



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Optimización de la Metodología para medir el Flujo de Calor en Superficie en un Sitio Geotérmico

INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES

Que para obtener el título de
Ingeniera Geofísica

P R E S E N T A

Cecilia Rodríguez Gómez

ASESOR DE INFORME

Gerardo Cifuentes Nava



Ciudad Universitaria, CDMX, 2016

Resumen	3
Abstract	4
1. Introducción	5
2. Objetivos	5
3. Geotermia	7
3.1. <i>Geotermia en México</i>	9
3.2 <i>Geotermia en Nueva Zelanda</i>	10
3.3 <i>Sistemas Geotérmicos</i>	11
3.3.1 Sistema Hidrotermal	12
3.3.2 Sistema Volcánico	12
3.3.3 Sistema Volcánico-Hidrotermal	12
3.3.4 Sistema de Roca Caliente	13
3.3.5 Sistema en Zona de Fractura	14
3.3.6 Sistemas en el Marco Tectónico	14
3.4 <i>Componentes de un Sistema Geotérmico</i>	15
3.4.1 Manifestaciones Geotérmicas	16
3.5 <i>Exploración Geotérmica</i>	19
3.6 <i>Flujo de Calor</i>	20
3.6.1 Teoría para medir el Flujo de Calor en un Sitio Geotérmico	21
3.6.2 Flujo de Calor usando Calorímetros	22
4. Metodología	27
4.1 <i>Definición del problema</i>	27
4.2 <i>Calorímetro</i>	28
4.2.1 Diseño y Construcción	28
4.2.2 Materiales	29
4.2.3 Calibración y Mediciones	31
4.3 <i>Desecante</i>	34
4.3.1 Selección de Material y Pruebas	35
5. Caso Práctico	38
5.1 <i>Localización y Geología (Karapiti, Cráteres de la Luna)</i>	38
6. Resultados	41
6.1 <i>Calorímetro</i>	41
6.2 <i>Desecante</i>	43
6.3 <i>Correlación</i>	44
7. Conclusiones	45
Bibliografía	47
Anexos	49
<i>Anexo 1. Manual de Campo</i>	49
<i>Anexo 2. Datos técnicos equipo.</i>	50
<i>Anexo 3. Fotos del Equipo</i>	51
<i>Anexo 4. Equipo de Campo</i>	52
Glosario	54

Resumen

El siguiente documento presenta un estudio de investigación ingenieril sobre el diseño y optimización de un equipo no invasivo que lleve a cabo mediciones de estimación preliminar del potencial geotérmico de un sitio. El estudio incluye el planteamiento teórico, la calibración y evaluación en laboratorio y finalmente su uso en campo.

El equipo mide los flujos de calor convectivo y conductivo de un sitio, utilizando el vapor de agua que fluye a superficie y el calor que el sistema geotérmico propaga en la superficie de la tierra por procesos conductivos.

Fue probado y calibrado en laboratorio para posteriormente ser usado en campo. El equipo es sencillo y de bajo costo, lo cual permite la reducción de costos y de tiempo en la exploración, dando datos confiables para avanzar en el conocimiento del potencial geotérmico, y así proceder a otros estudios mas detallados que lleven a la posible explotación y entendimiento a profundidad del sitio.

Abstract

The following document presents a study of engineering research on the design and optimization of a non-invasive equipment that carries out preliminary estimations of geothermal potential. The study includes the theoretical approach, calibration, evaluation in the laboratories and finally their use at field.

The equipment measures convective and conductive heat from a site, using water vapor flowing to surface and heat which propagates from the geothermal system into soil by conductive processes.

It was tested and calibrated in the laboratory to subsequently be used in the field. The equipment is simple and inexpensive, which allows the reduction of costs and time in exploration, giving reliable data to facilitate the understanding of geothermal potential, and then proceed with other studies for its possible exploitation and better understanding of the site.

1. Introducción

La medición de manifestaciones termales en un sitio para una evaluación de su potencial geotérmico es de suma importancia. Puede ser realizada de diversas formas y se compone de distintos pasos que comúnmente se llevan a cabo cronológicamente. Una de las primeras etapas es calcular su potencial geotérmico en base al flujo de calor que se presentan en la superficie del sitio. Este cálculo es primordial para la correcta explotación del recurso.

Medir el flujo de calor para conocer el potencial, es el punto de inflexión para decidir los siguientes métodos de exploración geológica, geofísica y geoquímica. Las manifestaciones en superficie como fumarolas y agua caliente, entre otras, son parte de la pérdida de calor de un reservorio, una gran parte se ve también en los suelos calientes donde el vapor emerge a superficie.

Esta transferencia de calor que ocurre de forma conductiva y convectiva, es cuantificada en la exploración de sitios geotérmicos, pero mejores equipos y metodologías son requeridas para la obtención de números más precisos. Por lo que durante este proyecto se investigaron con éxito desde las bases teóricas hasta su creación y utilización en campo un calorímetro y un desecante para la medición exclusiva del calor convectivo. Este nuevo calorímetro y desecante están ahora incorporados en el equipo que lleva la compañía GNS Science a estudios exploratorios de campo en lugares geotérmicos.

2. Objetivos

Ocupando la posición de asistente de geofísico en GNS Science por 6 meses, se trabajó principalmente en un proyecto relacionado con flujo de calor, mejorando el diseño del equipo a través de la profundización teórica, proponiendo y probando nuevos materiales y metodologías para posteriormente elaborar nuevos equipos. Dichos equipos se probaron de manera exhaustiva en laboratorio, y después en campo. También se manejó software básico para el tratamiento elemental de los datos y

planeación de estudios geofísicos (Excel Microsoft, Word Microsoft, GIS, BaseCamp). Se puso a práctica los conocimientos de planeación para levantamientos geofísicos, desde la selección de puntos hasta llevar a cabo el estudio en campo. Así como comprobar el correcto funcionamiento del equipo geofísico previo a su utilización, realizando pruebas y calibraciones del mismo con el fin de ejecutar exploración geofísica (TEM, Gravedad, Potencial Natural).

Dentro del proyecto se ahondo en el entendimiento de procesos físicos y químicos ocurrientes dentro de un sistema geotérmico, enfocándonos primordialmente en los cercanos a la superficie, para así lograr la elaboración de un equipo confiable que permita el cálculo de la pérdida de calor del reservorio y por tanto una aproximación de su potencial geotérmico para una posible utilización. Realizar mediciones de campo para comprobar que el equipo probado en laboratorio esta midiendo lo que se buscaba.

La empresa GNS Science es una compañía Neozelandesa iniciada hace más de 150 años, comenzando en 1865 con el nombre de New Zealand Geological Survey, pasando por distintos nombres hasta su actual nombre GNS Science. Desde entonces y hasta ahora proporciona servicios de consultoría e investigación en temas relacionados con las ciencias de la Tierra, la abundancia de isotopos y otros temas relacionados. Esto se logra aplicando conocimientos científicos desde la escala atómica hasta la planetaria, para crear riqueza, proteger el ambiente y mejorar la calidad de vida de las personas a nivel nacional e internacional.

Forman parte de proyectos y colaboraciones con entidades de distintos países, dando servicios de consultoría, entrenamiento y divulgación alrededor de los temas a los que están dedicados. Estos temas abarcan energía y recursos, ambiente y materiales, peligros naturales, también tienen otros servicios como los de análisis de laboratorio, productos y software. GNS Science tiene su base en la ciudad de Wellington capital de Nueva Zelanda, adicionalmente cuenta con otros dos institutos ubicados en las ciudades de Nueva Zelanda, Taupo e Invercargill. Dentro de sus servicios también reciben estudiantes de grado, posgrado e internos de 3 a 6 meses.

3. Geotermia

La energía geotérmica esta presente en todo el planeta en el subsuelo, pero los lugares de más altas temperaturas a menores profundidades se localizan en lugares particulares ya sea en el contacto entre placas (Figura 2), o en los llamados “puntos calientes” que son anomalías no necesariamente ubicadas en los bordes de las placas. En estos lugares se pueden extraer cantidades considerables de calor de manera económica, (Duffield & Sass, 2003).

Estas regiones con un flujo de calor alto están relacionadas a volcanes ya que mucho del magma que alimenta a los volcanes en realidad no sale a superficie y se queda en la corteza, donde distintos eventos geológicos entre ellos sismos, pueden generar la fracturación de rocas y con ello la circulación de agua, estos sistemas son llamados de convección. En ellos el vapor que se puede extraer se utiliza para mover turbinas que generan energía eléctrica (Duffield & Sass, 2003).

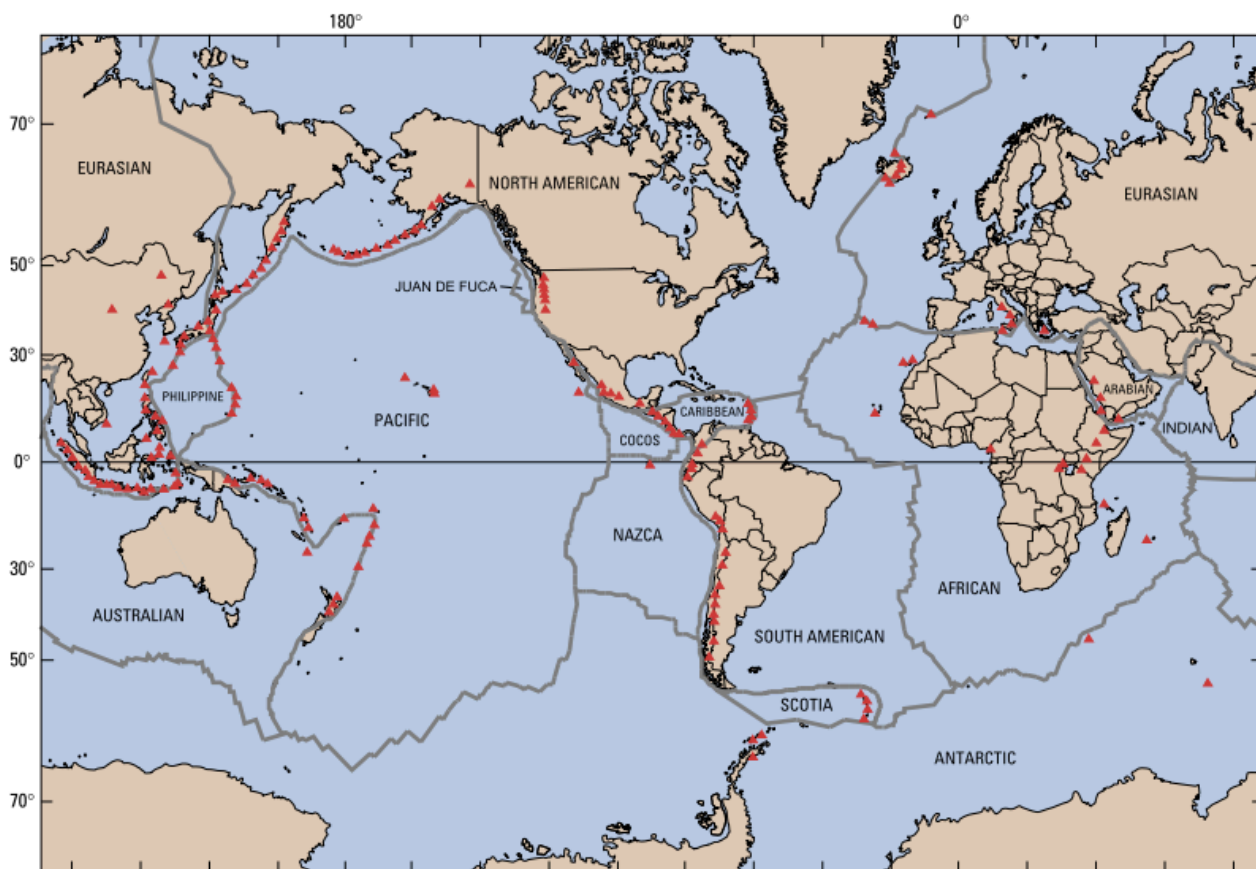


Figura 1. Mapa mostrando las placas tectónicas y algunos de los volcanes activos (triángulos rojos).

El tipo de recurso geotérmico determina su posible utilización, los recursos de entalpía alta pueden ser usados para la producción de energía eléctrica. Los de mediana entalpía también pero requieren de otras tecnologías como plantas de ciclos binarios, mientras que los de entalpía mediana-baja son excelentes para usos no eléctricos como calentamiento y enfriamiento de espacios utilizando una bomba de calor geotérmico, entre otros usos (Harsh K & Sukanta, 2006).

El proceso de producción tiene un trasfondo muy amplio, como se muestra en el siguiente diagrama.

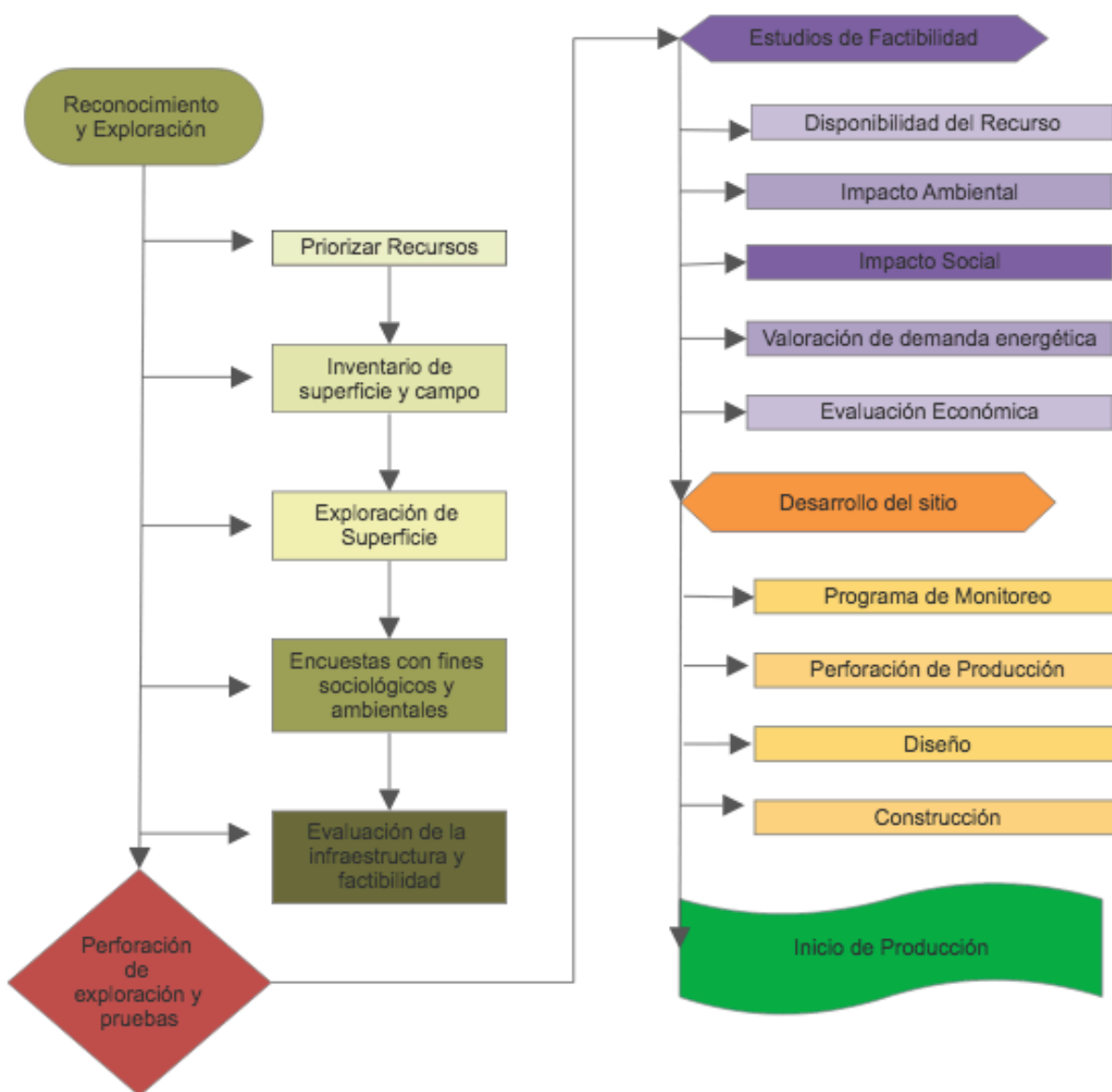


Diagrama 1. Tránsito en la producción de un sitio geotérmico

3.1. Geotermia en México

Como se ve en la Figura 1 México es privilegiado geográficamente con relación a geotermia. En la actualidad los recursos han sido utilizados para la generación de energía eléctrica predominantemente en Cerro Prieto, Los Azufres, Los Húmeros y Las Tres Vírgenes con una capacidad total instalada de 1018.2 MWe (IEA, 2014) sumando aproximadamente 3% de la energía eléctrica del país (Harsh K & Sukanta, 2006).

Habrà un cambio en la utilización de la energía geotérmica mexicana, desde que en el 2013 se aprobaran cambios en la Constitución permitiendo cambios en la reforma energética (Ley de Transición Energética, DOF 24-12-2015). Esto permitirá que empresas privadas también puedan explotar campos geotérmicos, así como particulares la puedan utilizar para usos directos.

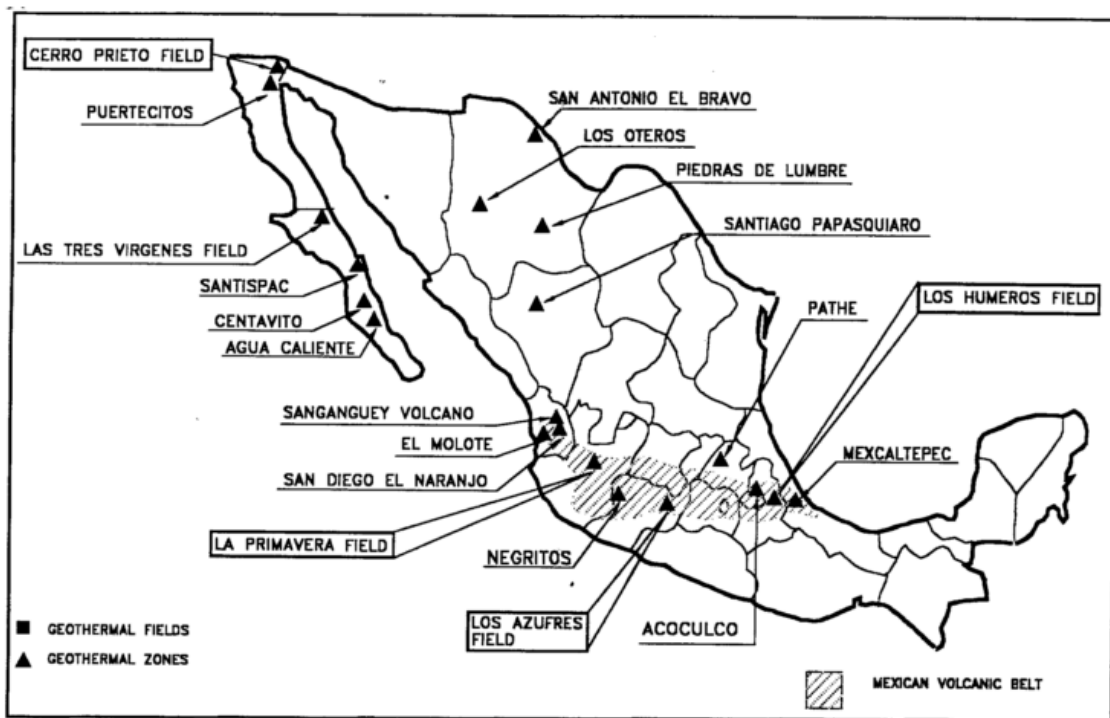


Figura 2. Campos y zonas geotérmicas en México (Quijano-León & Gutiérrez-Negrín, 2000).

En el 2011 la Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos realizó una estimación de 7422 MWe en reservas posibles, 2077 MWe en reservas probables y 1142 MWe en reservas probadas. Esto nos dice que México tiene un gran potencial geotérmico aún sin utilizarse. Como se menciona antes

primordialmente se ha utilizado la geotermia tradicional solo en ubicaciones con gran potencial, ahora se empezará a explotar en menor escala y para muchos otros usos directos.

3.2 Geotermia en Nueva Zelanda

En este país la energía geotérmica ha sido utilizada para actividades tradicionales (cocina y calefacción) desde mucho tiempo atrás. Actualmente la energía geotérmica representa el 11% de la energía eléctrica nacional. Nueva Zelanda está dotado de varios sitios con recursos de alta temperatura: Wairakei, Ohaaki, Kawerau, Rotokawa, Ngawha, Mokai, Ngatamariki, entre otros, con una capacidad instalada de 1114 MWe. Los usos directos de la geotermia en Nueva Zelanda son bastante altos, con un total de 401 MWe (International Energy Agency, 2013).

El gobierno de Nueva Zelanda tiene como meta lograr un 90% de electricidad renovable con un 25% de geotermia para el 2025.

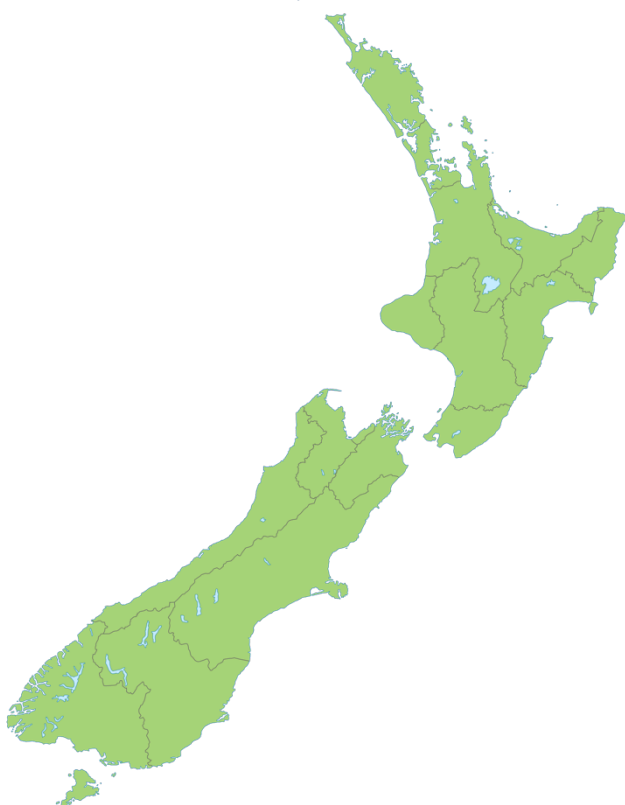


Figura 4. Mapa de Nueva Zelanda.

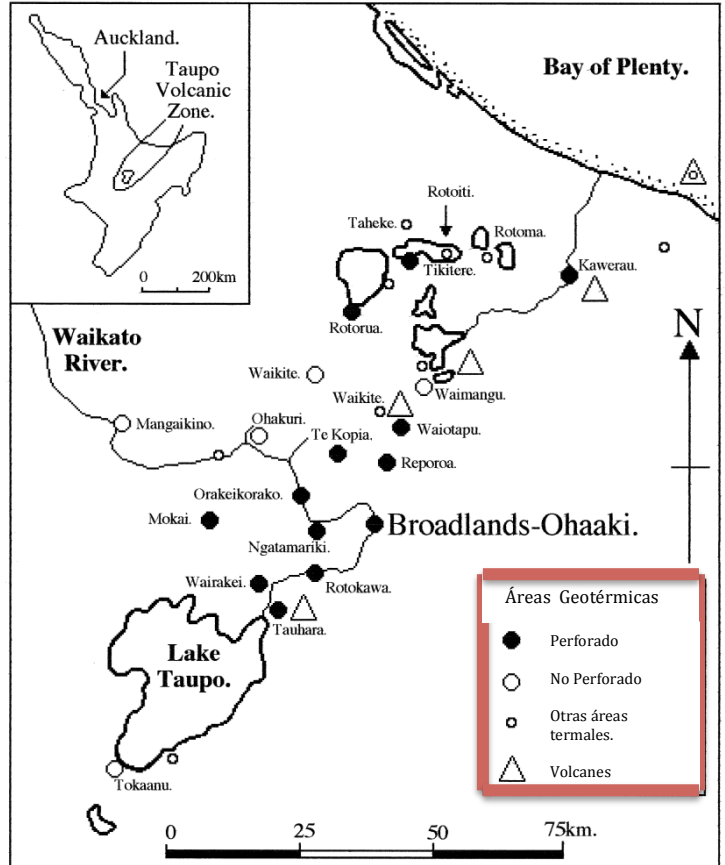


Figura 3. Modificado de Simmons y Christenson, 1994

Además de sus usos para generación eléctrica, Nueva Zelanda utiliza 9,672 TJ/año en usos directos de geotermia. Abarcando calentamiento de espacios, calentamiento de agua, invernaderos, criaderos de pescado y animales, secado agrícola, calentamiento industrial, baño y recreación acuática (White, 2006).

3.3 Sistemas Geotérmicos

Este término es utilizado de manera general para describir la transferencia de calor en un volumen confinado en la corteza terrestre, donde el calor es transportado de una fuente de calor, a un depósito de calor (Hochstein y Browne, 2000).

Se clasifican generalmente en base a distintos parámetros tales como su grado de convección, temperatura, fase del fluido, entorno geológico (volcánico, tectónico, entre otros).

De acuerdo con el recurso y su entalpía, se tiene la siguiente clasificación.

Recurso	Muffler y Cataldi (1978), USA	Hochstein (1990), NZ
Entalpía Baja	<90 °C	<125 °C
Entalpía Intermedia	90-150 °C	125-225 °C
Entalpía Alta	>150 °C	>225 °C

En base a su fuente de calor se muestra el siguiente diagrama (De Cobert y Leach, 1998).

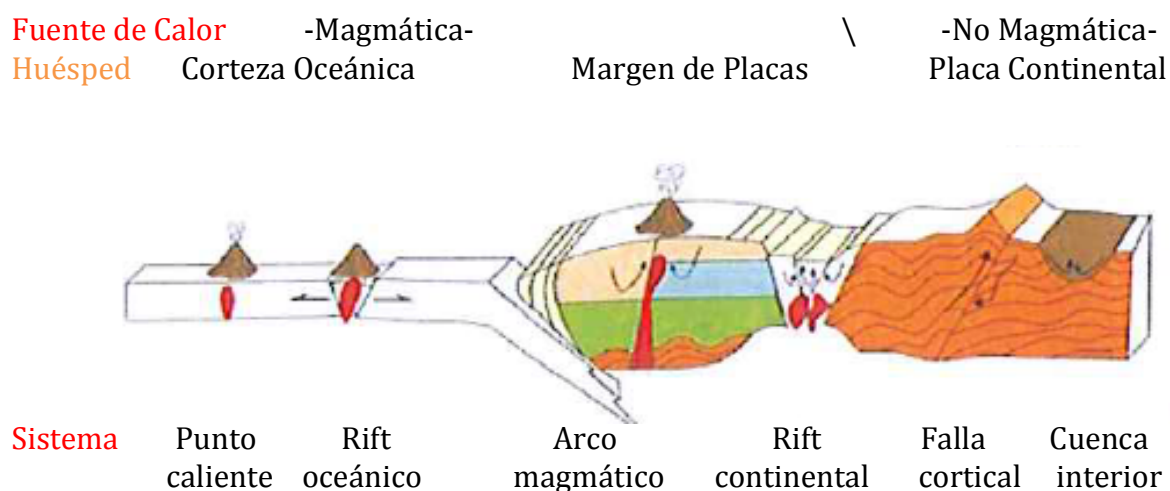


Figura 5. Fuentes de calor en sistemas geotérmicos. (De Cobert y Leach, 1998)

En la actualidad los sistemas más factibles económicamente son los que tienen intrusiones magmáticas emplazadas lo suficientemente alto en la corteza que inducen la circulación convectiva del agua subterránea.

3.3.1 Sistema Hidrotermal

Un sistema hidrotermal se refiere a cuando el calor se transfiere de la fuente de calor a la superficie por convección libre, involucrando fluidos meteóricos con o sin rastros de los fluidos magmáticos. Los líquidos descargados en superficie son recuperados por agua meteórica, derivada del exterior (Hochstein y Browne, 2000).

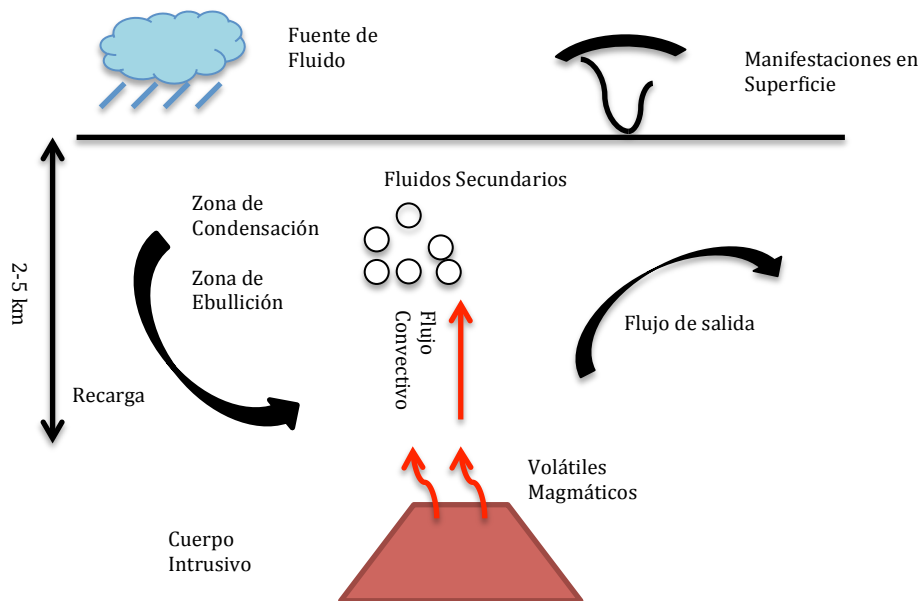


Figura 6. Sistema Hidrotermal.

3.3.2 Sistema Volcánico

Tipo de sistema donde el calor y masa es transferido desde un cuerpo ígneo (comúnmente una cámara magmática) a la superficie, a través de convección de fluidos magmáticos y descargas esporádicas de magma. En este proceso fluidos meteóricos no están involucrados en la transferencia de calor o son mínimos (Hochstein y Browne, 2000).

3.3.3 Sistema Volcánico-Hidrotermal

También llamado Magmático-Hidrotermal, es una combinación entre un sistema hidrotermal y uno volcánico. Donde el fluido magmático (primario) que esta

ascendiendo se mezcla con fluidos meteóricos (secundarios). Como ejemplo se puede mencionar el Oeste de Java, Indonesia.

3.3.4 Sistema de Roca Caliente

Este tipo de sistema consiste en un punto donde la roca a profundidad esta sumamente caliente $>250^{\circ}\text{C}$. Se bombea agua a alta presión a través de un pozo hasta el cuerpo de roca caliente, que suele ser roca compacta, y provocará fracturación hidráulica. El agua permea estas fracturas artificiales extrayendo calor de las rocas que la rodean, este reservorio tiene un pozo secundario por donde se extrae el agua calentada. El primer experimento se realizó en 1970 en Los Alamos, Nuevo México, EUA. Existen otros proyectos como: Soultz-sous-Foretz (Francia), Habanero (Australia), Landau (Alemania) Y Dessert Peak (EUA).

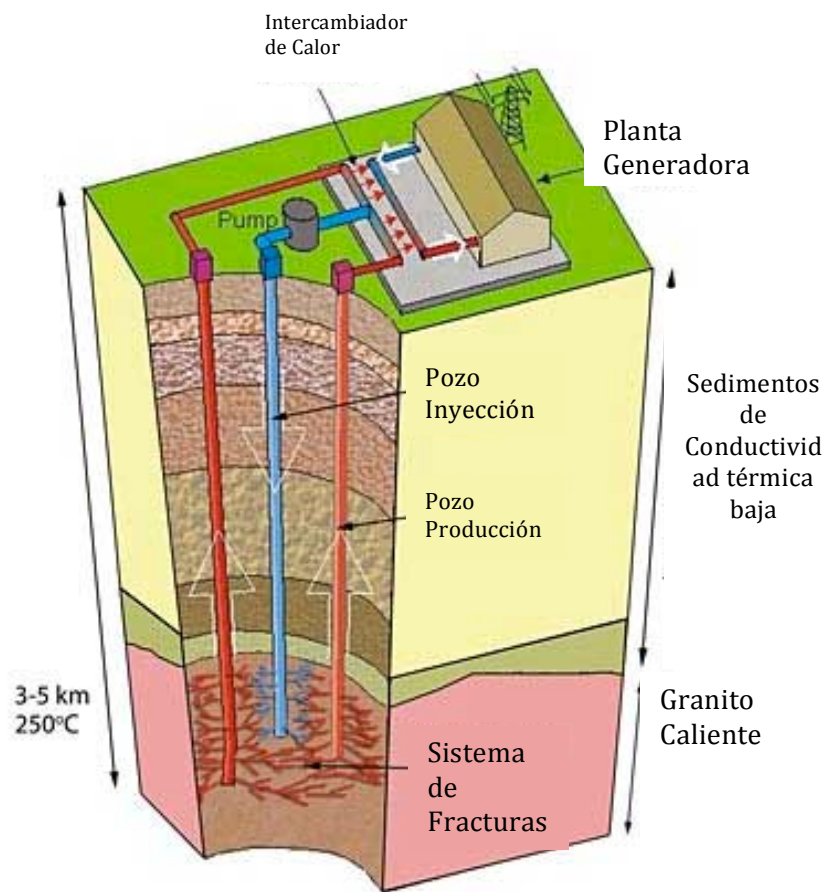


Figura 7. Sistema mejorado con tres pozos, de ANU Hot Rock Energy página web.

3.3.5 Sistema en Zona de Fractura

Un sistema de este tipo permite convección libre, descargando fluidos calientes a través de una zona de fractura. La fuente de calor a profundidad da un flujo de calor mayor a lo normal, este escenario puede suceder en regiones lejanas a márgenes activos o a vulcanismo.

3.3.6 Sistemas en el Marco Tectónico

- Arco en Islas Volcánicas
- Arco Continental Volcánico
- Rift Continental: Altas temperaturas, altitud elevada, reservorios profundos, con permeabilidad secundaria asociada a la explosión de cráteres, Etiopia y Kenia son algunos ejemplos.
- Contacto de Placas Continentales: Altitud elevada, muestran termas con aguas desde 30 C hasta punto de ebullición, actividad ígnea desde el Cretácico superior hasta el Terciario (Razdan et al, 2008).
- Limite de Placas en Transformación, donde las placas están en movimiento, por ejemplo en Baja California, donde se ubica la planta geotérmica de Cerro Prieto.
- Cadenas de Islas, alejadas de continentes, plumas en el manto entran un ambiente de presiones bajas a la base de la litósfera y se manifiestan como puntos calientes, es vulcanismo basáltico, con intrusiones ígneas someras como fuente de calor. Un ejemplo es las islas de Hawaii.

3.4 Componentes de un Sistema Geotérmico

En un sistema geotérmico de convectivo los elementos más importantes son:

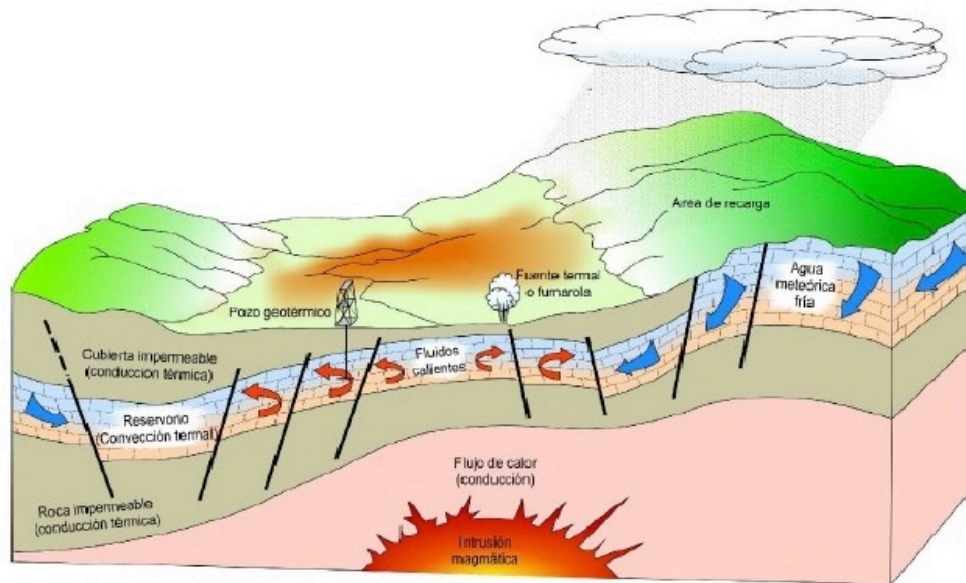


Figura 8. Esquema Sistema Geotérmico Convectivo.

- Fuente de Calor.

La fuente de calor magmática es necesaria para generar al potencial de un sistema geotérmico, este es una roca ígnea intrusiva. Emplazada a relativamente poca profundidad de 2 a aproximadamente 7 km. Estos cuerpos magmáticos transfieren calor y volátiles magmáticos (H_2O , CO_2 , SO_2 , HCl , HF , entre otros) a las rocas y a los fluidos.

- Reservorio

Cualquier roca (sedimentaria, ígnea, vulcanoclástica, metamórfica) con la suficiente permeabilidad puede actuar como reservorio. En rocas volcánicas se mueve gracias a la porosidad inter-granular, contacto entre dos litologías, fracturas, fallas.

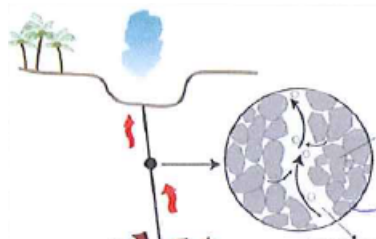


Figura 9. Espacios inter-granulares que permiten el movimiento de fluidos.

- Fluidos de Descarga

El contenido de minerales en los fluidos hidrotermales nos puede indicar el origen del mismo, indicándonos el nivel de relación con la roca huésped, así como con agua meteórica (Nicholson, 1993). Buena parte de la hidrología de un sistema convectivo esta regida por la topografía. Por lo que manifestaciones en superficie pueden ayudar a comprender la estructura del sistema.

Dividiéndose en

- Sistemas en relieve bajo

Tienen una intrusión ígnea profunda como fuente de calor, las zonas de vapor son poco comunes, el flujo ascendente se caracteriza por manantiales de agua hirviendo de altas concentraciones de cloruro, pequeñas estructuras de pérdida, y son más sencillos de explorar. Los campos de Nueva Zelanda son un ejemplo de este tipo de sistema.

- Sistemas en relieve alto

Con vulcanismo andesítico, en intrusiones ígneas más menos profundas, las zonas de vapor son comunes, el flujo ascendente esta caracterizado por fumarolas y manifestaciones de vapor. El fluido de reservorio primario de cloruro no suele alcanzar la superficie, tienen estructuras de pérdida grandes y son difíciles de explorar. Algunos ejemplos son Indonesia, Filipinas, Japón, Chile.

3.4.1 Manifestaciones Geotérmicas

Las manifestaciones geotérmicas es un término que describe las características en superficie donde existe descarga de fluidos, y las que resultan de la interacción entre el fluido y las rocas, así como deposición mineral en superficie. Son todas estas manifestaciones las que han llamado a los seres humanos a establecer sitios de importancia o rituales centrados en ello desde tiempos remotos.

Como se manifiestan los sistemas geotérmicos convectivos en superficie están controlados por los siguientes parámetros; entrada de calor en la base del reservorio, parámetros el reservorio (e.g. permeabilidad), parámetros del fluido (e.g. densidad,

viscosidad, temperatura), la estructura del sistema hidrológico, y otros factores que controlan el camino de los fluidos calientes al exterior.

Estas descargas en superficie se clasifican de acuerdo a su tipo de descarga (Hochstein y Browne, 2000).

- Descarga difusa (i.e. suelo caliente, suelo humeante, y evaporación en los cuerpos de agua).

Profundizaremos en esta manifestación superficial de un sistema geotérmico ya que es la que más se relaciona al proyecto.

El suelo caliente puede ser encontrado usualmente alrededor de características con una descarga intensa de calor así como piscinas de agua caliente o suelo vaporoso. Usualmente se miden realizando un gradiente térmico a aproximadamente 1 metro o hasta alcanzar el punto de ebullición. La vegetación no es sumamente afectada por esta manifestación, a menos de que el gradiente exceda los 25 a 30°C/m.

El suelo humeante, el vapor que emerge del suelo puede ser originado por evaporación somera de agua caliente o por que esta sufriendo una baja de presión a mayores profundidades. La vegetación deja de crecer o se ve afectada cuando la temperatura a 10-15 cm alcanza el punto de ebullición. El termino de suelo humeante ha sido utilizado para describir manifestaciones termales donde el vapor de la parte superior de un sistema liquido/vapor – dominado alcanza la superficie (M P Hochstein & Bromley, 2005).

Cerca de la superficie se desarrolla un gradiente de temperatura con una pendiente marcada que intensifica la transferencia de calor por conducción en una capa de suelo muy cercana a la superficie. Parte de este vapor también sale a través del suelo, y por fracturas, ventosas y fumarolas.



Foto 1. Suelo humeante, Cráteres de la Luna, Waikato, Nueva Zelanda.

- Descarga directa (i.e. manantiales tibios y calientes, ventosas de vapor, fumarolas, entre otros).
- Descarga intermitente (i.e. geyser).
- Descarga catastrófica (i.e. erupción hidrotermal).
- Descarga oculta (i.e. filtración).

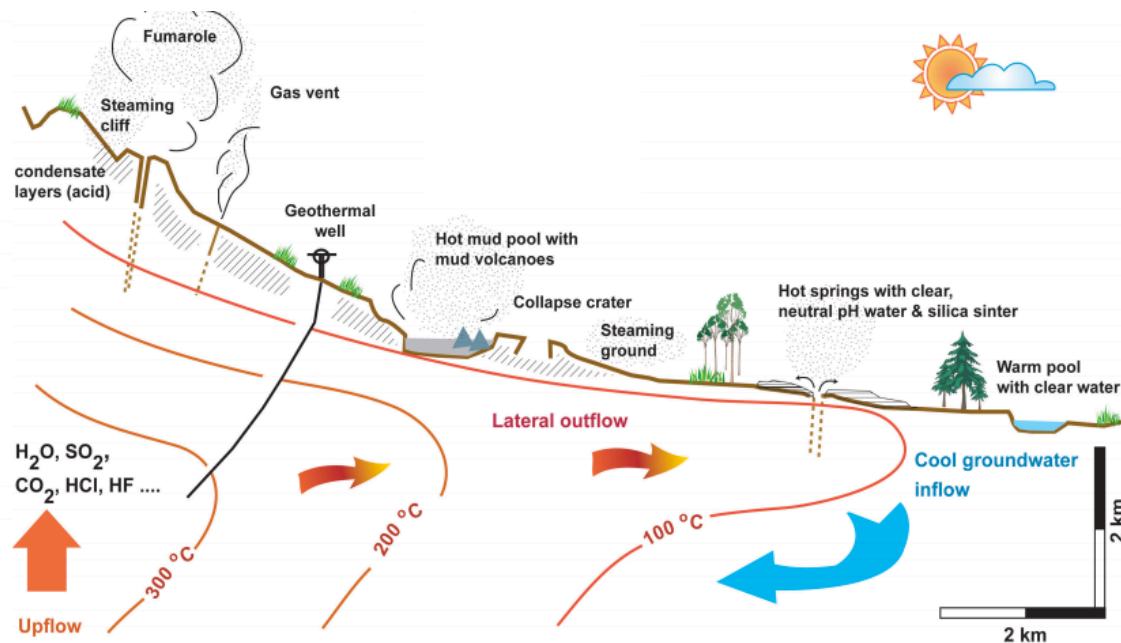


Figura 10. Manifestaciones en un sistema geotérmico de alto relieve. (Utami, 2011)

Es muy importante mantener un record de cómo van evolucionando las manifestaciones antes mencionadas ya que indican como esta cambiando el sistema hidrológico. Además de que al momento de producir es muy importante conocer el estado del sistema, además de diferenciar entre cambios naturales y provocados por la producción, la búsqueda de un “cambio cero” es recomendable.

3.5 Exploración Geotérmica

Cuando una región geotérmica es identificada, el siguiente paso es una revisión detallada de la literatura, para muchas áreas que incluyen la geología, hidrogeología, geoquímica, geofísica, topografía e información meteorológica ya existente y que puede ser utilizada en su totalidad antes de iniciar otros estudios de exploración.

Si la investigación previa muestra un prospecto viable, entonces se procede a distintas técnicas de exploración para cuantificar lo mejor posible el potencial geotérmico e identificar lugares adecuados para la perforación. Es necesario estimar flujo de calor, temperatura, volumen y permeabilidad a profundidad tanto como predecir si habrá producción de vapor seco, vapor con agua o solamente agua a altas temperaturas. También es deseable el conocimiento de la composición química del agua a producirse ya que esto puede significar tratamientos distintos de la misma. Para obtener todo esto se requiere entonces realizar estudios: geológicos e hidrogeológicos, técnicas geoquímicas, técnicas geofísicas, percepción remota y perforaciones exploratorias (Gupta & Roy, 2007).

A esto se le conoce como las 3-G; geología, geoquímica y geofísica. La exploración geológica se refiere al primer paso de donde los demás estudios se van a basar, además de que identifican los primeros aspectos del sistema geotérmico.

Después se tienen los estudios geoquímicos que resultan de suma utilidad para determinar si el sistema es dominado por agua o vapor, estima la temperatura mínima esperada a profundidad, inferir las cualidades químicas del fluido y determinar la fuente de donde se recarga el agua. Geoquímica continua siendo de suma importancia a lo largo de la vida productiva de un sistema, ya que nos indica como esta evolucionando de manera menos costosa que un levantamiento geofísico.

Por ultimo se tiene los estudios geofísicos, que obteniendo indirectamente parámetros de las rocas como temperatura, conductividad eléctrica, propagación de ondas, densidad, susceptibilidad magnética, se logra realizar entonces un modelo del sistema geotérmico.

Es clave comprender de la manera más detallada como funciona el sistema hídrico del campo geotérmico, todo esto se culmina con pozos exploratorios que determinarán si el lugar es en efecto un buen prospecto.

3.6 Flujo de Calor

La medición del flujo de calor es uno de los métodos termales de suma utilidad para calcular el tamaño y potencial de un sistema geotérmico. Mediciones cerca de la superficie se deben realizar periódicamente por su simplicidad y utilidad, ya que pueden ser usados como guía para perforación. El valor promedio global de flujo de calor conductivo tanto continental como oceánico es de 87 mWm^{-2} , causas como material radioactivo o movimiento de fallas, pueden modificar este valor y elevarlo ligeramente de lo normal. Pero una área geotérmica (económicamente atractiva) elevará este valor promedio varias veces más (Gupta & Roy, 2007).

Para lograr estos cálculos se utilizan varios estudios. Uno de ellos son los gradients de temperatura donde sondas para medir la temperatura hasta a un metro de profundidad, también existen sondas que miden a distintas profundidades al mismo tiempo y computan en automático un gradiente de temperatura (Combs and Muffler, 1973). Estos gradientes de temperatura ayudan a definir la extensión de las anomalías térmicas.

Pero conocimiento del flujo de calor permite un entendimiento más profundo del régimen termal que sucede en la superficie. Su ventaja más notoria es que sus valores son independientes de la conductividad de las rocas in situ (Sestini, 1970). Esto permite un delineado de la zona productiva bastante cercano a la realidad cuando el terreno es no-homogéneo.

Es entonces el calculo de flujo de calor uno de los métodos más baratos y menos invasivos.

3.6.1 Teoría para medir el Flujo de Calor en un Sitio Geotérmico

La transferencia de calor energético de un líquido en ebullición en el subsuelo a la superficie involucra maneras como las siguientes:

1. Transferencia convectiva de vapor por la superficie q_{conv} .
2. Transferencia conductiva q_{cond} a través de una capa cerca de la superficie, que contiene un componente variable en el tiempo Δq_{dy} causando variaciones diurnas en la temperatura cerca de la superficie y en el gradiente de temperatura cerca de la superficie ($\Delta T/\Delta z_0$). Donde z_0 es la posición de la superficie en el eje z .
3. Un componente episódico q_{filt} causado por el agua infiltrándose en el suelo después de un largo tiempo de lluvia, lo que enfría la capa cercana a la superficie de suelo humeante. Este componente puede ser ignorado después de 5 días sin lluvia (Gaudin et al., 2015).
4. También existe un componente estacional Δq_{yr} que provoca en temporadas de frío un cambio en las temperaturas del suelo mientras que a profundidad las temperaturas de ebullición de mantienen iguales.

Estas componentes de energía del flujo son referidas en unidades de (W/m^2), durante el verano o periodos secos, el flujo de calor medido en la superficie q_{tot} es entonces dado por:

$$q_{tot} = q_{conv} + (q_{cond} + \Delta q_{dy}) \quad \dots 5.1$$

Pequeñas variaciones en el flujo de vapor ocurren a profundidad (Z_{BP}) donde las temperaturas de ebullición (T_{BP} , donde BP por las siglas en ingles de Punto de Ebullición) se mantienen.. Estas se muestran en cambios de temperatura y se correlacionan con pequeños cambios periódicos en las presiones atmosféricas (Mia, Fujimitsu, & Bromley, 2012; J. A. Newson, O'Sullivan, Bromley, & Hochstein, 2001). Todos los componentes del flujo de calor son entonces variables en el tiempo. En la siguientes ecuaciones empíricas (de Hochstein & Bromley, 2005)

$$z_{BP} = \exp[c_1(T_{BP} - T_z)] + c_2 \quad \dots 5.2$$

$$Q_{tot} = a \left(\frac{z_{BP}}{z_0} \right)^{-b} \quad \dots 5.3$$

Donde T_z es la temperatura registrada a una profundidad z , c_1 y c_2 son constantes ($c_1 = -0.025$ y c_2 se ajusta dependiendo del sitio, T_{BP} es la temperatura de ebullición (a presión atmosférica)). Se utilizan 3 distintas profundidades para definir el valor de z_{BP} punto de ebullición a profundidad. Cuando se obtiene z_{BP} se usa en la ecuación 6.3 donde Q_{tot} es el flujo de calor total, con $a = 185 \text{ W/m}^2$, $z_0 = 1 \text{ [m]}$, y $b = 0.757$ (Hochstein & Bromley, 2005)

La valoración del flujo de calor en un sitio geotérmico es de gran importancia, ya que esta evaluación integra todas las características de calor cuantificables, garantizando una buena aproximación a la pérdida de calor. La medida de calor difuso en forma convectiva y conductiva a través del suelo caliente ha sido estimada con imágenes satelitales ligando vegetación a temperaturas del suelo, medidas con calorímetros, en algunos casos desecantes y otros métodos (Bromley, van Manen, & Mannington, 2011; Hurwitz, Harris, Werner, & Murphy, 2012; Mia et al., 2012).

En este proyecto entonces se realizaron diversos experimentos e investigación bibliográfica para poder mejorar el uso y resultados de mediciones para el flujo de calor convectivo y conductivo.

3.6.2 Flujo de Calor usando Calorímetros

Distintos calorímetros han sido utilizados para la valoración del calor conductivo proveniente del suelo caliente. Benseman (1959) diseñó un calorímetro con una exactitud del 10 por ciento. Este aparato consistía en una caja de hojas de aluminio en un marco ligero, con la base abierta 25 por 80 cm. La caja se presionaba suavemente

durante las mediciones. Contaba con un ventilador que sacaba el aire a través de la caja a una velocidad medida, también la temperatura y humedad del aire eran medidas cuando entraba y salía de la caja. De estas medidas se calculaba el flujo de calor que estaba entrando en la caja (Benseman, 1959).

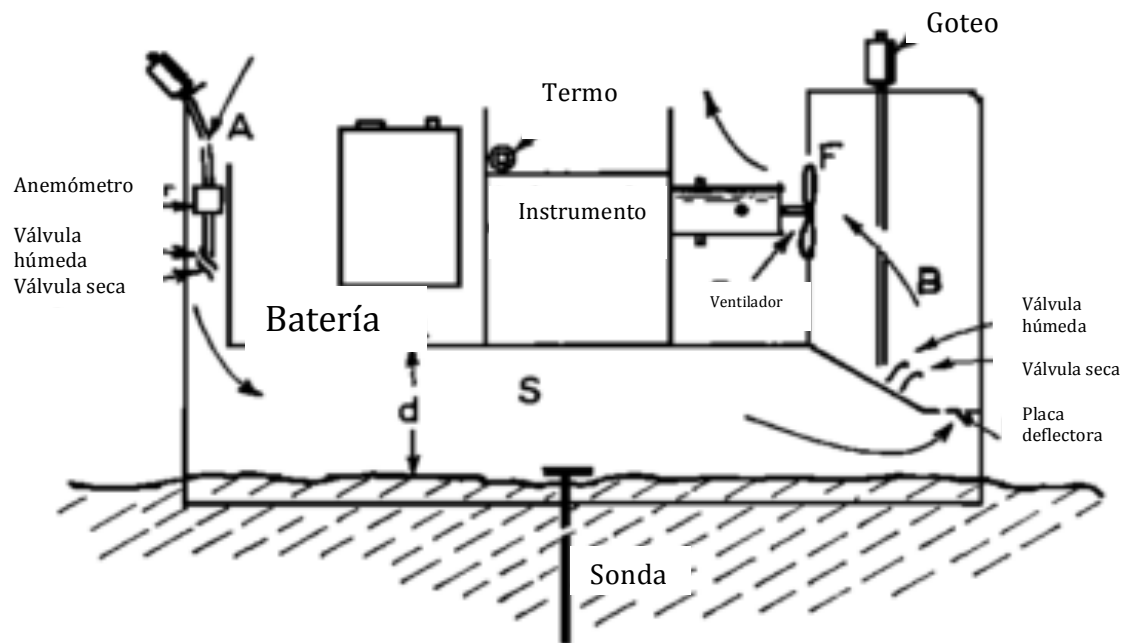


Figura 11. Sección esquemática de la caja con el calorímetro. Modificado de Benseman, 1959.

Tanto el anemómetro como el ventilador debían ser alimentados con una batería. El flujo de aire se debía utilizar para que no rebasara el del viento. El anemómetro entonces leía los campos electro magnéticos generados en una termopila cuando el aire pasa a través de un tubo, este anemómetro es aún superior a otros. Para asegurarse de que el calorímetro estaba dando medidas correctas de humedad y calor, se le puso bajo pruebas de laboratorio con una variedad de proporciones en el aire, donde mostro una exactitud mejor que 10 por ciento.

Cuando el equipo se llevó a campo demostró ser un poco tardado de calibrar en cada sitio, las medidas parecían ser ligeramente afectadas en la tarde por el calor en la tierra, había cierta fluctuación debida a el viento, y se mostraron grandes cambios entre lecturas de un mismo sitio después de diversas medidas a lo largo de meses. No encontraron una relación entre el flujo de calor y el clima, pero encontraron una conexión entre el flujo de calor en un sitio y su temperatura a 35 cm de profundidad.

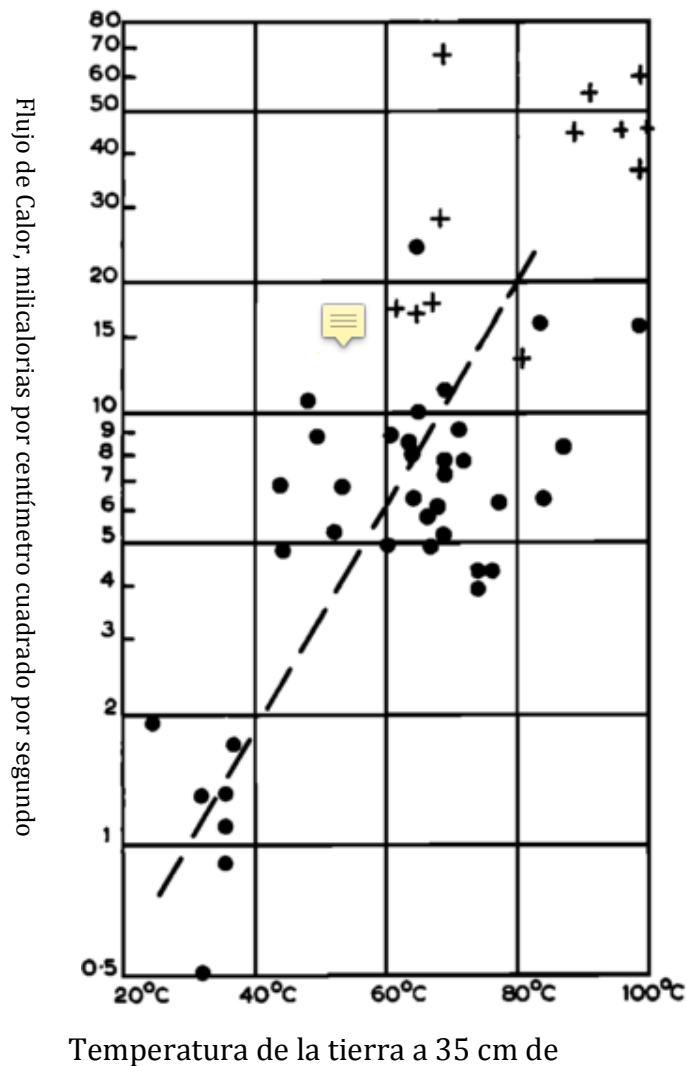


Figura 12. Diagrama relacionando el flujo de calor con la temperatura a 35 cm de profundidad. Modificado de Benseman, 1959.

El área geotermal de Karapiti (Cráteres de la Luna) en Nueva Zelanda fue medida con varias técnicas para la lograr la mejor estimación del flujo de calor (Bromley & Hochstein, 2005; Bromley et al., 2011). Durante estos estudios se combinó el uso de un calorímetro, midiendo simultáneamente temperaturas a profundidad, y muestras de núcleo para analizar la porosidad y humedad. Concluyendo con resultados que relacionan el punto de ebullición con el flujo de calor. Se obtuvo el valor para flujo de calor con el calorímetro, y los flujos de masa de la condensación en la base del calorímetro. Claro que como esta medida esta relacionada al tipo de suelo, su porosidad y otros, para extrapolarlo a un área más grande, se correlaciona con la vegetación (Manfred P. Hochstein & Bromley, 2005).

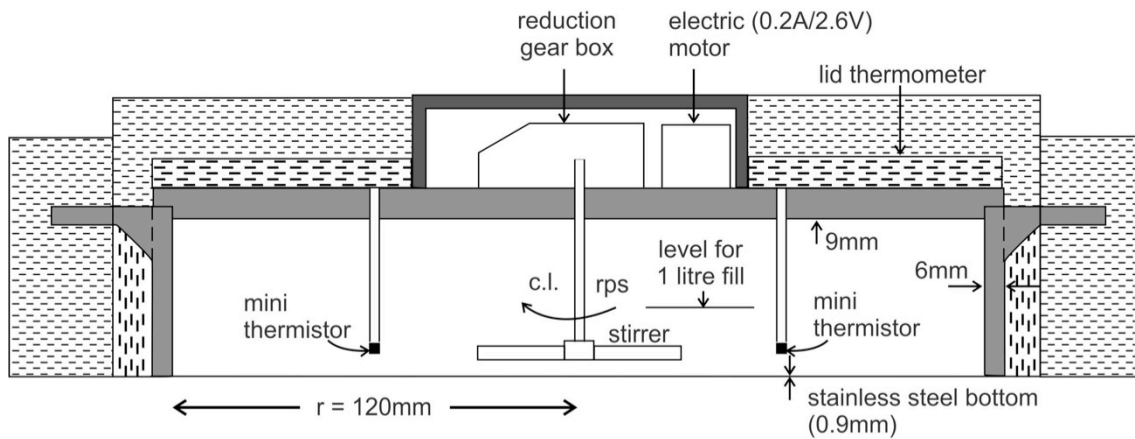


Figura 13. Sección diseño de calorímetro antiguo. (Bromley et. al, 2005)

La caldera de Yellowstone en los Estados Unidos de América también fue estudiada utilizando un calorímetro, desecante y otras técnicas (Hurwitz et al., 2012).

Existen varias propiedades que se necesitan medir para inferir el flujo de calor. El calorímetro es utilizado para determinar el flujo total (q_{tot}), mientras que el flujo de calor conductivo (q_{cond}) es estimado determinando los gradientes de temperatura en superficie y parámetros del suelo (J. A. Newson et al., 2001). El flujo de calor convectivo (q_{conv}) es estimado recolectando el vapor con un desecante en el suelo y midiendo su cambio de peso.

Para determinar el flujo total de calor, el calor de fondo o natural también se debe de determinar. Durante las mediciones un litro de agua a 2 grados Celsius por debajo de la temperatura ambiente y puesto en un bloque de poliestireno, después en el suelo, bloque de poliestireno y después en un aro de PVC separado del suelo 2.5 centímetros. En estos episodios se está registrando el cambio de temperatura del agua la cual es inferida con las resistencias de los termistores que están colocados dentro del agua. El flujo de calor q_{tot} entrando al calorímetro por la base es computado usando un gradiente dependiente del tiempo. El cambio en temperatura de fondo (deriva o drift en inglés) $\frac{\Delta T_{dr}}{\Delta t}$ del agua puede ser predicha con las temperaturas medidas en la tapa del calorímetro. El flujo total de calor puede ser calculado con la siguiente ecuación:

$$q_{tot} = \frac{mc\left\{\left(\frac{\Delta T_{rd}}{\Delta t}\right) - \left(\frac{\Delta T_{dr}}{\Delta t}\right)\right\}}{A} \dots 6.4$$

Donde $\frac{\Delta T_{rd}}{\Delta t}$ es el aumento de temperatura registrada con el calorímetro en el agua (rd de recorded por sus siglas en inglés), m es la masa del agua, c el calor específico y A el área cubierta por el calorímetro.

La determinación del flujo convectivo (q_{conv}) a través de la superficie es estimado usando un desecante que se coloca a un lado del calorímetro por 30 minutos para absorber el vapor de agua. Los cambios en peso del mismo se usan para calcular el flujo de calor convectivo (q_{conv}).

$$q_{conv} = \left\{\frac{(\Delta m_c)}{A}\right\} [h_g - h_c] + L \dots 6.5$$

Donde Δm_c es el cambio en masa del desecante, Δt es el periodo de tiempo por el cual se dejó en el suelo, A es el área cubierta por el desecante, h_g es la entalpía específica del vapor escapando de la superficie con la temperatura conocida T_0 , h_c es la entalpía de las gotas que se condensan con respecto a la temperatura de la masa de agua en el calorímetro, y L es una componente de pérdidas líquidas. Con el nuevo diseño de calorímetro, ya no se agrega el componente h_c ya que al ser un diseño más simple y sencillo no requiere de adsorber el agua que se condensa por debajo del calorímetro para su cálculo.

El flujo de calor conductivo (q_{cond}) en la superficie ($z=0$) está dado por

$$q_{cond}(\lambda) = \left(\frac{\Delta T}{\Delta z}\right)_0 \lambda(z)_0 \dots 6.6$$

Donde $\left(\frac{\Delta T}{\Delta z}\right)_0$ es el gradiente vertical de temperatura y $\lambda(z)_0$ la conductividad térmica de la capa en la superficie (de contacto).

El punto de ebullición a profundidad (Z_{BP}) también puede ser calculado con el perfil temperatura-profundidad. (Bromley et al., 2011).

$$z_{BP} = \exp[c_1(T_{BP} - T_z)] + c_2 \quad \dots 6.7$$

Donde T_z es la temperatura medida a una profundidad z , c_1 y c_2 son constantes, T_{BP} es la temperatura de punto de ebullición. Una vez que Z_{BP} es conocida, el flujo total de calor (Q_{tot}) a profundidad es calculado usando la siguiente función empírica dada en la ecuación 6.3 (Bromley & Hochstein, 2005).

4. Metodología

4.1 Definición del problema

Como se mencionó en el capítulo 5.3, la exploración geotérmica es sumamente importante para la óptima explotación de un reservorio. Uno de los primeros acercamientos a la región para calcular el potencial es el cálculo del flujo de calor superficial Capítulo 5.4.

Las áreas geotérmicas con manifestaciones en superficie están liberando calor al ambiente vía fumarolas, manantiales de agua caliente, respiraderos de vapor y cuerpos de agua, entre otras estructuras. La mayoría de estas expresiones vienen acompañadas de descargas difusas de calor a través del subsuelo consistiendo en flujos conductivos así como convectivos. El calor convectivo suma un porcentaje de hasta el 50% del flujo total de calor proveniente del suelo (C J Bromley, van Manen, & Bromley, 2011; J. Newson, 2010).

Este proyecto involucró el mejoramiento del diseño y materiales de un calorímetro así como la selección de un desecante y la forma de usarlo en campo para absorber ese calor difuso que a través del subsuelo se manifiesta en superficie en forma de vapor. Todo esto en base de la teoría física y química de su funcionamiento aplicada en un pequeño aparato ingenieril.

4.2 Calorímetro

4.2.1 Diseño y Construcción

En GNS Science se construyeron dos calorímetros para remplazar a uno previamente manufacturado en la compañía hace ya más de diez años. El diseño se mantuvo igual pero los nuevos sensores fueron instalados en la tapa del calorímetro (Manfred P. Hochstein & Bromley, 2005). El calorímetro consiste en un contenedor plano de forma cilíndrica con capacidad de 1.5 litros (Figura 14). Con una base de metal, pintada con una pintura de motor negra, la cual conduce el calor más fácilmente que otras. Tiene un motor que mezcla el agua desde el centro del contenedor. El cambio de temperatura en el agua se mide con tres termistores nominales tipo 1000K, estos están conectados a un registrador de datos en paralelo con resistores. Dos pares termoeléctricos se localizan por afuera de la tapa para medir cualquier cambio significativo en la temperatura ambiente. Las pérdidas o ganancias de calor conductivo por el contenedor están minimizadas con una capa de unicel que cubre en su totalidad (excepto la base) al contenedor.

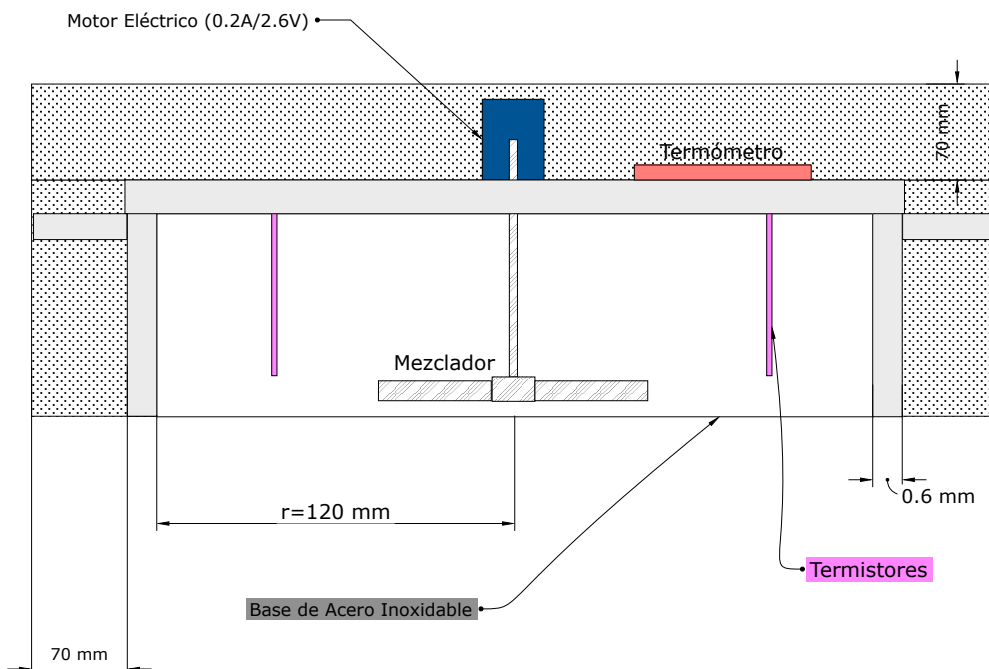


Figura 14. Diseño del Calorímetro nuevo. En los Anexos con más detalle.

4.2.2 Materiales

La base del calorímetro es de aluminio, esta placa ha sido pintada con pintura negra mate con propiedades de conductividad. La placa de aluminio tiene una conductividad térmica de 175.584 kcal/(h m °C) a los 94 °C. Para seleccionar esta pintura se llevaron a cabo ciertos cálculos y también un experimento.

Cuando el calorímetro está sobre un aro sobre el suelo caliente, se debe tomar en consideración la radiación proveniente del suelo, esto significa que el material y el color pueden influenciar los resultados.

La conductancia puede ser calculada con la resistencia (Ecuación. 6.9). Donde la resistencia R , es igual al inverso de la conductancia U , Δx es el grosor de la placa, la conductancia es k , A el área de la placa, ΔT es el cambio en la temperatura, ΔQ el cambio en el flujo de calor, y Δt el cambio en tiempo.

$$R = \frac{1}{U} = \frac{\Delta x}{k} = \frac{A(-\Delta T)}{\Delta Q / \Delta t} \dots 6.9$$

Utilizamos esta ecuación con los siguientes valores, una pintura con esmalte tiene un coeficiente de emisividad de $\epsilon=0.80$, mientras que el aluminio tiene un valor de $\epsilon=0.09$. La emisividad es la proporción de radiación térmica emitida por una superficie u objeto debido a su temperatura, la emisividad de un cuerpo negro es entonces de $\epsilon=1$ y el de un material perfectamente reflejante sería de $\epsilon=0$. La emisividad es igual a la absorptividad (α) y se refiere a la habilidad de un objeto para absorber radiación.

Entonces usando,

$$R_{Total} = \frac{R_{conv1} * R_{rad1}}{R_{conv1} + R_{rad1}} + R_{negro} + R_{plata} + \frac{R_{conv2} * R_{rad2}}{R_{conv2} + R_{rad2}} \dots 6.10$$

donde conv es convectivo, rad radiativo, negro y plata son los distintos lados de la placa donde solo un lado está pintado de negro, 1 es donde el calor es recibido y 2 después de su transferencia.

También;

$$Q = \frac{T_{\infty 1} - T_4}{R_{Total}} \dots 6.11$$

y;

$$R_{side} = \frac{L}{k * A} \dots 6.12$$

Entonces cuando calculamos la R_{Total} (Resistencia Total) con pintura obtenemos un valor $R_{Total} = 0.717$ K/W, mientras que sin pintura obtenemos un valor de $R_{Total} = 0.877$ K/W. Podemos entonces ver que la resistencia es menor cuando la placa de aluminio está pintada de negro.

Se hizo un pequeño experimento para comprobar la teoría, 4 pequeñas placas de aluminio fueron pintadas con las tres distintas posibles pinturas negras y una se dejó sin pintar. Se utilizó una pistola de laser (TIR) para medir la temperatura por el lado plateado con $\epsilon=0.10$ por 5 minutos mientras que por el lado pintado de negro se uso una pistola de calor a 100°C . Las placas se separaron 25 centímetros de la pistola de calor (Figura 15).

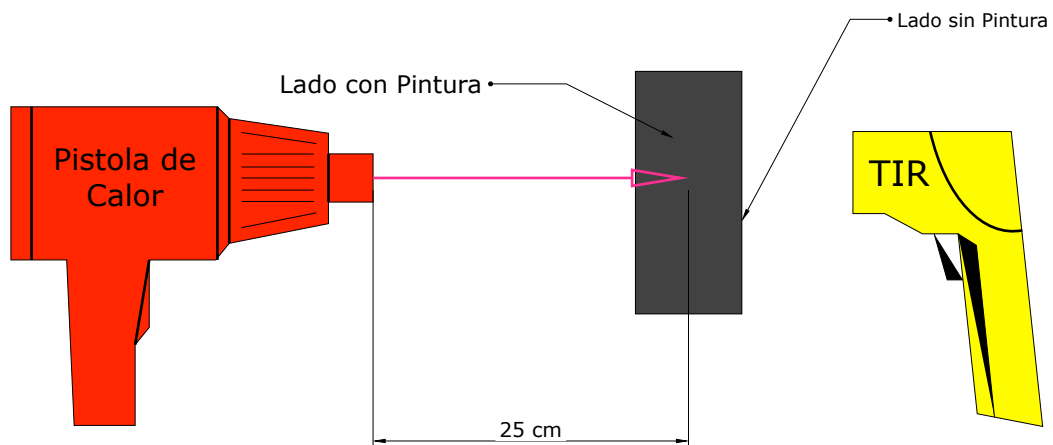
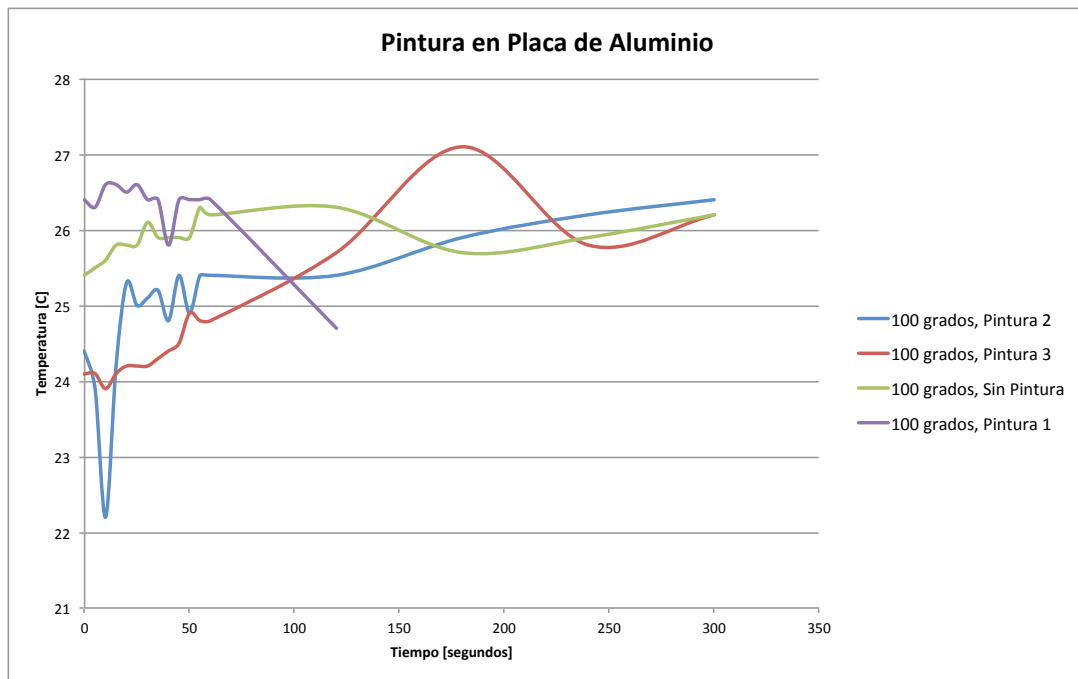


Figura 15. Experimento de pintura.

Los experimentos fueron inconclusos, con una de las tres pinturas se alcanzó la mayor temperatura, después de el metal sin ninguna capa de pintura (Gráfica 1).



Gráfica 1. Temperatura contra Tiempo en placas de aluminio pintado.

La línea de color morado representa al aluminio sin ninguna pintura, y la de color verde a la pintura tres. La pintura tres es una pintura color negro mate para motor que contiene esmalte y cerámica, lo que incrementa la difusión del calor. Con la selección de dicha pintura estamos tratando de maximizar la transferencia del calor del suelo al agua dentro del contenedor. Es de resaltar que el aluminio sin pintura mostro un calentamiento superior, pero dado que la teoría sugería un mejor resultado con pintura se decidió adoptar la pintura número 3.

4.2.3 Calibración y Mediciones

Para inferir la relación entre la resistencia de los termistores dentro del agua y la temperatura en el agua, agua tibia a 40 °C es colocada dentro de los calorímetros y se le permite enfriar durante un periodo de 24 horas (Gráfica 2). Esto fue repetido 3 veces para minimizar el error. La resistencia de cada termistor es entonces graficada contra la temperatura, que después se ajusta a una curva lineal para determinar la relación entre resistencia y temperatura. Después de promediar las calibraciones, las ecuaciones quedan como se muestra a continuación. La resistencia se mide en el agua con los termistores, y la temperatura se mide en la tapa del calorímetro con los pares termoeléctricos.

Calorímetro Original Unidad O:

$$T = -0.01045 R + 77.51591$$

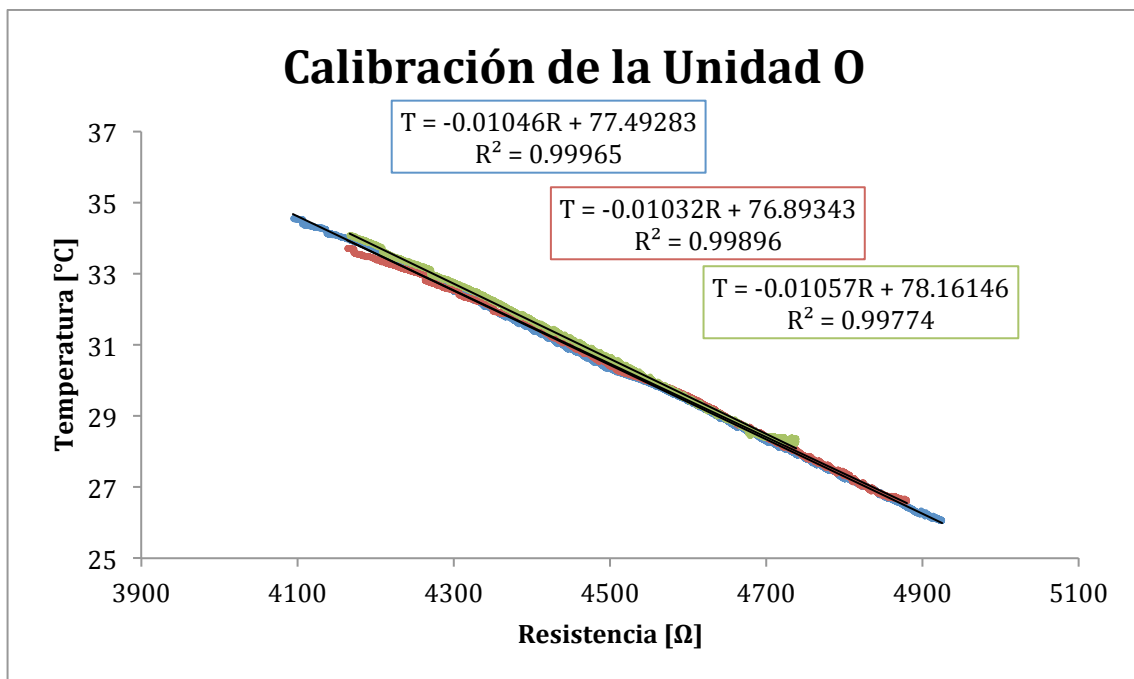
Calorímetro Unidad A:

$$T = -0.010283 R + 76.78159$$

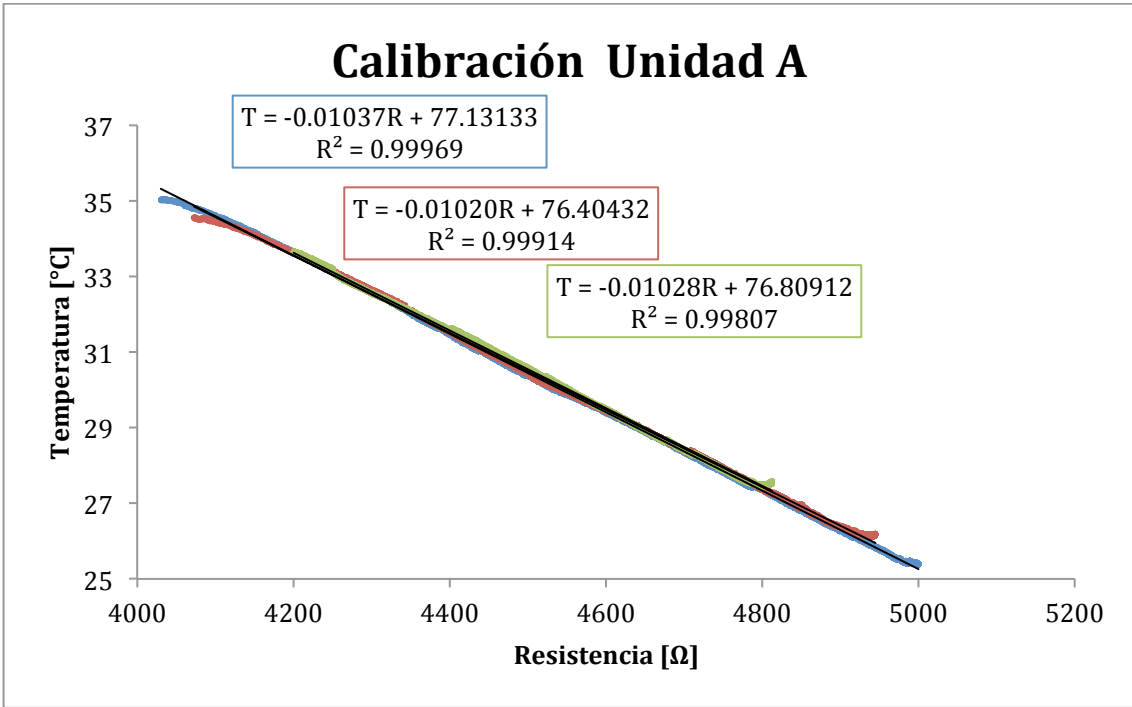
Calorímetro Unidad B:

$$T = -0.010103 R + 75.32101$$

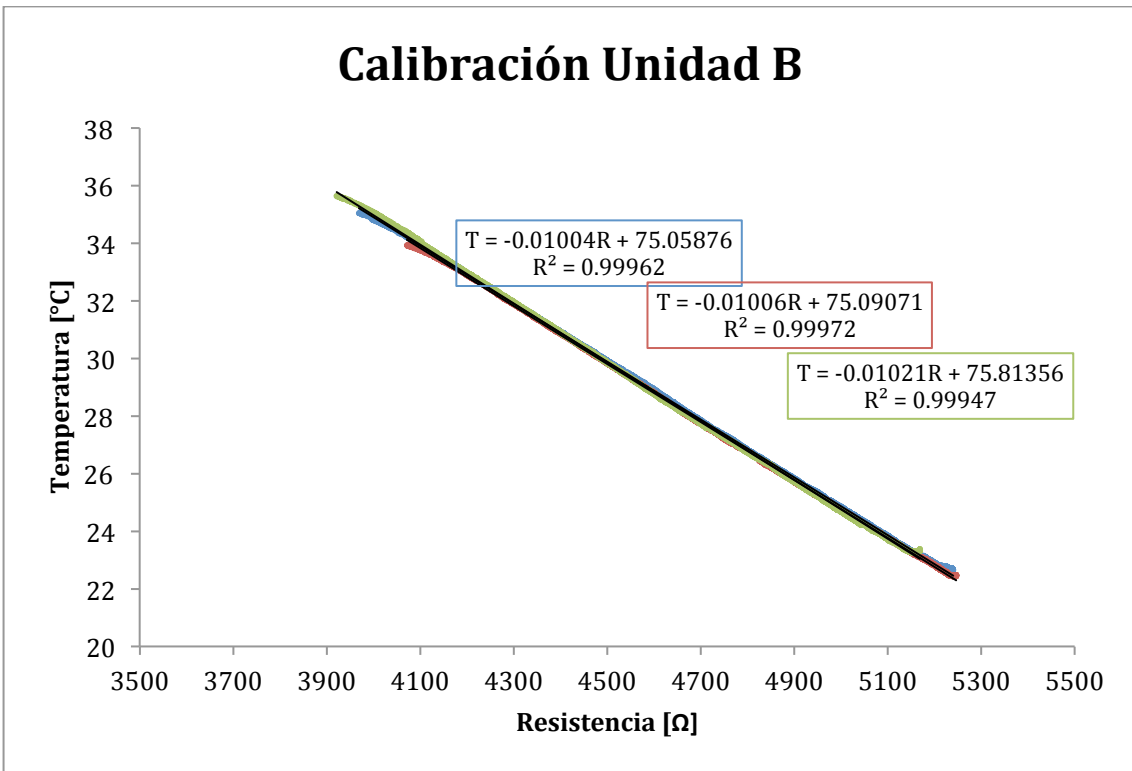
donde T es la temperatura en ($^{\circ}\text{C}$) y R es la resistencia en (ohms). Estas ecuaciones se obtuvieron, promediando tanto las tres resistencias del agua como las dos temperaturas de la tapa. Este proceso de 24 horas se repitió tres veces para cada unidad. A continuación se muestra en las graficas (2, 3, 4) el comportamiento lineal para esta calibración. Las ecuaciones son el ajuste lineal al comportamiento durante las 24 horas de enfriamiento. R^2 es el coeficiente de correlación del ajuste.



Gráfica 2. Calibración Unidad O.



Gráfica 3. Calibración Unidad A.



Gráfica 4. Calibración Unidad B.

4.3 Desecante

Un desecante es una sustancia que presenta afinidad por el agua. Trabajando con esta propiedad se desea calcular el contenido de vapor absorbido en un determinado tiempo. El contenido de humedad es el peso de agua en un objeto expresado como un porcentaje de su peso en seco, midiendo el cambio de peso antes y después de que absorbe agua. Distintos desecantes presentan distintos porcentajes de adsorción (dependientes de la humedad y la temperatura).

Adicional a la capacidad de adsorción del vapor de agua, algunos desecantes adsorben también otros gases, lo que vale la pena considerar. La estimación de calor por este método utiliza el calor latente de vaporización de un gas en específico, por lo que la computación así como el trabajo de campo se complicarían mucho si se tratara de cuantificar todos los gases que adsorbe el desecante. Por lo que se busca entonces un desecante que únicamente adsorba un gas, en este caso vapor de agua. Un artículo de medicina (Elia, McDonald, & Crisp, 1986) midió el error de distintos desecantes al querer adsorber CO_2 . Analizaron cloruro de calcio, sulfato de calcio (Drierite), alúmina, sílice en gel y perclorato de magnesio; únicamente el cloruro de calcio no adsorbió CO_2 . El sulfato de calcio adsorbe cantidades mínimas y el sílice adsorbió un 38% del CO_2 disponible, la alúmina adsorbió todo el CO_2 .

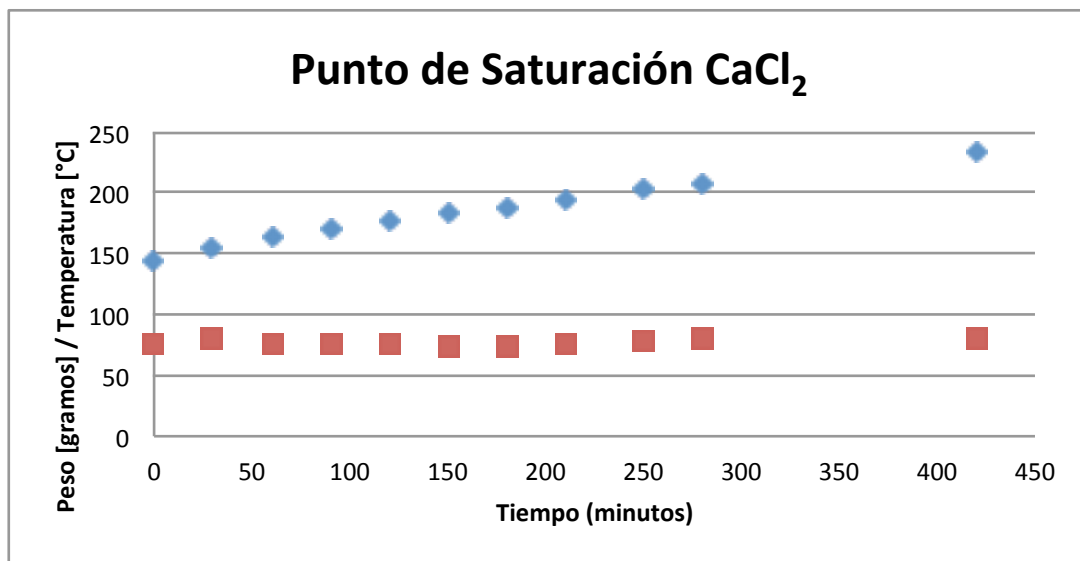
El CO_2 es un gas presente en toda la Tierra. En los lugares geotérmicos por la desgasificación magmática esta en concentraciones más altas. El contenido de dióxido de carbono puede variar enormemente de una ubicación a otra, así como lugares con vegetación pueden contener también mayores concentraciones por la materia orgánica en descomposición (Smid & Mazot, 2012), además de que la infiltración atmosférica puede estar presente. Para evitar todas estas posibles causas de error, se selecciona entonces un desecante que no adsorba CO_2 .

En intentos previos como en Yellowstone se utilizó un desecante marca Drierite (sulfato de calcio, CaSO_4) dando resultados donde el flujo de calor convectivo aporta un 20% de la suma total (conduccion más convectivo).

4.3.1 Selección de Material y Pruebas

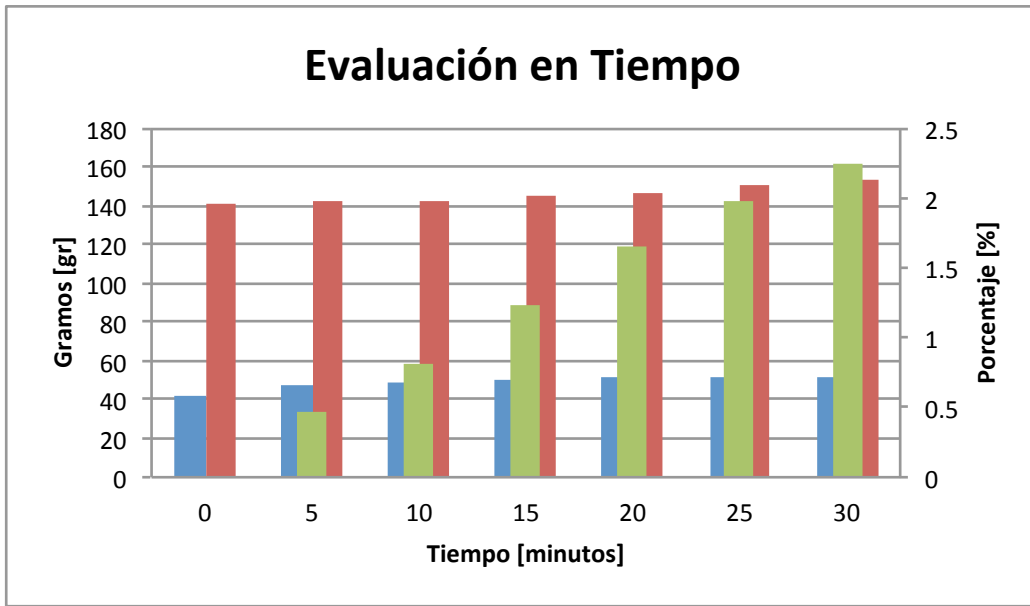
El cloruro de calcio fue seleccionado para medir el flujo de calor convectivo después de una serie de experimentos que se mostrarán a continuación.

Su punto de saturación es muy alto (Gráfica 5), por lo que se puede reutilizar varias veces, aunque el material por si mismo no es reutilizable, una vez que alcanza el punto de saturación se debe de desechar, pero no es tóxico.



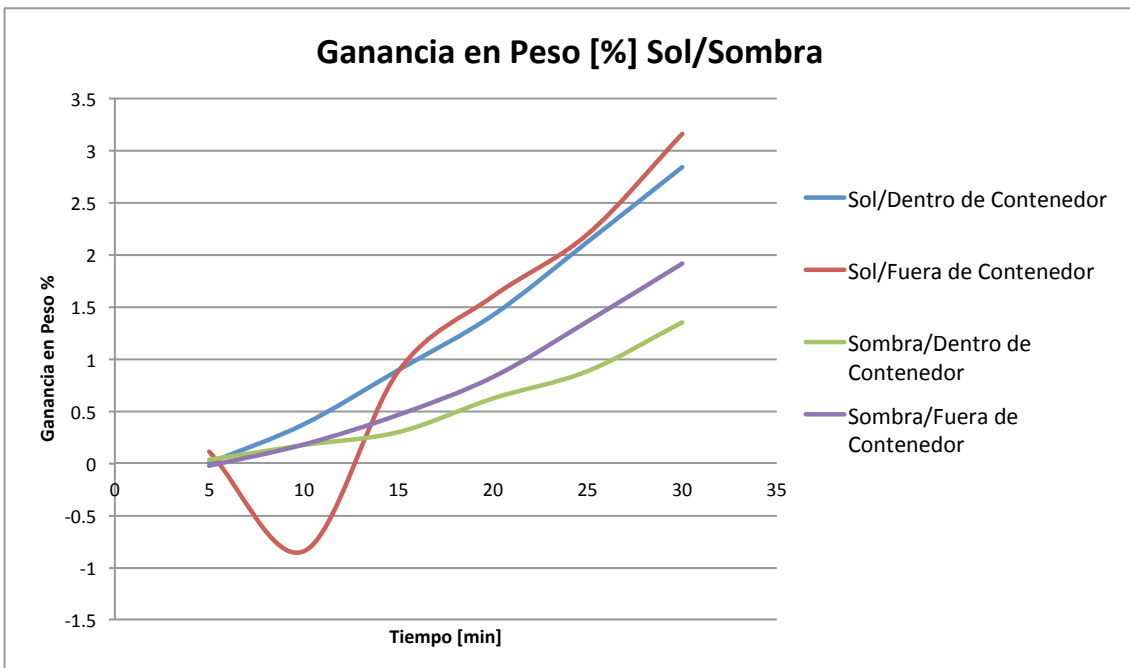
Gráfica 5. Punto de Saturación. La línea azul corresponde al peso del desecante, la línea color rojo a la temperatura del agua. Mediciones hechas en laboratorio.

También se analizó el tiempo que debía dejarse en el suelo para una adsorción ideal, como se muestra en la siguiente Gráfica 6, donde las barras verdes muestran la ganancia de peso en porcentaje que claramente aumenta con el tiempo, las barras rojas denotan peso total de desecante, y las azules la temperatura del agua.



Gráfica 6. Evaluación de adsorción en tiempo del CaCl_2 .

El efecto de la radiación solar también debe ser tomado en cuenta ya que muchas de las medidas se harían durante el día. En la Gráfica 7 se muestra como cuando el desecante se encuentra dentro de un contenedor bajo el efecto de radiación solar muestra una mayor adsorción. Por lo que entre las instrucciones de uso también esta el ponerlo bajo una sombra durante el tiempo que está adsorbiendo vapor de agua.



Gráfica 7. Ganancia en peso dentro y fuera de un contenedor y en el sol o en la sombra.

En la Gráfica 7, los colores corresponden a lo siguiente, azul: dentro del contenedor en el Sol, rojo: fuera del contenedor en el Sol, verde: dentro del contenedor en la sombra, morado: fuera del contenedor en la sombra. Como podemos ver los valores más altos corresponden al desecante que es colocado sin contenedor en el Sol y los más bajos a el contenedor en la sombra y dentro de un contenedor.

El desecante debía ser también comparado contra los calorímetros ya que lo que se busca es que el flujo de calor convectivo dado por el calorímetro y por el desecante sea lo más similar posible. Esto con el propósito de que el desecante pueda ser utilizado en un futuro como una aproximación muy sencilla de realizar en campo.

Para el cálculo del flujo de calor convectivo usando el cambio de peso en el desecante se usan valores de calor latente de vaporización para el agua, el agua adsorbida dependiente del tiempo (flujo de vapor), y el área cubierta por el desecante.

$$q_{adve} = \rho_v * L * Q_v \dots 6.13$$

Donde ρ_v (kg m⁻³) es la densidad de vapor, L el calor latente de vaporización (2,490 kJ*kg⁻¹ para el agua), y Q_v (m*s⁻¹) es el flujo de vapor, adv significa advectivo.

De esta ecuación reformulamos de modo que dm/dt es la masa de agua adsorbida dependiente del tiempo y A (m²) el área del contenedor de plástico.

$$q_{adv} = L * \frac{dm/dt}{A} \dots 6.14$$

Ahora cuando utilizamos el desecante y el calorímetro, el calor por radiación debe ser sustraído del valor dado por el calorímetro. La irradiación está dada por la siguiente ecuación,

$$Q(IR) = (\varepsilon * \sigma * T^4)_{ES} - (\varepsilon * \sigma * T^4)_A \dots 6.15$$

Los valores T de temperatura se determinan del suelo debajo del calorímetro y las temperaturas calculadas en el agua dentro del mismo. Una emisividad de $\epsilon=0.95$ es usada, donde ES corresponde a la emisividad del suelo y A agua.

5. Caso Práctico



Foto 2. Karapiti, 2016.

5.1 Localización y Geología (Karapiti, Cráteres de la Luna)

La zona volcánica de Taupo (TVZ por sus siglas en inglés) se encuentra en la isla norte de Nueva Zelanda en la parte central – este. Aquí se concentra la mayoría de sitios geotermales, donde fallas, vulcanismo y sistemas geotermales están relacionados. El TVZ esta en un margen de placas, entre la placa australiana y la del pacifico, Esto ha creado una serie de gravens que provocaron una caldera de subsidencia. Formando parte de la cadena volcánica Kermadec (Cole, 1978). Esta zona de subducción lleva a la formación de volcanes.



Figura 16. Volcanes activos de la Isla Norte. (www.civildefense.govt.nz)

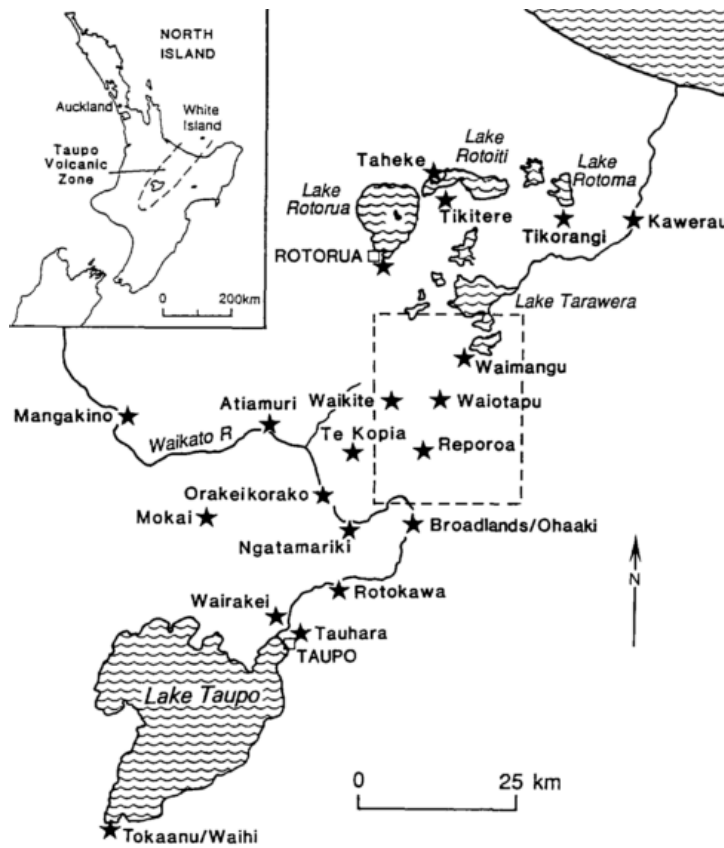


Figura 17. Sistemas Geotermiales en el TVZ. (Bibby, Bennie, Stagpoole, & Caldwell, 1994)

El sistema geotérmico de Karapiti, pertenece al Sistema Geotermal Wairakei-Tauhara representado en el siguiente modelo, se puede ver la riolita Karapiti representada con la K mayúscula. Las flechas rojas representan pozos de explotación geotérmica en la planta de Wairakei.

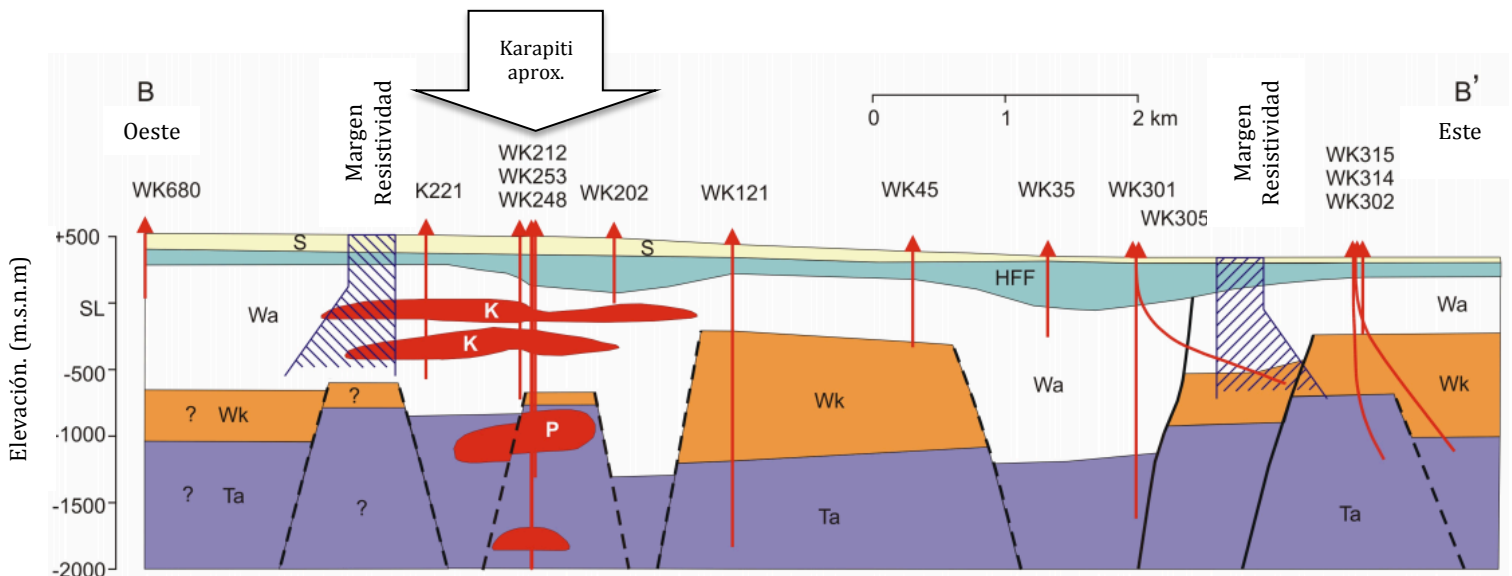


Figura 19. Modelo 2D del campo geotermal Wairakei (De Rosenberg et Al, 2009).

La relación entre el Campo Productor de Wairakei y Karapiti, se puede ver reflejada en el comportamiento de la pérdida de calor en la zona de Karapiti. Como Hunt et al. mostró en 2009 a través de cambios entre 1950 y 2005, cambios que se relacionaban con el incremento o decremento de producción en Wairakei.

6. Resultados

El equipo como se menciona antes, fue probado y calibrado en laboratorio antes de salir a campo. A continuación se muestran los resultados obtenidos.

6.1 Calorímetro

Se comparo el nuevo (Unidad A) con el original (Unidad O) en Karapiti (Cráteres de la Luna) localizado en Waikato, Nueva Zelanda, y presentaron los siguientes valores.

Unidad A	Unidad O	Flujo Total de Calor		
watts/m ²	watts/m ²			Diferencia
367.414	432.12	Suelo	-66.7048	watts/m ²
211.127	192.864	Aro	18.26302	watts/m ²

Tabla 1. Comparación de Unidades en Karapiti.

Los resultados fueron algo distintos entre ellos, la causa exacta es desconocida, pero el hecho de que el calorímetro original tiene un tipo de pintura y los nuevos una distinta no se cree que pueda ser la razón de la diferencia.

También se realizó otra comparación en un área térmica conocida como "Crown Park" en la ciudad de Taupo, Waikato, Nueva Zelanda. Midiendo tres sitios en este lugar con dos calorímetros, el original y uno de los nuevos.

watts/m ²	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3
Unidad O (suelo)	28.398	457.1724	357.4323
Unidad O (aro)	-7.20886	253.384	217.8799
Unidad A (suelo)	28.74757	449.7015	476.4907
Unidad A (aro)	-1.11169	271.2047	319.5011

Tabla 2. Comparación de Unidades A y O en "Crown Park".

Las medidas en este sitio fueron hechas en un día soleado y seco. Como se muestra en esta prueba, los calorímetros parecen comportarse de manera distinta. Es difícil determinar si es por variaciones naturales del suelo, diferencias de diseño en el equipo u otro factor, por lo que se necesitan mas experimentos para conocer aún mejor su comportamiento. Existen otras especulaciones relacionadas con cambios en el flujo de vapor de las capas más superficiales, como la presión atmosférica (Gaudin et al., 2015; J. Newson, 2010; Werner, Hochstein, & Bromley, 2004), así como la humedad (Benseman, 1959; Manfred P. Hochstein & Bromley, 2005). Otro argumento es que al poner un calorímetro en sitio por determinado tiempo, el que se ponga a continuación mostrará valores distintos, porque tal vez la presencia del primero hizo interferencia con el flujo de vapor. Este efecto tendría que ser analizado por un modelo numérico.

6.2 Desecante

Se utilizaron 2 paquetes de desecante a modo de control, uno para suelo y otro para el aire. El de aire se mantiene dentro de una bolsa sellada y el de suelo se deja en un sitio no geotérmico durante 30 minutos, pensando que adsorberá cualquier humedad que esté en el suelo por razones no-geotérmicas.

Aunque teóricamente esto suena como lo correcto, los valores causan un conflicto (Tabla 3), ya que cuando se toman en cuenta los dos controles, el valor se aleja mucho del dado por el calorímetro para el flujo de calor convectivo. Mientras que cuando no se usa el control de suelo, el valor es extremadamente similar. La Tabla 4, muestra los distintos valores que se obtuvieron en el sitio de Karapiti al mismo tiempo que cuando se midió con el calorímetro.

Tomando en cuenta	53.57	Watts/m ²
control de suelo		
Sin tomar en cuenta	105.05	
control de suelo		

Tabla 3. Flujo de Calor Convectivo con Desecante.

6.3 Correlación

Para poder entender mejor si los dos equipos se complementan de la manera deseada se debe realizar una comparación entre los mismos.

En la siguiente Tabla 4, se muestra la comparación con el calorímetro.

Watts/m ²	Control de Suelo	Sin Control Suelo
Valor en Aro	211.13	211.13
Radiación	72.1	72.1
Desecante	53.57	105.05
Convectivo – Radiación	139.06	139.06
Diferencia	85.50	34.01

Tabla 4. Comparación calorímetro contra desecante (sin y con control de suelo).

Como es claro de ver, el valor sin tomar el control de suelo es mucho más cercano al dado por el calorímetro para el flujo de calor convectivo (estas mediciones se hicieron un día después de extensiva lluvia). Eso entonces nos hace preguntarnos si algún otro motivo fue el que provocó un valor tan alejado para el desecante. La presencia de lluvia el día previo puede ser una razón como se demostró con mediciones hechas en “Crown Park” en un día después de varios días sin lluvia (Tabla 5).

Calorímetro Original	Watts/m ²
Valor de Aro (convectivo)	217.88
Radiación	60.4
Desecante	160.38
Convectivo – Radiación	157.44
Diferencia	-2.94

Tabla 5. Comparación Calorímetro contra Desecante, día sin lluvia previa.

Viendo estos resultados se recomendó mas experimentos relacionados con el comportamiento del desecante en días después de un periodo de lluvia.

7. Conclusiones

El uso de un equipo no invasivo para la primera etapa de exploración en un sitio geotérmico es de suma utilidad, como se ha explicado en capítulos anteriores lo que se ve en superficie es una muestra clara de lo que sucede en el subsuelo, del calor que se tiene y su forma de transportarse a superficie. Este equipo, ahora en uso por la empresa GNS en Nueva Zelanda permite estimaciones de potencial geotérmico de una manera no invasiva, asequible, y clara.

Los conocimientos en matemáticas, física, geología y geofísica adquiridos durante la carrera permitieron la realización de una investigación detallada de los materiales, diseño y utilización, así como experimentos que demostraran la mejor metodología para el equipo. Comprendiendo en detalle como funciona un sistema geotérmico y por lo tanto como lograr la mejor medición de los parámetros deseados y obtener un potencial geotérmico.

Las nuevas unidades de calorímetros así como el desecante se dejaron totalmente funcionales como equipo de campo accesible y amistoso con el usuario. Se aseguró su máxima transferencia de calor para una aproximación de flujo de calor del sitio más realista.

La selección de un desecante se realizó después de una investigación exhaustiva alrededor de temas físicos y químicos relacionada con materiales así como con el proceso de ebullición que ocurre cerca de la superficie en un sitio geotérmico. Los experimentos realizados demostraron la mejor metodología para el material, y los experimentos en conjunto con el calorímetro fueron más exitosos que los desecantes utilizados previamente por distintos investigadores. La selección de un nuevo material así como la metodología para utilizarlo en campo superó las expectativas, ya que los intentos previos se habían quedado muy distantes de los valores obtenidos por el calorímetro. Al igual que con el calorímetro el uso del nuevo desecante y su comparación con el calorímetro mostró comportamientos no analizados antes en los

sitios medidos, por lo que se realizaran más experimentos en campo para poder afinar las aproximaciones realizadas con este equipo.

La optimización de las dos nuevas unidades para medir el flujo de calor conductivo y convectivo (calorímetros), fue sumamente exitosa, su utilización tanto en laboratorio como en campo despertó nuevas preguntas con respecto al comportamiento de un sitio geotérmico.

Se consideró un proyecto de innovación tecnológica exitoso, estudios de campo se estarán llevando a cabo con el equipo, siguiendo la metodología recomendada. Para la exploración geotérmica en lugares donde no se permite equipo invasivo, pero donde el interés por saber el potencial geotérmico es alto.

Bibliografía

- Benseman, R. F. (1959). The calorimetry of steaming ground in thermal areas. *Journal of Geophysical Research*, 64(1), 123. <http://doi.org/10.1029/JZ064i001p00123>
- Bibby, H. M., Bennie, S. L., Stagpoole, V. M., & Caldwell, T. G. (1994). Resistivity Structure of the Waimangu, Waiotapu, Waikite and Reporoa Geothermal Areas, New-Zealand. *Geothermics*, 23(5–6), 445–471. [http://doi.org/10.1016/0375-6505\(94\)90013-2](http://doi.org/10.1016/0375-6505(94)90013-2)
- Bromley, C. J., & Hochstein, M. P. (2005). Heat Discharge of Steaming Ground at Karapiti (Wairakei), New Zealand, (April), 24–29.
- Bromley, C. J., van Manen, S. M., & Bromley, R. (2011). Tauhara Heat Flow Assessment 2009, (July).
- Bromley, C. J., van Manen, S. M., & Mannington, W. (2011). Heat Flux From Steaming Ground: Reducing Uncertainties.
- Cole, J.W., 1978, Andesites of the Tongariro volcanic centre, North island, New Zealand: Jour. Volc. Geothermal Res., v. 3, p. 121-153.
- Duffield, W. a., & Sass, J. H. (2003). Geothermal energy: Clean power from the earth's heat. *U. S. Geological Survey Circular*, (1249), 1--36. Retrieved from <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=16240582>
- Elia, M., McDonald, T., & Crisp, A. (1986). Errors in measurements of CO₂ with the use of drying agents. *Clinica Chimica Acta*, 158(3), 237–244. [http://doi.org/10.1016/0009-8981\(86\)90287-1](http://doi.org/10.1016/0009-8981(86)90287-1)
- Gaudin, D., Finizola, A., Delcher, E., Beauducel, F., Allemand, P., Delacourt, C., ... Di Gangi, F. (2015). Influence of rainfalls on heat and steam fluxes of fumarolic zones: six months records along the Ty fault (Soufrière of Guadeloupe, Lesser Antilles). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 302, 273–285. <http://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.06.015>
- Gupta, H., & Roy, S. (2007). Exploration techniques. *Geothermal Energy*, 61–119. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/B87KH-4PVHPYG-B/2/904c3e334ac271a246b28a82dbc0e358>
- Harsh K, G., & Sukanta, R. (2006). Worldwide status of geothermal resource utilization. In *Geothermal Energy: An Alternative Resource for the 21st Century* (p. 292).
- Hochstein, M. P., & Bromley, C. J. (2005). Measurement of heat flux from steaming

- ground. *Geothermics*, 34(2), 131–158.
<http://doi.org/10.1016/j.geothermics.2004.04.002>
- Hochstein, M. P., & Bromley, C. J. (2005). Recent Fumarole Measurements in the Karapiti Area, Craters of the Moon, Wairakei Field, New Zealand. *Proceedings of the 21st New Zealand Geothermal Workshop 1999*, 15–20.
- Hurwitz, S., Harris, R. N., Werner, C. a., & Murphy, F. (2012). Heat flow in vapor dominated areas of the Yellowstone Plateau Volcanic Field: Implications for the thermal budget of the Yellowstone Caldera. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(10), 1–18. <http://doi.org/10.1029/2012JB009463>
- IEA. (2014). *IEA Geothermal Implementing Agreement Mexico Country Report*.
- International Energy Agency. (2013). *Implementing Agreement Annual Report*.
- Mia, M. B., Fujimitsu, Y., & Bromley, C. J. (2012). Estimation and Monitoring heat discharge rates using Landsat ETM + thermal infrared data: a case study in Unzen geothermal field, Kyushu, Japan.
- Newson, J. (2010). Models of geothermal surface features at Wairakei, 1994, 257.
- Newson, J. A., O’Sullivan, M. J. ., Bromley, C. J., & Hochstein, M. P. (2001). Modelling Shallow Heat Transfer at Karapiti.
- Nicholson, K. (1993). *Geothermal Fluids*.
- Quijano-León, J. L., & Gutiérrez-Negrín, L. C. A. (2000). Geothermal Production and Development Plans in Mexico. *Proceedings World Geothermal Congress*, 355–361.
- Rosenberg, M.D., Bignall, G., and Rae, A.J.: The geological framework of the Wairakei-Tauhara Geothermal System ,New Zealand. *Geothermics*, 38, (2009), 72-84.
- Smid, E., & Mazot, A. (2012). Soil Gas CO 2 Concentrations & CO 2 Fluxes in the Auckland Volcanic Field Soil Gas CO 2 Concentrations & CO 2 Fluxes in the Auckland Volcanic Field. *Earth Science*, (January).
- Werner, C. A., Hochstein, M. P., & Bromley, C. J. (2004). CO2-flux of steaming ground at Karapiti, Wairakei. *Proceedings 26th NZ Geothermal Workshop*, 59–64.
- White, B. (2006). An Assessment of Geothermal Direct Heat Use in New Zealand, (July), 1–30.
- Hochstein, Browne, P.R., 2000. Encyclopedia of Volcanoes, Academic Press
- Hunt, T.M., Bromley, C.J., Risk, G.F., Shenburn, S., Soengkono, S., 2009. Geophysical investigations of the Wairakei Field. *Geothermics* 38, 85–97

Anexos

Anexo 1. Manual de Campo

Previo a la medición

Se tienen algunos pasos previos a las medidas en campo. Medidas del sitio deben ser localizadas y tapadas con las capas de madera el día previo a las mediciones, para así eliminar cualquier calentamiento por causas solares en la superficie. Al mismo tiempo si la superficie no es plana se debe de aplanar tratando de alterar en lo más mínimo el suelo.

Para las mediciones de calor convectivo se debe de pesar las bolsas de desecante y guardarlas en bolsas selladas antes de salir a campo (entre más cercano a la medida mejor).

Midiendo el Flujo de Calor

El calor de fondo se debe de medir entre cada medida de calor. Se tienen 5 pasos para la medición del flujo de calor.

- 1) 5 min flujo de calor en el ambiente, colocando el calorímetro sobre el bloque de poliestireno.
- 2) 5 min flujo de calor total, en la superficie del sitio (contacto con el suelo)
- 3) 5 min flujo de calor en el ambiente (en bloque de poliestireno)
- 4) 5 min the calor convectivo, colocando el calorímetro sobre el aro de 2 cm de alto.
- 5) 5 min flujo de calor en el ambiente (en bloque de poliestireno)

Adicionalmente a las mediciones del calorímetro, se mide la temperatura del aire, temperatura del suelo (usando la pistola de infrarrojo térmico) en 5 puntos para sacar un promedio, la temperatura del agua en el calorímetro se debe medir al inicio y al final de las mediciones.

Para el desecante, se utiliza la bolsa pesada previamente. Colocándola dentro del receptáculo de plástico a un lado de las mediciones con el calorímetro, dejando que absorba el vapor de agua por 30 minutos. Después de esto se vuelve a meter dentro de su bolsa de plástico re-sellable y se anota la clave del sitio en la misma.

El gradiente de temperatura también se determina en cada sitio, midiendo temperaturas a profundidades de 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, 50 cm y 100 cm o cuando se alcance el punto de ebullición (en este sitio era de 98°C).

Anexo 2. Datos técnicos equipo.

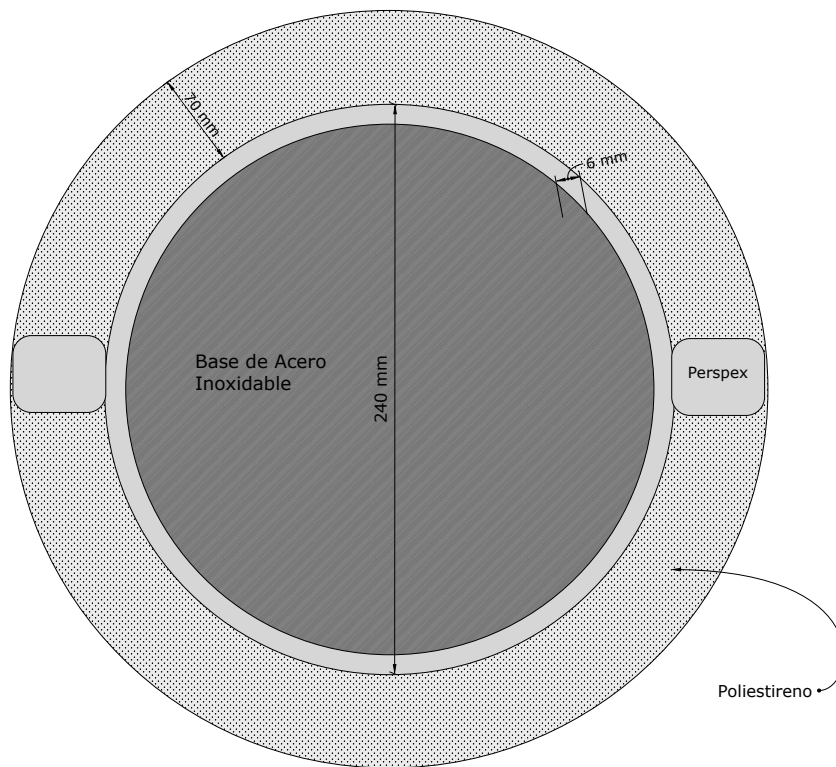


Figura 19. Base del Calorímetro

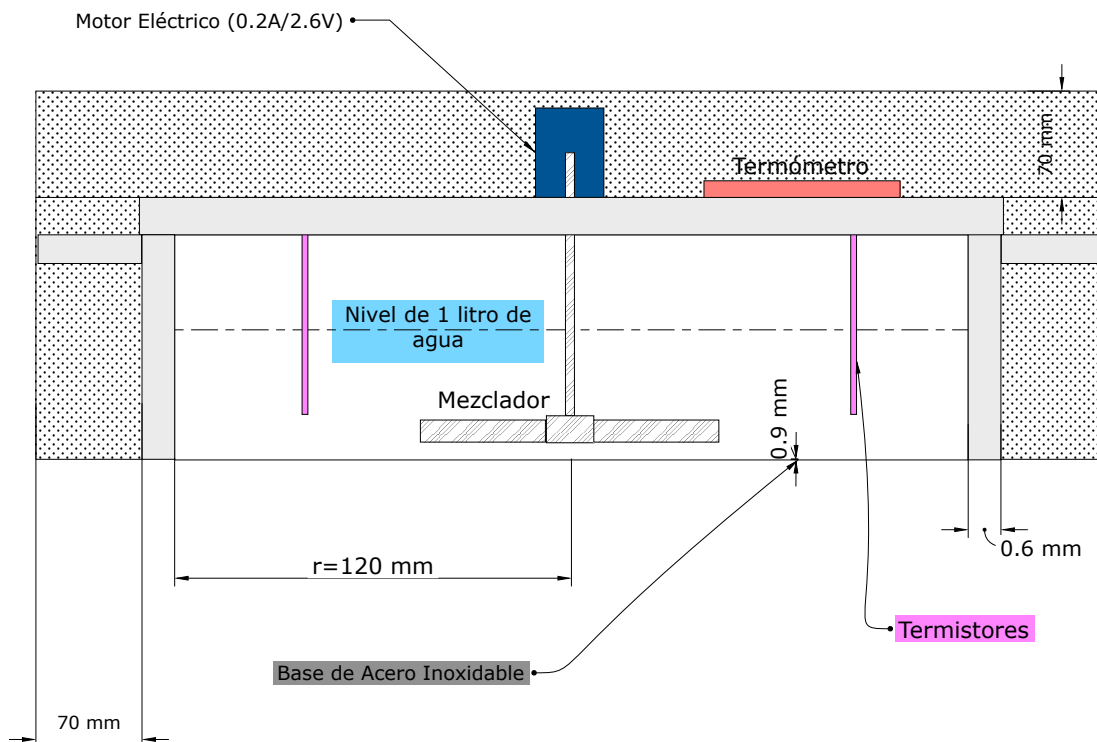


Figura 20. Corte Transversal en Calorímetro

Anexo 3. Fotos del Equipo



Foto 3. Calorímetro Unidad A.



Foto 4. Desecante seleccionado .



Foto 5. Equipo colocado en Crown Park, Taupo, Nueva Zelanda.

Anexo 4. Equipo de Campo

El calorímetro aunque sencillo y de simple funcionamiento, requiere bastante equipo adicional. Por lo que entre más se pueda acercar al sitio de medición en un automóvil será menos extenuante la labor. El equipo base para su uso es el siguiente.

- Calorímetro
- Batería para el motor del calorímetro
- Registrador de datos (DT80 datalogger) con su batería de reserva
- Computadora Portátil y su conexión al registrador de datos
- Bloques de poliestireno
- Tapetes de madera para sombrear

- Aros de plástico, 2 centímetros de grosor
- Cilindro medidor para el agua
- Agua (a 3 distintas temperaturas, para lograr temperatura ambiente)
- Cronometro
- Pistola térmica infrarroja.

Para la utilización del desecante se requiere lo siguiente.

- Paquetes de desecante pesados previamente en bolsas selladas
- Receptáculo de plástico para las mediciones

Glosario

Absorción: En química, es un proceso en el cual átomos, iones o moléculas son atrapados en un volumen.

Absortividad: Cantidad de luz absorbida por una disolución.

Adsorción: Es un proceso en el cual átomos, iones o moléculas son atrapados o retenidos en la superficie de un material. El proceso inverso a la adsorción se conoce como desorción.

Advección: Transporte de un fluido.

Bomba de Calor: Máquina térmica que opera como un refrigerador, usando como fuente de calor el subsuelo, pudiendo usarse para proporcionar enfriamiento o calefacción.

Emisividad: Proporción de radiación térmica emitida por una superficie u objeto debida a su temperatura.

Entalpía: Es una magnitud termodinámica simbolizada por la letra H, cuya variación expresa la cantidad de energía absorbida o cedida por un sistema.

Entropía: Es una magnitud termodinámica simbolizada por la letra S, que mide el número de microestados compatibles con el macroestado en equilibrio. A mayor entropía mas probable es el macroestado.

Transferencia conductiva: Proceso de transmisión de calor basado en el contacto entre los cuerpos, sin intercambio de materia. De un cuerpo de mayor temperatura a uno de menor temperatura.

Transferencia convectiva: Proceso de transmisión de calor por medio de un fluido que transporta el calor entre dos zonas con distintas temperaturas.

Transferencia radiativa: Proceso de transmisión de calor debido a la temperatura de un cuerpo, no existe contacto entre los cuerpos, ni fluidos intermedios que transporten el calor.