, B, F, NH₃, TDS, pH, C.E.**Salmuera de Reinyección (1)**En la fase líquida: Na, K, Ca, Mg, Li, Fe, Al, As, Cl, SO₄, HCO₃/CO₃, SiO₂ total y monomérica, B, F, TDS, pH, C.E.**Separador de Humedad**Gases: He, H₂, Ar, O₂, N₂, CH₄, CO, CO₂, NH₃ y H₂S.Vapor geotérmico: Na, K, Ca, Cl, SiO₂, B, SO₄, Fe, TDS, pH y C.E.

2. OFERTA ECONÓMICA

La oferta es de **TREINTA Y DOS MIL SETECIENTOS CINCUENTA DÓLARES AMERICANOS (US\$ 32,750.00)** que incluye los servicios de análisis y muestreo.

Los precios ofertados son netos y no incluyen impuestos, deducciones, ni gastos de transferencia.

3. FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS

Fecha de entrega de resultados: **Máximo 15 días** hábiles después de recibidas las muestras en el laboratorio.

4. CONDICIONES DE PAGO: Crédito 30 días

Detalle de procedimiento a seguir para completar el pago es enviado una vez sea aceptada la oferta.

5. ACREDITACIÓN DE LA CALIDAD

El Laboratorio cuenta con certificado de acreditación para 26 técnicas de análisis: Cloruros, Alcalinidad, pH y Conductividad Eléctrica potenciométrica, Arsénico, sodio, potasio, calcio, magnesio y litio por llama, Arsénico por llama y horno de grafito, Boro llama, Boro método del carmín, Boro método de curcumina, Mercurio Generador de Hidruros, Plomo Horno de Grafito, Aluminio Horno de Grafito, Gases no Condensables por Cromatografía de Gases (Helio, Hidrogeno, Argón, Oxígeno, Nitrógeno, Monóxido de Carbono y Metano), Dióxido de Carbono en gases condensables, Aniones por Cromatografía Iónica (Fluoruros, Cloruros, Bromuros, Nitratos, Nitritos, Fosfatos y Sulfatos), sulfatos, sílice total y sílice monomérica por espectrofotometría UV/VIS, sólidos totales disueltos por gravimetría. Los análisis están acreditados para muestras de gases, agua geotérmica, superficial, residual y potable ante el Organismo Salvadoreño de Acreditación.

6. VALIDEZ DE LA OFERTA.

Los precios ofertados son mantenidos durante treinta días. Se garantiza absoluta confidencialidad de sus resultados. En espera que nuestra oferta sea de su completa satisfacción y poder brindarles nuestros servicios.

Cordialmente,



Lic. José Tenorio Mejía
Coordinador Laboratorio Químico
e-mail: jtenorio@lageo.com.sv



C.C. archivo de laboratorio.

ANEXO III. Evaluación Financiera para el proyecto sin la implementación del laboratorio de Geo-ciencias.

FLUJO DE CAJA PARA EL CALCULO DE INDICADORES FINANCIEROS

(Expresado en USD)

DESCRIPCION	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. INGRESOS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Servicios			-	-	-	-	-	-	-	-	-
Inflación de oferta de servicios			-	-	-	-	-	-	-	-	-
Recuperación del K trabajo											
2. EGRESOS	-	586 600	610 422	635 211	661 007	687 850	715 784	744 852	775 101	806 577	839 332
- Inversiones Totales											
- Costos de Operación Total		586 600	586 600	610 422	635 211	661 007	687 850	715 784	744 852	775 101	806 577
Inflación en los costos de operación			23 822	24 789	25 796	26 843	27 934	29 068	30 248	31 477	32 755
FLUJO NETO (1-2)	-	-586 600	- 610 422	- 635 211	- 661 007	-687 850	- 715 784	-744 852	- 775 101	-806 577	-839 332

VAN (10%)=	-4207100
TIR =	
B/C =	0

ANEXO IV. Evaluación Financiera para el proyecto en el Escenario “A”

FLUJO DE CAJA PARA EL CALCULO DE INDICADORES FINANCIEROS

(Expresado en USD)

DESCRIPCION	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. INGRESOS	-	628 600	654 127	680 692	708 334	737 100	767 034	798 183	830 597	864 328	1 233 178
Servicios		628 600	628 600	654 127	680 692	708 334	737 100	767 034	798 183	830 597	864 328
Inflación de oferta de servicios			25 527	26 564	27 643	28 765	29 934	31 149	32 414	33 731	35 100
Recuperación del K trabajo											333 750
2. EGRESOS	2 315 569	333 000	346 523	360 595	375 239	390 478	406 335	422 836	440 008	457 876	476 471
- Inversiones Totales	2 315 569										
- Costos de Operación Total		333 000	333 000	346 523	360 595	375 239	390 478	406 335	422 836	440 008	457 876
Inflación en los costos de operación			13 523	14 072	14 644	15 238	15 857	16 501	17 171	17 869	18 594
FLUJO NETO (1-2)	- 2 315 569	295 600	307 604	320 096	333 095	346 622	360 699	375 347	390 589	406 451	756 707

VAN (10%)=	-66848
TIR =	9.40%
B/C =	0.9858

ANEXO V. Evaluación Financiera para el proyecto en el Escenario “B”

FLUJO DE CAJA PARA EL CALCULO DE INDICADORES FINANCIEROS (PROYECTO PURO)

(Expresado en USD)

DESCRIPCION	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. INGRESOS	-	586 600.0	610 421.8	635 211.1	661 007.0	687 850.5	715 784.1	744 852.1	775 100.5	806 577.3	1 023 082.5
Servicios		586 600.0	586 600.0	610 421.8	635 211.1	661 007.0	687 850.5	715 784.1	744 852.1	775 100.5	806 577.3
Inflación de oferta de servicios (*)			23 821.8	24 789.2	25 795.9	26 843.5	27 933.6	29 068.0	30 248.4	31 476.8	32 755.1
Recuperación del K trabajo											183 750.0
2. EGRESOS	1 366 186.2	306 750	319 207	332 170	345 660	359 697	374 304	389 505	405 322	421 782	438 911
- Inversiones Totales	1 366 186.2										
- Costos de Operación Total		306 750	306 750	319 207	332 170	345 660	359 697	374 304	389 505	405 322	421 782
Inflación en los costos de operación			12 457	12 963	13 489	14 037	14 607	15 200	15 818	16 460	17 129
FLUJO NETO (1-2)	- 1 366 186.2	279 850	291 215	303 041	315 347	328 154	341 480	355 348	369 778	384 795	584 171

VAN (10%)=	711744
TIR =	19.94%
B/C =	0.9143

ANEXO VI. Evaluación Financiera para el proyecto en el Escenario “C”

FLUJO DE CAJA PARA EL CALCULO DE INDICADORES FINANCIEROS (PROYECTO PURO)

(Expresado en USD)

DESCRIPCION	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. INGRESOS	-	365 100.0	379 926.7	380 528.8	380 553.3	380 554.3	380 554.3	380 554.3	380 554.3	380 554.3	380 554.3
Servicios		365 100.0	365 100.0	365 100.0	365 100.0	365 100.0	365 100.0	365 100.0	365 100.0	365 100.0	365 100.0
Inflación de oferta de servicios			14 826.7	15 428.8	15 453.3	15 454.3	15 454.3	15 454.3	15 454.3	15 454.3	15 454.3
Recuperación del K trabajo											
2. EGRESOS	878 835.8	244 500	254 429	264 762	275 513	286 702	298 345	310 461	323 069	336 188	349 841
- Inversiones Totales	878 835.8										
- Costos de Operación Total		244 500	244 500	254 429	264 762	275 513	286 702	298 345	310 461	323 069	336 188
Inflación en los costos de operación			9 929	10 332	10 752	11 189 ¹¹	11 643	12 116 ¹²	12 608	13 120	13 653
FLUJO NETO (1-2)	- 878 835.8	120 600	125 498	115 767	105 040	93 852	82 209	70 093	57 486	44 366	30 713

VAN (10%)=	-308638
TIR =	-0.86%
B/C =	0.7610