

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE POSGRADO

DIPLOMADO EN GEOTERMIA PARA AMÉRICA LATINA
EDICIÓN 2017



TEMA: EFECTO DE ALTERACIÓN HIDROTHERMAL EN LAS
PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA ROCA; CASO DE
ESTUDIO: PLATAFORMA DE POZO Y PLANTA GEOTÉRMICA.

PRESENTAN: Mario Adalberto Pacheco Acosta
Blanca Margarita Pérez de Merino

ASESOR: Elizabeth Torio Henríquez

CIUDAD UNIVERSITARIA, NOVIEMBRE 2017

1. Resumen

Este documento plantea la necesidad de establecer una metodología para la selección de sitios que sean adecuados para albergar una plataforma geotérmica o la planta geotérmica, ya que las áreas destinadas para geotermia sufren de características ambientales propias, que tornan más complejo el análisis de las mismas.

El documento se enfoca en la teoría para el análisis del suelo sobre el cual se cimentará dichas construcciones, y cómo se ven afectadas por el ambiente geotérmico, se realiza una investigación sobre alteración hidrotermal y como estas afectan las características mecánicas del suelo. Se establecen relaciones entre el grado de alteración que presenta el suelo y que tan favorables son las características mecánicas del mismo en esa condición para poder soportar una plataforma o una planta geotérmica.

Luego como resultado de la investigación de los temas involucrados se presenta una herramienta que tiene como fin ser utilizada para determinar si los sitios que se tengan como propuesta para establecer una estructura civil son adecuados o no. La herramienta se ha diseñado de una manera práctica para que su aplicación no sea complicada o difícil de ejecutar.

Contenido

1. Resumen	2
2. Introducción	6
3. Planteamiento del problema	7
4. Justificación del estudio	8
5. Objetivos	9
5.1 Objetivo general	9
5.2 Objetivos específicos	9
6. Marco Teórico	10
6.1 Alteración Hidrotermal	10
6.1.1 Factores que controlan a la alteración hidrotermal de las rocas.	11
6.1.2 <i>Procesos debidos a la alteración hidrotermal.</i>	11
6.1.3 <i>Tipos de alteración hidrotermal</i>	12
6.2 Infraestructuras en geotermia	15
6.2.1 <i>Plataformas de perforación</i>	15
6.2.2 <i>Planta geotérmica</i>	15
6.3 Minerales de arcillas: Manifestación Superficial	17
6.4 Mecánica de suelos y rocas	19
6.4.1 Mecánica de suelos.....	19
6.4.2 <i>Propiedades mecánicas del suelo</i>	20
6.4.3 <i>Estudio de Suelos</i>	31
6.4.4 <i>Estudio Geotécnico</i>	32
6.4.5 <i>Mecánica de rocas</i>	33
6.4.6 <i>Mecánica de rocas e influencia de alteración hidrotermal.</i>	33
6.5 Cimentaciones para Súper Estructuras	35
6.5.1 <i>Pasos del Diseño de Cimentaciones</i>	36
6.5.2 <i>Capacidad de carga o apoyo de los cimientos.</i>	36
7. Metodología	37
7.1 Proyecto de investigación bibliográfica.	37
8. Análisis de datos	38
9. Presentación de resultados	41



10.	Conclusiones y recomendaciones	45
11.	Recomendaciones.....	46
12.	Agradecimientos	47
13.	Referencias bibliográficas	49

Índice de tablas

Tabla 1. Facies mineralógicas y minerales de arcilla.....	17
Tabla 2. Clasificación y variación de los suelos conforme a su textura y permeabilidad.....	24
Tabla 3. Clases de permeabilidad de los suelos.....	24
Tabla 4. Valores estimados de porosidad.....	26
Tabla 5. Ángulo de fricción interna y peso específico de suelos.....	29
Tabla 6. Valores de cargas permisibles sobre suelos en kg/cm2.....	31

Índice de figuras

Figura 1. Mineralogía de alteración hidrotermal.....	13
Figura 2. Distribución esquemática de la alteración hidrotermal asociadas con los depósitos de alta y baja sulfuración.....	14
Figura 3. Clasificación de los tipos de suelos.....	21
Figura 4. Tipos de estructura de suelos.....	22
Figura 5. Tabla de colores Munsell, con el tono más utilizado para identificar suelos.....	23
Figura 6. Límites de Atterberg.....	27
Figura 7. Efectos de humedad sobre adhesión y cohesión del suelo.....	28

Índice de fotografías

Fotografía 1. Alteración hidrotermal en los cimientos de un muro.....	39
Fotografía 2. Formación de corrosión.....	39
Fotografía 3. Formación de algas.....	40
Fotografía 4. Alteración hidrotermal en muro.....	40
Fotografía 5. Suelos humeantes.....	40
Fotografía 6. Corrosión.....	40

2. Introducción

La explotación de los recursos geotérmicos para generar energía eléctrica en América Latina está tomando mucha relevancia ya que se ha comprobado que es una de las mejores energías renovables. Sin embargo, previo a lograr generar esta energía eléctrica existe una variedad de estudios utilizados para determinar la existencia del recurso, el potencial que el recurso representa, por mencionar algunos. pero se ha dejado de lado aquellos estudios relacionados a la cimentación de las estructuras y las afectaciones que el suelo puede sufrir a causa de estar en presencia de un ambiente geotérmico.

Para tal fin se presenta una investigación donde se incluye una de las ciencias que interviene en el proceso de la búsqueda del recurso geotérmico, la cual es la geología, ya que es la ciencia de la tierra, así como las rocas y minerales.

El estudio se trata de relacionar la afectación de los ambientes geotérmicos, a las propiedades mecánicas de los suelos. Se incluye la alteración hidrotermal, los tipos de alteración hidrotermal más comunes y los factores que controlan la alteración hidrotermal. Se dedica un apartado especial a los minerales de arcillas, ya estas representan un nuevo escenario al momento de decidir poner cualquier estructura sobre este tipo de suelo.

Sobre estructuras civiles que estén relacionada a la geotermia se hace una breve reseña de las que este documento contempla, estas estructuras son las plataformas y la planta de generación, que para este caso ha sido considerada como una súper estructura.

Se hace mención de la mecánica de suelos, la cual da peso a la investigación ya que se exponen las principales características de los suelos y como se ven afectadas, para bien o mal, ante los efectos de la alteración hidrotermal.

Finalmente, en el análisis de resultados, se hace una síntesis de las principales características mecánicas de los suelos que luego servirán para conformar una herramienta practica que sirva para determinar si los sitios elegidos para hacer la construcción de las plataformas o la planta geotérmica es adecuada para soportar la estructura.

3. Planteamiento del problema

El Salvador cuenta con campos geotérmicos que llevan años en operación y además se encuentran áreas geotérmicas en la fase exploratoria. Se toma como base del estudio los campos que están actualmente en operación donde se puede observar el efecto de alteración hidrotermal en las estructuras civiles existentes.

La influencia de alteración hidrotermal en los suelos y las estructuras civiles puede ser no visible en los primeros años de operación, esto dependerá de la intensidad de alteración que se presente. Una alteración bien desarrollada podría causar problemas en la estructura y la reparación de esto acarrea un costo no previsto.

La afectación de alteración hidrotermal en los suelos no ha sido estudiada a profundidad ya que la bibliografía relacionada al tema es escasa, esto puede ser debido a que la unión de estos temas, la ingeniería y geología es poco común. Se tiene como referencia el estudio realizado en 2011 para el Short Course organizado por la UNU-GTP y LaGeo, en donde se exponen los riesgos geológicos y aspectos geotécnicos para áreas geotérmicas; en el presente trabajo solamente se trató de abarcar plantas de generación y plataformas.

Es preciso levantar información que sea de utilidad en la temática, ya que como se mencionó anteriormente, se tiene campos en desarrollo y se debe contar con más información y de esta manera evitar dejar al azar estas afectaciones.

4. Justificación del estudio

Esta investigación representa una gran oportunidad para poder iniciar estudios más puntuales y específicos sobre la afectación de alteración hidrotermal en las obras civiles relacionadas a la geotermia, como las plataformas y la planta de generación.

Además, los resultados que se obtengan de esta investigación servirán para que puedan ser utilizados en los actuales campos geotérmicos en desarrollo. Servirá como una herramienta practica que ayude a determinar si un área específica reúne las características mecánicas para soportar el peso y esfuerzos a los que será sometido con la construcción de las obras civiles que se vayan a destinar en esa área.

5. Objetivos

5.1 Objetivo general

Establecer una metodología para la selección de sitios para plataforma de pozo y planta geotérmica.

5.2 Objetivos específicos

1. Conocer los diferentes tipos de alteración hidrotermal en área geotérmica.
2. Determinar los efectos de la alteración hidrotermal en las propiedades de las rocas.
3. Correlacionar las propiedades mecánicas y físicas de las rocas con la intensidad de la alteración

6. Marco Teórico

La producción de la energía geotérmica, aparte de la existencia del recurso geotérmico necesita la construcción de obras civiles que le permitan obtener, transportar y controlar el recurso y así poder generar energía eléctrica, nos referimos a la construcción de Plantas y Plataformas de pozos productores y reinyectores, para los cuales es de sumo interés geológico y geotécnico la selección del sitio en el que se ubicaran y que este reúna las condiciones mecánicas adecuadas.

Se presenta breve concepto de alteración hidrotermal y mecánica de roca en los siguientes capítulos.

6.1 Alteración Hidrotermal

Se define como alteración hidrotermal al “intercambio químico que ocurre durante una interacción fluido hidrotermal y roca original”. (Henríquez, 2005, p.6).

El término alteración hidrotermal es utilizado para calificar “la respuesta mineralógica, textural y química de las rocas a un cambio ambiental, en térmicos químicos y termales, con la presencia de agua caliente, vapor o gas. La alteración hidrotermal ocurre a través de la transformación de fases minerales, crecimiento de nuevos minerales, disolución de minerales y/o precipitación, y reacciones de intercambio iónico entre los minerales constituyentes de una roca y el fluido caliente que circuló por la misma. Aunque la composición litológica inicial tiene una influencia en la mineralogía secundaria (hidrotermal), su efecto es menor que el debido a la permeabilidad, temperatura y composición del fluido”. (Maksaev, 2005, p.1).

Maksaev (2005) afirma que “la temperatura del fluido y el pH del mismo son los factores más relevantes en la asociación mineralógica resultante de los procesos de alteración hidrotermal, más que la litología” (p.1).

En términos generales se puede establecer un orden relativo de susceptibilidad a la alteración de los minerales primarios:

Olivino > magnetita > hiperstena > hornblenda > biotita > plagioclasa

La característica esencial de la alteración hidrotermal es la conversión de un conjunto mineral inicial en una nueva asociación de minerales más estable bajo las condiciones hidrotermales de temperatura, presión y sobre todo de composición de fluidos.

El transporte de minerales, elementos, etc. involucrados en el proceso de alteración hidrotermal de las rocas puede ocurrir por infiltración o por difusión (transporte por difusión de especies químicas a través de fluidos estancados en los poros de las rocas) o por una combinación de ambos procesos. En sistemas hidrotermales la difusión e infiltración ocurren simultáneamente.

6.1.1 Factores que controlan a la alteración hidrotermal de las rocas.

Los siguientes factores como principales influyentes en el resultado de una alteración hidrotermal son:

- a) Temperatura y la diferencia de temperatura (Δt°) entre la roca y el fluido que la invade: mientras más caliente el fluido mayor será el efecto sobre la mineralogía original.
- b) Composición del fluido; sobre todo el pH del fluido hidrotermal: mientras más bajo el pH (fluido más ácido) mayor será el efecto sobre los minerales originales.
- c) Permeabilidad de la roca: Una roca compacta y sin permeabilidad no podrá ser invadida por fluidos hidrotermales para causar efectos de alteración. Sin embargo, los fluidos pueden producir fracturamiento hidráulico de las rocas o disolución de minerales generando permeabilidad secundaria en ellas.
- d) Duración de la interacción agua/roca y variaciones de la razón agua/roca. Mientras mayor volumen de aguas calientes circulen por las rocas y por mayor tiempo, las modificaciones mineralógicas serán más completas.
- e) Composición de la roca; la proporción de minerales: es relevante para grados menos intensos de alteración, dado que los distintos minerales tienen distinta susceptibilidad a ser alterados, pero en alteraciones intensas la mineralogía resultante es esencialmente independiente del tipo de roca original.
- f) Presión: este es un efecto indirecto, pero controla procesos secundarios como la profundidad de ebullición de fluidos, fracturamiento hidráulico (generación de brechas hidrotermales) y erupción o explosiones hidrotermales. Los dos factores iniciales temperatura y composición del fluido hidrotermal son lejos los más importantes para la mineralogía hidrotermal resultante de un proceso de alteración.

6.1.2 Procesos debidos a la alteración hidrotermal.

Los procesos que ocurren en la roca debido a la alteración hidrotermal ha sido identificados por el departamento de geología de la Universidad de Chile (2005, p.4) de la siguiente manera:

- Deposición directa. Los minerales son depositados directamente a partir de soluciones hidrotermales. Para poder hacerlo la roca debe tener conductos para que el fluido pueda moverse dentro de ella (ejemplo: permeabilidad debido a fracturamiento)
- Reemplazo. Muchos minerales de las rocas son inestables en un ambiente hidrotermal y estos tienden a ser reemplazados por nuevos minerales que son estables o al menos metaestables en las nuevas condiciones ambientales.

Lixiviación. Algunos de los componentes químicos de las rocas son extraídos por los fluidos hidrotermales, particularmente cationes metálicos, de modo que la roca es deprimida en dichos componentes o lixiviada.

6.1.3 Tipos de alteración hidrotermal

Para este trabajo se clasificará la alteración hidrotermal de dos formas (Vallejo, 2014), estas son:

1. Con base al mineral de alteración más abundante en la muestra. Se pueden clasificar en: silicificación, sericitización, argilización, cloritización, epidotización, carbonatación y sulfatación.
2. Según el ensamble mineralógico secundario:
 - a. Alteración potásica (feldespatos potásicos y biotita)
 - b. Alteración propilítica (epidota-clorita-albita-calcita y piritita)
 - c. Alteración filítica (cuarzo-sericita-piritita)
 - d. Alteración argílica avanzada (caolinita-alunita-cuarzo y caolinita)
 - e. Alteración argílica (caolinita-motmorillonita, esmectita o arcillas amorfas)

La **intensidad de la alteración** corresponde a un término objetivo que se refiere a la extensión en que una roca ha sido alterada, mientras que el **grado de alteración** es un término subjetivo que requiere una interpretación basada en la mineralogía de alteración. Sin embargo, se han propuesto los términos **pervasividad** para indicar la intensidad de la alteración y **extensividad** para indicar la distribución espacial de la alteración hidrotermal.

12

Una alteración pervasiva se refiere a aquella en que una roca está completamente alterada en todo su volumen, en contraposición a alteraciones poco pervasivas donde la alteración se limita a las vecindades de las fracturas por donde circuló el fluido, pero las partes masivas de las rocas están inalteradas.

La figura 1 presenta los rangos de temperatura y las condiciones de pH (neutro y ácido) en que aparecen los minerales de alteración más comunes. Los más indicativos en condiciones de pH ácido son: caolín (temperaturas inferiores a 120°C) y pirofilita (temperaturas por encima de 250°C). En pH neutro, la montmorillonita es estable hasta 140°C, mientras que la illita por encima de 220°C. Intercalaciones entre montmorillonita e illita permiten estimar temperaturas intermedias en el rango 140 – 220°C. El mineral quizás más confiable y consistente como guía de temperatura en condiciones de pH neutro es la epidota, que aparece a partir de 250°C. Este mineral ha sido encontrado en diversos sistemas geotérmicos sin importar la litología de las rocas (Browne, 1997).

MINERAL	FÓRMULA
Alunita	$KAl_3(OH)_6(SO_4)_2$
Jarosita	$KFe_3(OH)_6(SO_4)_2$
Hialoisita	$Al_4(OH)_8Si_4O_{10} \cdot 4H_2O$
Caolinita	$Al_4(OH)_8Si_4O_{10}$
Diquita	$Al_4(OH)_8Si_4O_{10}$
Pirofilita	$Al_2(OH)_2Si_4O_{10}$
Diásporo	$\alpha-Al_2O_3 \cdot OH$
Zunyita / Topáz	$Al_3Si_5O_{20}(OH,F)_{18}Cl / Al_2SiO_4(F,OH)_2$
Ilmenita	$FeTiO_3$ ó $FeO \cdot TiO_2$
Rutilo	TiO_2
Cristobalita	SiO_2
Cuarzo	$\alpha-SiO_2$
Pirita	FeS_2
Marcasita	FeS_2
Esmectita* (Montmorillonita)	$(\frac{1}{2}Ca,Na)(Al,Mg,Fe)_2(Si,Al)_4O_{20}(OH)_4 \cdot nH_2O$
Illita/Esmectita	
Clorita/Esmectita	
Illita (Hidromoscovita)	$(K,H_2O)(Al,Mg,Fe)_2(Si,Al)_4O_{10}[(OH)_2 \cdot (H_2O)]$
Clorita*	$(Fe,Mg,Al)_3(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$ **
Epidota	$Ca_2(Fe^{III},Al)Al_2[O(OH)(SiO_4)(Si_2O_7)]$
Biotita	$K(Mg,Fe)_3(OH,F)_2(Al,Fe)Si_3O_{10}$
Adularia	$KAlSi_3O_8$
Calcita	$CaCO_3$
Mordenita	$(Na,Ca,K)_4Al_5Si_{40}O_{96} \cdot 28H_2O$
Laumontita	$CaAl_2Si_4O_{12} \cdot 4H_2O$
Wairakita	$Ca(AlSi_2O_6)_2 \cdot 2H_2O$

* Grupo de minerales
** Fórmula general

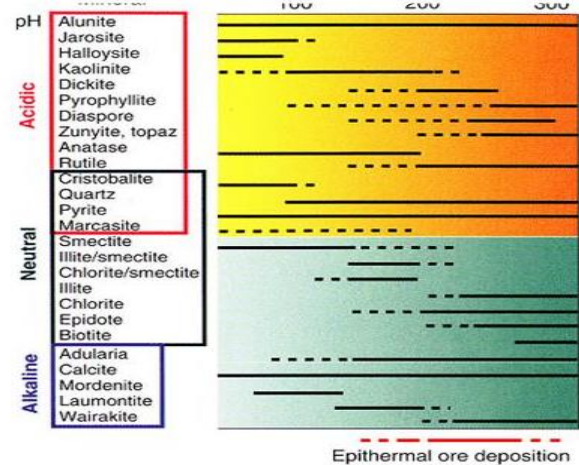


Fig. 3.1 Temperature stability of hydrothermal minerals (deduced from geothermal studies [25,41]) common in the epithermal environment, arranged by their stability with respect to pH. Zones of mineral assemblages may be more meaningful than individual minerals in mapping paleoisotherms [31,41].

Figura 1. Mineralogía de alteración hidrotermal. Referencia web: <http://www.ugr.es/~minechil/epitermales.htm>.

En contraste con alteración de pH neutros que presentan los depósitos de baja sulfuración, los depósitos de alta sulfuración contienen minerales que son estables en condiciones ácidas, tales como alunita, caolinita, dickita, pirofilita, diásporo, zunyita, etc., algunos de los cuales son sensibles a la temperatura (figura 1). Estos minerales constituyen la alteración argílica avanzada que se forma durante el lixiviado inicial en los ambientes de alta sulfuración. La roca alterada más ácida es sílice residual, llamada “sílica vuggy” o “cuarzo oqueroso”. Esta roca tan lixiviada es frecuentemente el encajante de las menas, con un halo de alteración argílica avanzada (Figura 2), que está gradado hacia fuera a illita, illita/esmectita o esmectita dependiendo de la paleotemperatura.

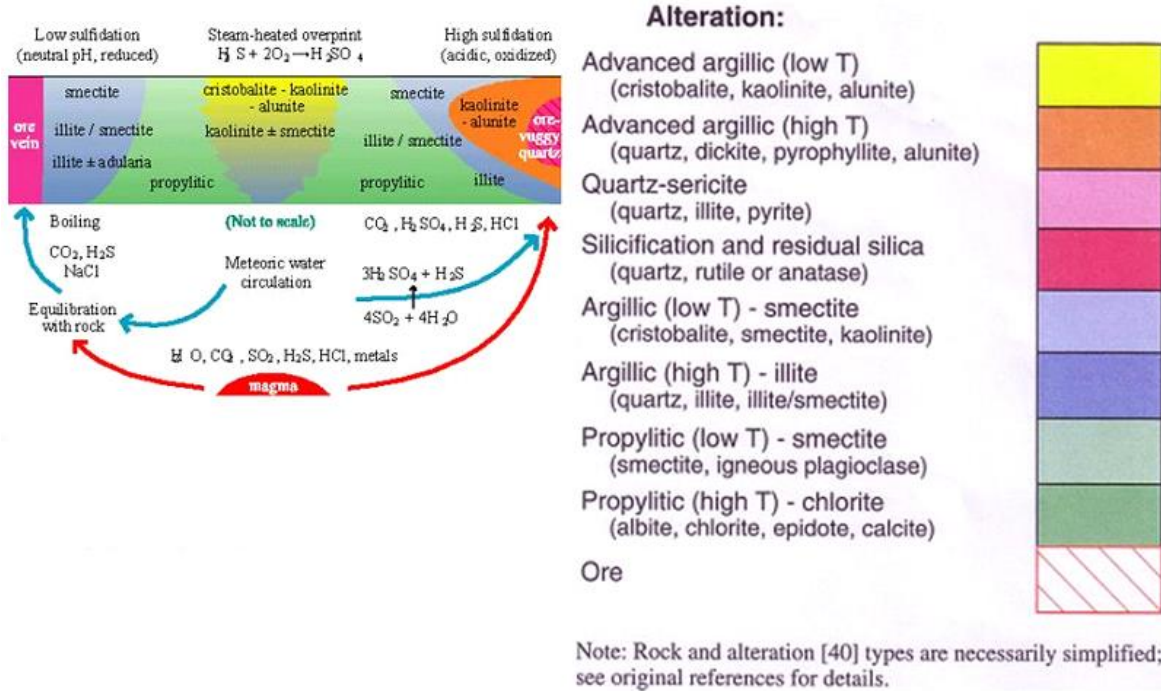


Figura 2. Distribución esquemática de la alteración hidrotermal asociadas con los depósitos de alta y baja sulfuración. Referencia web: <http://www.ugr.es/~minechil/epitermales.htm>.

6.2 Infraestructuras en geotermia

En geotermia se construye diferentes tipos de instalaciones superficiales o infraestructuras. Generalmente la zona donde se encuentra el recurso geotérmico tiene poca actividad humana por lo que las obras civiles abarcan desde las calles de acceso, plataformas geotérmicas, oficinas, casa de máquinas y bodegas. En este documento se le da especial atención a las plataformas y planta geotérmica.

6.2.1 Plataformas de perforación

Se define como plataforma de perforación “a una serie de espacios necesarios para la perforación de uno o más pozos geotérmicos y que implica actividades relativas a la perforación, manejo de los lodos de perforación, disposición de equipos, maquinarias y herramientas, oficinas para personal de perforación, circulación interna y accesos” (Betancourt, Castro y Hurtado, 2016, p16).

Estas plataformas pueden ser de dos tipos, para pozos productores o para reinyección de fluidos geotérmicos. Inicialmente ambas plataformas están destinadas para soportar el mismo peso de equipo de perforación, pero al finalizar la perforación y conociendo si los pozos han sido exitosos o no, la disposición del espacio cambia, así por ejemplo si la plataforma será productora se alojaran en ella los siguientes equipos:

- Juego de válvulas que coronan el pozo.
- Estación de separación.
- Tuberías.
- Silenciadores (de torres gemelas/ de rocas).

Si la plataforma es para reinyección los equipos que se incluyera son:

- Juego de válvulas que coronan el pozo.
- Tuberías
- Motor-bomba para impulsar agua geotérmica (a menos que sea reinyección por gravedad)

A lo anterior se le debe agregar las calles de acceso, oficinas o bodegas.

6.2.2 Planta geotérmica

Respecto a las plantas geotérmicas se identifican dos tipos:

1. Planta geotérmica a contrapresión

Es el tipo de plantas geotérmicas más simple y barato en cuanto a inversión inicial, esta puede operar con vapor seco o vapor sobresaturado, una de sus aplicaciones principales es como planta piloto para desarrollo inicial, aunque su consumo de vapor sea mayor que el de una planta a condensación. (Flamenco, 2017, p.12)

2. Planta geotérmica a condensación

Respecto a las plantas de tipo condensación, estas se caracterizan por ser útiles en campos húmedos (líquido dominante), su característica principal es que la descarga de vapor luego de la turbina no va directamente a la atmósfera, sino que va a un condensador para volver todo el vapor exhausto en líquido, utilizan un mayor número de equipos comparadas con las de contrapresión y tienen un nivel de ruido menor. (Flamenco, 2017, p.12).

3. Planta geotérmica binaria

Una planta de ciclo binario permite extraer más calor de los fluidos geotérmicos, mayor eficiencia exergética, permite utilizar los fluidos geotérmicos con menor temperatura y que no podrían ser utilizados en simple o múltiple flash. Necesita utilizar intercambiadores de calor, como vaporizadores, precalentadores y condensadores, generalmente son intercambiadores de superficie. (Flamenco, 2017, p32).

Estas plantas utilizan fluidos orgánicos, en un ciclo Rankine, los fluidos pueden ser: Propano, n-butano o, n-pentano o refrigerantes con un punto de ebullición mucho más bajo que el del agua a la misma presión. (Gudmundsson, 2017, p.7).

Por lo que para poder determinar las condiciones de la base o cimiento de plataforma y el sitio de la planta se necesita realizar un estudio de suelo (y roca), sus características y la capacidad de carga para soportar todos los equipos y accesorios.

6.3 Minerales de arcillas: Manifestación Superficial

Desde el punto de vista geológico los minerales de arcilla son minerales naturales que se formaron hace varios millones de años y que reúnen las características peculiares de composición y formación relacionadas con el curso de la evolución de la Tierra.

Los minerales de arcilla son enemigas de la ingeniería civil, debido a su plasticidad y su capacidad de expandir con la presencia de agua. Hay que tomar en cuenta que son uno de los primeros minerales de alteración en superficie ante la presencia de recursos hidrotermales.

Todo campo geotérmico se delimita como Área Posibles, Área Probable y Área Probada-Gracias a los estudios geofísicos que se realizan, por lo tanto, no en todas partes del área geotérmica se encuentran en la misma proporción los minerales de arcilla, la presencia de estas varía con la cercanía que pueda existir al reservorio geotérmico.

Es necesario comprender que toda alteración hidrotermal comienza desde lo más profundo (cercano al reservorio), hasta la superficie, para ser más exactos y literales, lo que podemos observar en el suelo.

“Si bajo nuestros pies tenemos suelos arcillosos, probablemente estamos en sitios con recurso geotérmico”.

Tabla 1. Facies mineralógicas y minerales de arcilla.

Facies	Minerales clave	Profundidad (m)	Temperatura (°C)
Argillic	Smectite, Cris, Trid, <Qz, <Corr, <Cal, Hem	0-350	50-120
Argillic-Phyllic	<Smectite, Cris, Trid, <Qz, Corr, <Cal, <Hem, >Py, <Heul, <Laum, <Cl	350-800	120-180
Phyllic	<<Smectite, <Cris, >Qz, Corr, >Cl, >Cal, <Hem, >Anhy, >Py, <Laum	800-1200	180-220
Phyllic-Propylitic	Qz, <Corr, Cal, Cl, Pen, Illite, Anhy, Py, Wai, Ep, Adularia	1200-1657	220-260
Propylitic	Qz, Cl, Pen, Ilite, <Anhy, Py, Ep, Actinolite, <Biot, <Ca, <<Preh	1657-1869	>260

Referencia: Torio, E. *Diplomado en Geotermia para América Latina* (2017).

Gracias a la extracción de testigos, para los estudios geológicos que se realizan durante la perforación de pozos y así poder apoyar en el modelo conceptual del sistema geotérmico, por lo que se puede identificar la presencia de minerales de arcilla, a qué profundidad se encuentran y la facie mineralógica asociada con estos minerales y si está cerca del reservorio geotérmico.

Saber si se encuentra minerales de arcilla y de qué tipo son es de suma importancia para la construcción de las obras civiles en los campos geotérmicos, por ejemplo, para la selección de los emplazamientos de la planta generadora y de las plataformas productoras o reinyectores es necesario que el suelo sobre el que se va a cimentar cumpla ciertos requisitos, ya que soportará esfuerzos y cargas considerablemente grandes, por lo tanto los cimientos de la superestructura tienen que ser firmes y sólidos, capaces de brindar estabilidad total durante toda la vida de servicio. Por tal razón se busca que los contenidos de minerales de arcilla en los suelos sobre los que se construirá sean bajos, para evitar los fenómenos de expansión y contracción provocados por la plasticidad de las arcillas, ya que de ocurrir cualquiera de ello las consecuencias para la estabilidad de las estructuras serán graves, pudiendo llegar a inhabilitarlas, lo que se transforma en pérdidas económicas y pone en riesgo la seguridad de las personas que laboran en dichas instalaciones.

Como ejemplo, puede suceder que ya se haya escogido el sitio donde se desea construir porque reúne condiciones de fácil acceso o no se encuentra cerca de sitios que ya tienen manifestación hidrotermal en superficie, además este posible sitio de emplazamiento no presenta manifestación visible, entonces aparentemente este sería el sitio idóneo para construir las superestructuras. Una vez elegido el posible sitio de emplazamiento es imperativo dar paso a los análisis geológicos y geotécnicos de este que confirmen que realmente este es el sitio ideal, es recomendable que los sondeos de estudio tengan una profundidad cercana a los 100-200 m, para tener un mayor rango de seguridad de que no existe manifestación hidrotermal o que los contenidos de arcilla son pobres.

Si en este estudio de suelos se encuentra manifestación hidrotermal del tipo argilítica a argilítica Intermedia (argilítica avanzada) significa que el sitio elegido no es recomendable para emplazar las superestructuras, pues el suelo ya tiene altos contenidos de minerales de arcilla (esmectita, caolinita, montmorillonita, entre otras), por lo tanto, la búsqueda del sitio ideal debe continuar.

Argilítica Intermedia (o argilítica o argilítica moderada): Importantes cantidades de caolinita, montmorillonita, esmectita o arcillas amorfas, principalmente reemplazando a plagioclasas; puede haber sericita acompañando a las arcillas; el feldespato potásico de las rocas puede estar fresco o parcialmente argilitizado. Hay una significativa lixiviación de Ca, Na y Mg de las rocas. La alteración argilítica a argilítica intermedia representa un grado más alto de hidrólisis relativo a la alteración propilítica. La argilítica intermedia o avanzada tiene lugar en rangos de pH entre 4 y 5 y puede coexistir con la alunita en un rango transicional de pH entre 3 y 4. La caolinita se forma a temperaturas bajo 300°C (aunque generalmente en el rango <150°-200°C).

6.4 Mecánica de suelos y rocas

La geotecnia y la geología aportan a la ingeniería civil el conocimiento de los materiales depositados (principalmente minerales de alteración) en las rocas en diferentes profundidades del subsuelo. Se va a dar énfasis principalmente a la condición del suelo y roca hasta los 100 y 150m de profundidad, para lo cual se requiere hacer estudios de suelos y rocas en el laboratorio y en el campo antes de iniciar la cimentación, cualquiera que sea el tipo elegido, deben efectuarse una serie de estudios en el terreno sobre el cual se va a asentar la obra. Estos estudios tienen como fin conocer las características del terreno, ya que, en función del resultado, dependerá el tipo de cimentación.

Antes de continuar es necesario comprender dos términos fundamentales:

Suelo: El suelo es la capa superficial de la corteza terrestre en la que viven numerosos organismos y crece la vegetación.

El suelo se forma por la descomposición de rocas por cambios bruscos de temperatura y la acción de la humedad, aire y seres vivos. El proceso mediante el cual los fragmentos de roca se hacen cada vez más pequeños, se disuelven o van a formar nuevos compuestos, se conoce como meteorización.

Roca: En geología se le denomina roca a cada uno de los diversos materiales sólidos, formados por cristales o granos de uno o más minerales, de que está hecha la parte sólida de la Tierra y otros cuerpos planetarios. En la Tierra el manto y la corteza están hechos de roca.

De acuerdo a lo anterior es claro que son las rocas quienes al sufrir una serie de procesos dan paso a la formación del suelo

6.4.1 Mecánica de suelos

Es la ciencia que estudia la aplicación de las leyes de la hidráulica y la mecánica o problemas de la ingeniería que trata con cimientos y acumulaciones no consolidadas de partículas solas, producto de la aceleración mecánica o descomposición química independiente del contenido del material orgánico.

La mecánica de suelos incluye:

- a) Teorías sobre el comportamiento de los suelos sujetas a cargas, basadas en simplificaciones necesarias dado el estado actual de la teoría.
- b) Investigación de las propiedades físicas de los suelos.
- c) Aplicación del conocimiento teórico y empírico de los problemas prácticos.

6.4.2 Propiedades mecánicas del suelo

El suelo es una mezcla de materiales sólidos, líquidos (agua) y gaseosos (aire). Las propiedades mecánicas de un suelo permiten al ingeniero de cimentaciones llegar a un diseño de la obra civil en la etapa de estudio, considerando los tres grandes problemas a los que él comúnmente se enfrenta como son: Los estados límite de falla (que trata sobre la estabilidad de las estructuras). Los estados límite de servicio (que se refiere a los hundimientos totales y diferenciales que sufrirá la cimentación y la superestructura). El flujo de agua a través de los suelos que influyen en el comportamiento de los mismos.

La proporción de los componentes presentes en el suelo determina una serie de propiedades que se conocen como propiedades físicas o mecánicas: textura, estructura, color, permeabilidad, porosidad, drenaje, consistencia.

Todas las características del suelo se ven afectadas si existe alteración hidrotermal, la afectación es de adentro (más profundidad) hacia afuera (superficie).

a) Textura

La textura de un suelo es la proporción de los tamaños de los grupos de partículas que lo constituyen y está relacionada con el tamaño de las partículas de los minerales que lo forman y se refiere a la proporción relativa de los tamaños de varios grupos de partículas de un suelo.

La textura del suelo se considera una propiedad básica porque los tamaños de las partículas minerales y la proporción relativa de los grupos por tamaños varían considerablemente entre los suelos, pero no se alteran fácilmente en un determinado suelo

El procedimiento analítico mediante el que se separan las partículas de una muestra de suelo se le llama análisis mecánico o granulométrico (Norma ASTM D 422, C 136, C-136M y C 117-95) y consiste en determinar la distribución de los tamaños de las partículas. Este análisis proporciona datos de la clasificación, morfología y génesis del suelo, así como, de las propiedades físicas del suelo como la permeabilidad, retención del agua, plasticidad, aireación, capacidad de cambio de bases, etc.

El suelo puede clasificarse de la siguiente manera: Suelos de Grano Grueso, Suelos de Grano Fino y Suelos de estructura Orgánica

DIVISION PRINCIPAL		SIMBOLO DEL GRUPO	NOMBRES TÍPICOS	CRITERIO DE CLASIFICACION				
SUELOS DE GRANOS GRUESOS 50% o más es retenido en el tamiz No. 200	GRAVAS 50% o más de la fracción gruesa es retenido en el tamiz No. 4	GW	Gravas bien gradadas y mezclas de arena y grava con pocos finos o sin finos	Clasificación basada en el porcentaje de finos Menos del 5% pasa por el tamiz No. 200 Más del 12% pasa por el tamiz No. 200 15% a 12% pasa por el tamiz No. 200 Para clasificación de frontera se necesitan símbolos dobles	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ Mayor que 4 $C_c = \frac{D_{30}}{D_{10} \times D_{60}}$ Entre 1 y 3 Si los criterios para GW no se cumplen			
		GP	Gravas y mezclas de gravas y arenas mal gradadas con pocos finos o sin finos					
		GM	Gravas limosas, mezclas de grava - arena y limo					
		GC	Gravas arcillosas, mezclas de grava - arena y arcilla					
	ARENAS Más del 50% de la fracción gruesa pasa por el tamiz No. 4	GRAVAS CON FINOS	SW		Arenas y arenas gravosas bien gradadas con pocos finos o sin finos	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ Superior a 6 $C_c = \frac{D_{30}}{D_{10} \times D_{60}}$ Entre 1 y 3 Si no se cumplen los criterios para SW		
			SP		Arenas y arenas gravosas mal gradadas con pocos finos o sin finos			
		ARENAS LIMPIAS	SM		Arenas limosas, mezclas de arena limo		Límites de Atterberg localizados bajo la línea "A" o índice de plasticidad inferior a 4. Para los límites de Atterberg localizados en el área sombreada se debe clasificar utilizando símbolos dobles.	
			ARENAS CON FINOS		SC			Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla
					ML			Limos inorgánicos, arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas
			SUELOS DE GRANOS FINOS 50% o más pasa por el tamiz No. 200		LIMOS Y ARCILLAS Límite líquido de 50% o inferior			CL
OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad							
MH	Limos inorgánicos, arenas finas o limos micáceos o de diatomeas limos elásticos							
LIMOS Y ARCILLAS Límite líquido superior a 50%	CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas grasas						
	OH	Arcillas orgánicas de plasticidad alta o media						
	PT	Turba, estiércol y otros suelos altamente orgánicos		Para la identificación visual y manual, véase ASTM norma D 2488				

Figura 3. Clasificación de los tipos de suelos. Referencia web. http://www.wikivia.org/wikivia/index.php/Clasificaci%C3%B3n_ASTM

Si existe alteración hidrotermal visible, probablemente la presencia de suelos arcillosos será predominante, por ejemplo, la alteración puede no ser visible pero conforme se realizan los estudios profundos los minerales de arcilla comienzan a aparecer, lo cual será el primer indicio de que ese sitio no sea el más adecuado para construir.

b) ESTRUCTURA

La estructura es la forma en que las partículas del suelo se reúnen para formar agregados. De acuerdo a esta característica se distinguen suelos de estructura esferoidal (agregados redondeados), laminar (agregados en láminas), prismática (en forma de prisma), blocosa (en bloques), y granular (en granos). La estructura del suelo se define por la forma en que se agrupan las partículas individuales de arena, limo y arcilla.

- **Grado de estructura**

El grado de estructura es la intensidad de agregación y expresa la diferencia entre la cohesión dentro de los agregados y la adhesividad entre ellos. Debido a que estas propiedades varían según el contenido de humedad del suelo, el grado de estructura debe determinarse cuando el suelo no esté exageradamente húmedo o seco. Existen cuatro grados fundamentales de estructura que se califican entre 0 y 3, de la manera siguiente:

Grado 0: Sin estructura: condición en la que no existen agregados visibles o bien no hay un ordenamiento natural de líneas de debilidad, tales como:

- Estructura de aglomerado (coherente) donde todo el horizonte del suelo aparece cementado en una gran masa;
- Estructura de grano simple (sin coherencia) donde las partículas individuales del suelo no muestran tendencia a agruparse, como la arena pura;

Grado 1: Estructura débil: está deficientemente formada por agregados indistintos apenas visibles. Cuando se extrae del perfil, los materiales se rompen dando lugar a una mezcla de escasos agregados intactos, muchos quebrados y mucho material no agregado;

Grado 2: Estructura moderada: se caracteriza por agregados bien formados y diferenciados de duración moderada, y evidentes aunque indistintos en suelos no alterados. Cuando se extrae del perfil, el material edáfico se rompe en una mezcla de varios agregados enteros distintos, algunos rotos y poco material no agregado;

Grado 3: Estructura fuerte: se caracteriza por agregados bien formados y diferenciados que son duraderos y evidentes en suelos no alterados. Cuando se extrae del perfil, el material edáfico está integrado principalmente por agregados enteros e incluye algunos quebrados y poco o ningún material no agregado.



Figura 4. Tipos de estructura de suelos. Referencia web: <http://asaluddenuestrosuelo.blogspot.com/2016/07/>

Los suelos que presentan alteración hidrotermal pueden tener estructura débil o no tener estructura y pueden ser porosos.

c) COLOR

Utilizando como referencia el color que presenta una muestra se puede predecir de buena manera la calidad de las propiedades que tiene el suelo. Grisales (2014, p7) expone que el color rojo en una muestra indica el contenido de óxidos de hierro y manganeso, el amarillo indica óxidos de hierro hidratado; el blanco y el gris indican presencia de cuarzo, yeso y caolín; y el negro y marrón indican materia orgánica.

La medición de color del suelo se realiza con un sistema estandarizado basado en la “tabla de colores Munsell”, en donde se miden los tres componentes del color:

- Tono (hue), en suelos generalmente rojizo o amarillento
- Intensidad o brillantez (chroma)
- Valor de luminosidad (calue)



Figura 5. Tabla de colores Munsell, con el tono más utilizado para identificar suelos.

Por lo general los suelos alterados presentan colores claros, debido a la presencia de caolinita (arcilla), que se forma en condiciones de temperatura menor a los 300°C.

d) PERMEABILIDAD

Esta propiedad se relaciona con la capacidad del suelo para poder transmitir o dejar pasar el agua o el aire.

La permeabilidad del suelo se relaciona con su textura y estructura, el tamaño de los poros del suelo reviste gran importancia con respecto a la tasa de filtración (movimiento del agua hacia dentro del suelo) y a la tasa de percolación (movimiento del agua a través del suelo). El tamaño y el número de los poros guardan estrecha relación con la textura y la estructura del suelo y también influyen en su permeabilidad.

De acuerdo a su textura la permeabilidad puede variar según se muestra en la tabla 1:

Tabla 2. Clasificación y variación de los suelos conforme a su textura y permeabilidad.

Suelo	Textura	Permeabilidad
Suelo arcilloso	Fina	Muy Lenta ↓ Muy Rápida
Suelo limoso	Moderadamente fina	
	Moderadamente gruesa	
Suelo Arenoso	Gruesa	

Referencia web: http://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s09.htm

• **Coefficiente de Permeabilidad K**

La permeabilidad del suelo suele medirse en función de la velocidad del flujo de agua a través de éste durante un período determinado. Generalmente se expresa o bien como una tasa de permeabilidad en centímetros por hora (cm/h), milímetros por hora (mm/h), o centímetros por día (cm/d), o bien como un coeficiente de permeabilidad en metros por segundo (m/s) o en centímetros por segundo (cm/s).

Factores que influyen en el coeficiente de permeabilidad

1. relación de vacíos
2. temperatura del fluido
3. estructura y estratificación
4. agujeros y fisuras
5. tamaño de partículas
6. aire encerrado y materiales extraños en los vacíos

Clases de permeabilidad de los suelos para obras de ingeniería civil:

Tabla 3. Clases de permeabilidad de los suelos.

Clases de permeabilidad de los suelos	Coeficiente de Permeabilidad K en m/s	
	Límite Inferior	Límite Superior
Permeable	$2 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-1}$
Semipermeable	$1 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Impermeable	$1 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-7}$

Referencia web: http://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s09.htm

Los suelos arcillosos son prácticamente impermeables gracias a las propiedades plásticas de las arcillas, mismas que también son eléctricamente conductoras.

e) **POROSIDAD**

Esta propiedad depende de la textura y de la estructura del suelo, la porosidad es un sistema de espacios vacíos o poros.

Los poros en el suelo se distinguen en: macroscópicos y microscópicos. Los primeros son de notables dimensiones, y están generalmente llenos de aire, en efecto, el agua los atraviesa rápidamente, impulsada por la fuerza de la gravedad. Los segundos en cambio están ocupados en gran parte por agua retenida por las fuerzas capilares.

La porosidad puede ser determinada de la siguiente manera:

$$p = \frac{S - Sa}{S} * 100$$

dónde:

P = porosidad en porcentaje del volumen total de la muestra;

S = densidad real del suelo

Sa = densidad aparente del suelo

La porosidad de una roca puede ser clasificada de dos maneras:

1. Según su origen

De acuerdo a su origen, la porosidad puede ser clasificada en primaria o intergranular y secundaria o inducida. La porosidad primaria o intergranular es aquella que se origina durante el proceso de deposición de material que da origen a la roca. Por otra parte la porosidad secundaria es aquella que se origina por algunos procesos naturales o artificiales posteriores al momento en el cual los sedimentos que dieron origen a la roca fueron depositados.

En general las rocas con porosidad primaria presentan características más uniformes que aquellas que presentan parte de su porosidad secundaria o inducida.

2. Según la comunicación de sus poros

Debido a que el material cementante puede sellar algunos poros de la roca, aislándolos del resto del volumen poroso, los poros se pueden encontrar unidos entre sí, o aislados. Dependiendo de cómo sea la comunicación de estos poros, la porosidad se puede clasificar de la siguiente manera:

- a) Total o absoluta.
- b) Interconectada o efectiva.
- c) No interconectada o no efectiva.

La porosidad total o absoluta de una roca se define como la fracción del volumen total de la misma que no está ocupada por matriz.

La porosidad interconectada o efectiva se define como el volumen total de la roca que representa espacios que pueden contener fluidos y se encuentran comunicados entre sí, mientras que la porosidad no interconectada o no efectiva es aquella que representa la fracción del volumen total de la roca que está conformada por los espacios que pueden contener fluidos, pero no están comunicados entre sí.

Los suelos alterados pueden ser muy porosos, pero eso no significa que sean permeables, ejemplo de ellos son las arcillas, aunque hay arcillas que pueden tener baja plasticidad.

Tabla 4. Valores estimados de porosidad.

Suelo	Porosidad total %	Porosidad efectiva %
Arcillas	40-60	0-5
Limos	35-50	3-19
Arenas finas, Arenas limosas	20-50	10-28
Arenas Gruesas, o bien clasificada	21-50	22-35
Gravas	25-40	13-26

Referencia: Sanders 1998, A Manual of Field Hidrogeology. Referencia web: http://hidrologia.usal.es/Complementos/Valores_perm_porosidad.pdf

f) CONSISTENCIA

La consistencia es la propiedad que define la resistencia del suelo a la deformación o ruptura que pueden aplicar sobre él. Según su contenido de humedad la consistencia del suelo puede ser dura, muy dura y suave. Se mide mediante tres niveles de humedad; aire-seco, húmedo y mojado. Para la construcción sobre él se requiere medidas más precisas de resistencia del suelo antes de la obra.

Se refiere a las fuerzas que permiten que las partículas se mantengan unidas; se puede definir como la resistencia que ofrece la masa de suelo a ser deformada o amasada. Las fuerzas que causan la consistencia son: *cohesión y adhesión*

Esta cohesión y adhesión del suelo comprende:

- El comportamiento con respecto a la gravedad, presión y tensión.
- La tendencia de la masa del suelo de adhesión a cuerpos extraños o sustancias.
- Las sensaciones que son evidenciadas y sentidas por los dedos del observador.

El concepto de consistencia del suelo, incluye algunas propiedades tales como la resistencia a la compresión, la friabilidad, la plasticidad, y la viscosidad.

Bajo condiciones de sequedad se dice que el suelo es blando, suave, duro, muy duro o cementado, cuando el suelo está húmedo se describe como muy friable, friable o poco friable, cuando está muy húmedo, (por encima de la capacidad de campo) se distinguen dos condiciones: plasticidad y pegajosidad. Así, se habla de suelos poco plásticos, plásticos, muy plásticos y suelos poco pegajosos, pegajosos y muy pegajosos. Pueden darse condiciones combinadas como de alta plasticidad y poca pegajosidad, dependiendo de los tipos de arcillas, sus cantidades y de sus cationes adsorbidos.

Las sugerencias de clasificación de Atterberg, sin incluir el estado viscoso de los suelos, se han dividido en cuatro estados de consistencia:

- Pegajosa: característica de adherencia a los objetos.
- Plástica: característica para ser moldeado.
- Suave: caracterizado por la friabilidad.
- Firme: caracterizado por su dureza.

Límites de Atterberg

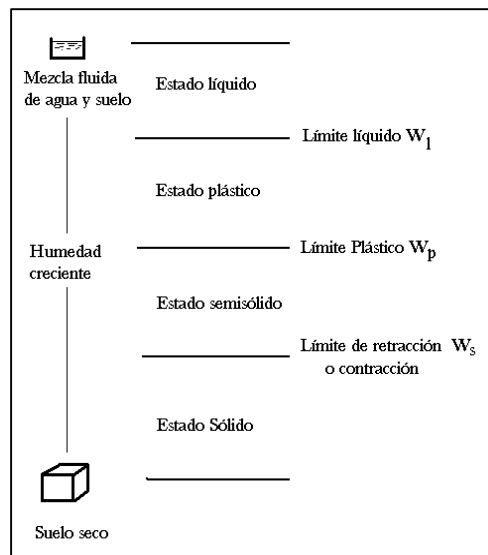


Figura 6. Límites de Atterberg. Referencia web: http://ceramica.wikia.com/wiki/L%C3%ADmites_de_Atterberg

Efectos de humedad sobre adhesión y cohesión del suelo, Kohnke 1968

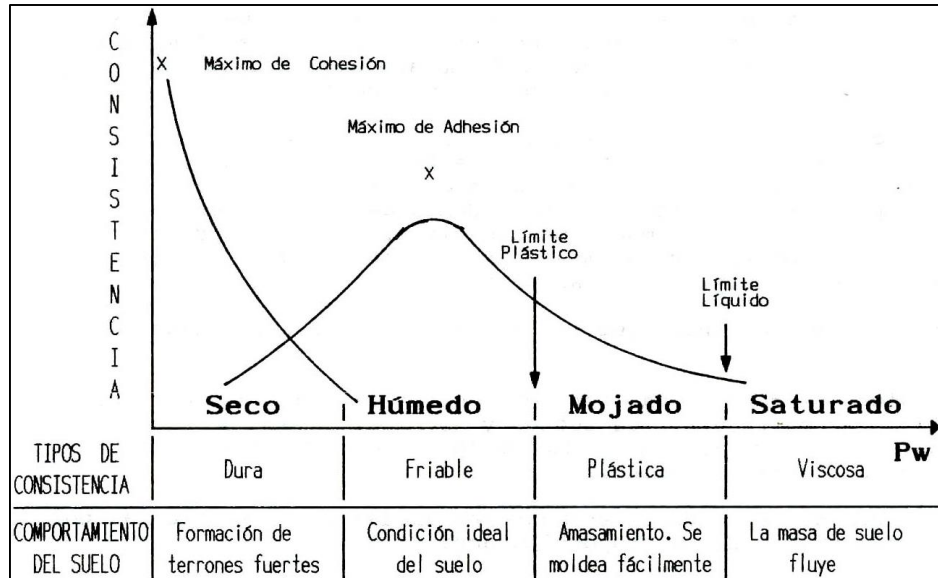


Figura 7. Efectos de humedad sobre adhesión y cohesión del suelo. Referencia web: <http://geotecnia-sor.blogspot.com/2010/11/consistencia-del-suelo.html>

Un suelo alterado cuya presencia de minerales de arcilla es considerablemente dominante, en presencia de humedad su consistencia será plástica.

Un Índice de plasticidad bajo, como por ejemplo del 5%, significa que un pequeño incremento en el contenido de humedad del suelo, lo transforma de semisólido a la condición de líquido, es decir resulta muy sensible a los cambios de humedad. Por el contrario, un índice de plasticidad alto, como por ejemplo del 20%, indica que para que un suelo pase del estado semisólido al líquido, se le debe agregar gran cantidad de agua.

En suelos no plásticos, no es posible determinar el Índice de plasticidad. El Índice de plasticidad define el campo plástico de un suelo y representa el porcentaje de humedad que deben tener las arcillas para conservarse en estado plástico. Este valor permite determinar los parámetros de asentamiento de un suelo y su expansividad potencial.

g) RESISTENCIA DE LOS SUELOS A LA PRESIÓN

Fue Coulomb (1773) quien aplicó a los suelos las leyes fundamentales de la fricción. Él descubrió que la resistencia a lo largo de una superficie de falla dentro de un suelo es función tanto de la carga por unidad de área como de la superficie de contacto. Puede considerarse como la primera contribución importante a la Mecánica de Suelos.

La resistencia de los suelos a la deformación depende, sobre todo, de su resistencia a la fuerza cortante. Esta resistencia equivale, a su vez, a la suma de dos componentes: fricción y cohesión.

La resistencia friccional surge de la irregularidad de los contactos entre partículas y es proporcional a la fuerza perpendicular entre ellas. La cohesión que es la resistencia máxima a la tensión de un suelo, es resultado de las fuerzas de atracción que hay entre gránulos en contacto íntimo y no depende de la presión normal. Sin embargo, es muy raro encontrar esta cohesión verdadera; lo más común es que los suelos tengan cierta resistencia friccional.

h) DENSIDAD

La cantidad de materia sólida presente por unidad de volumen recibe el nombre de densidad en seco del material. En el caso de los suelos granulares y orgánico-fibrosos, la densidad en seco es el factor más importante desde el punto de vista de sus propiedades ingenieriles. Una de esas propiedades es el estado o grado de compactación, que se expresa generalmente en términos de densidad relativa, o razón (como porcentaje) de la diferencia entre la densidad del suelo natural en seco y su densidad en seco mínima, dividida entre la diferencia que hay en sus densidades máxima y mínima en seco. Sin embargo, durante la construcción de rellenos ingenieriles, el grado de compactación suele especificarse como el cociente de densidad real en seco, in situ, dividida entre la densidad máxima en seco, determinada con una prueba de laboratorio diseñada para el cálculo de la relación humedad-densidad (ASTM D1557 o D698).

i) FRICCIÓN INTERNA

Es la resistencia al deslizamiento causado por la fricción que hay entre las superficies de contacto de las partículas y de su densidad. Como los suelos granulares tienen superficies de contacto mayores y sus partículas, especialmente si son angulares, presentan una buena trabazón, tendrán fricciones internas altas. En cambio, los suelos finos las tendrán bajas.

La fricción interna de un suelo, está definida por el ángulo cuya tangente es la relación entre la fuerza que resiste el deslizamiento, a lo largo de un plano, y la fuerza normal "p" aplicada a dicho plano. Los valores de este ángulo llamada "ángulo de fricción interna" f, varían de prácticamente 0° para arcillas plásticas, cuya consistencia está próxima a su límite líquido, hasta 45° o más, para gravas y arenas secas, compactas y de partículas angulares. Generalmente, el ángulo f para arenas es alrededor de 30°.

Tabla 5. Ángulo de fricción interna y peso específico de suelos.

Tipo de suelo	Consistencia	Ángulo de fricción interna ϕ en grados	Peso específico en kg/cm^2
Arena gruesa o arena con grava	compacta	40	2250
	suelta	35	1450
Arena media	compacta	40	2080

	suelta	30	1450
Arena limosa fina o limo arenoso	compacta	30	2080
	suelta	25	1365
Limo uniforme	compacta	30	2160
	suelta	25	1365
Arcilla –limo	suave	20	1440-1920
	mediana		
Arcilla limosa	suave	15	1440-1920
	mediana		
Limo	suave	0.1	1440-1920
	Mediana		

Referencia web: <https://civilgeeks.com/2011/11/30/valores-referenciales-sobre-diferentes-propiedades-de-los-suelos/>

j) COHESION

Es la máxima resistencia del suelo a la tensión. Resulta de la compleja interacción de muchos factores, como la adherencia coloidal de la superficie de las partículas, la tensión capilar de las películas de agua, la atracción electrostática de las superficies cargadas, las condiciones de drenaje y el historial de esfuerzos. Sólo existe verdaderamente cohesión en el caso de arcillas que tienen contacto de canto con cara entre sus partículas. Los suelo o terrenos no plásticos de grano fino pueden exhibir una cohesión aparente cuando están en condiciones de saturación parcial.

30

El valor de cohesión que se utiliza al diseñar depende directamente de las condiciones de drenaje bajo la carga impuesta, así como del método de prueba que se emplee para calcularlo, por lo que todo se debe evaluar cuidadosamente.

k) COMPRESIBILIDAD

Esta propiedad define las características de esfuerzo-deformación del suelo. La aplicación de esfuerzos agregados a una masa de suelo origina cambios de volumen y desplazamientos.

Estos desplazamientos, cuando ocurren a nivel de la cimentación, provocan asentamientos en ella. La limitación de los asentamientos a ciertos valores permisibles suele regir el diseño de las cimentaciones, sobre todo cuando los suelo o terrenos son granulares.

En el caso de los suelos granulares, la compresibilidad se expresa en términos del módulo de Young E, el cual suele considerarse equivalente al módulo secante de la curva de esfuerzo-deformación, obtenida por medio de una prueba triaxial estándar. El módulo disminuye al aumentar el esfuerzo axial, pero se incrementa al elevar la presión de confinamiento y al someter la muestra a cargas repetitivas.

La comprensibilidad de las arcillas saturadas se expresa como el índice de compresión CC., junto con una evaluación de la máxima presión a la que hayan sido sometidos antes.

Ambos valores se calculan por medio de pruebas de laboratorios unidimensionales estándar de consolidación (ASTM D2435). CC., representa el cambio en la proporción de vacíos por ciclo logarítmico de esfuerzo y es una función del historial de esfuerzos del terreno. Para fines prácticos, es necesario saber el valor dentro de los límites específicos de esfuerzos que se desea manejar. De acuerdo con los valores de referencia de la tabla siguiente los suelos arcillosos poseen una baja capacidad de carga comparada con otros tipos de suelo, por lo tanto, si la alteración existente es un suelo arcilloso entonces la capacidad de soporte es débil para los tipos de estructura que debe soportar.

Tabla 6. Valores de cargas permisibles sobre suelos en kg/cm².

Valores de cargas permisibles sobre suelos en kg/cm ²	
Cama de roca sólida cristalina masiva en buenas condiciones.	100
Roca foliada (esquitos, pizarras) en buenas condiciones.	40
Roca sedimentaria en buenas condiciones.	15
Gravas o arenas excepcionalmente compactas.	10
Gravas compactas o mezcla de grava y arena.	6
Grava suelta; arena gruesa compacta.	4
Compacta o arena gruesa confinada y húmeda	3
Arena fina suelta o húmeda, arena fina confinada.	2
Arcilla rígida	4
Arcilla media rígida.	2
Arcilla suave	1

Referencia web: <https://civilgeeks.com/2011/11/30/valores-referenciales-sobre-diferentes-propiedades-de-los-suelos/>

6.4.3 Estudio de Suelos

El estudio de suelos es uno de los documentos de mayor importancia en la elaboración de proyectos y construcción de obras, y en la coordinación de actividades tales como: el movimiento de tierras, las excavaciones a cielo abierto, diseño y construcción de muros, pavimentos, cimentaciones, diseño estructural con filosofía sismorresistente, comprender las posibles amenazas de tipo geotécnico, geológicas, hidrológicas y/o hidráulicas y el cómo realizar el diseño de las edificaciones, de forma tal que puedan interactuar en perfecta armonía con su entorno.

Todo estudio de suelos debe contener la siguiente información: Metodología, Estudio Geotécnico, Geología, Aspectos Sísmicos, Hidrología, Evaluación de la Capacidad

Portante del Terreno en función del Sistema de Fundación Seleccionado (Diseño por Resistencia), Cálculo de Asentamientos Esperados (Diseño por Rigidez), Conclusiones, Recomendaciones y Anexos.

6.4.4 Estudio Geotécnico

Conjunto de reconocimientos del terreno y la interpretación de los datos obtenidos, que permiten caracterizar los diversos suelos presentes en la zona de estudio. (García, 2006), el estudio geotécnico se realiza con los ensayos de campo y los ensayos de laboratorio.

- **Ensayos de campo:**

- a) Directos

- Sondeos Mecánicos: Rotación, extracción continua de testigo
- Ensayos in situ: S.P.T., Muestras inalteradas Ensayos de permeabilidad: Lefranc (suelos), Lugeon (roca) y piezómetro (PVC).
- Calicatas: Estabilidad paredes, nivel de agua, muestras alteradas e inalteradas, ensayos in situ (soil test y Vane test).

- b) Indirectos

- Penetraciones dinámicas: D.P.S.H., borros.
- Geofísica: Sísmica de refracción, tomografía.

- **Ensayos de Laboratorio**

- a) Materiales granulares (arenas/gravas):

- Análisis granulométrico por tamizado
- Humedad
- Límites Atterberg
- Contenido en sulfatos, carbonatos y materia orgánica
- Proctor Normal/Modificado y CBR

- b) Materiales Cohesivos (limos / arcillas)

- Análisis granulométrico por tamizado
- Límites de Atterberg
- Compresión simple
- Edometría
- Hinchamiento / colapso
- Corte directo
- Triaxial

- c) Análisis petrográfico y por medio de difracción de rayos X

6.4.5 Mecánica de rocas

Es una ciencia partícula de la ingeniería, es parte de la mecánica que estudia los efectos que producen fuerzas sobre las rocas y los macizos rocosos con el objeto prioritario de una larga duración de la obra, así como las exigencias de seguridad en las mismas.

La finalidad de la Mecánica de Rocas es conocer y predecir el comportamiento de los materiales rocosos ante la actuación de las fuerzas internas y externas que se ejercen sobre ellos.

Los distintos ámbitos de aplicación de la mecánica de rocas se agrupan en:

- Cuando el material rocoso constituye la estructura (excavaciones de túneles, galerías, taludes, etc.).
- Cuando la roca es el soporte de otras estructuras (cimentaciones de edificios, presas, et.).
- Cuando las rocas son empleadas como material de construcción (escolleras, pedrerales, rellenos, etc.).

6.4.6 Mecánica de rocas e influencia de alteración hidrotermal.

Como se ha venido planteando en el presente documento, la alteración hidrotermal afecta la constitución de los suelos, es decir, afectan sus características geomecánicas. En algunos casos estas afectaciones pueden ser positivas y en algunos casos pueden ser negativas (Vallejo, 2014).

Las principales características que según, Vallejo (2014), se ven afectadas son:

- La resistencia de la roca. Esta puede ser afectada favorablemente si la alteración hidrotermal predominante es la silicificación o puede ser afectada en forma negativa si se tratase de una alteración hidrotermal de sericitización o argilización.
- El espaciamiento de las fracturas. Estos pueden ser modificados por efecto de la presión del fluido hidrotermal, el cual podría incrementar la cantidad de fracturas y el espaciamiento de las fracturas.
- Las condiciones de discontinuidades, siendo el factor más importante el relleno, podrían mejorar notablemente si los fluidos hidrotermales rellenan las fracturas existentes con sílice o calcita, o disminuir notablemente si el relleno consistiera en sericita o arcillas.
- La alteración hidrotermal aumenta significativamente el grado de acidez del agua (PH), lo cual origina una mayor agresividad del agua afectando los minerales, especialmente minerales calcáreos o carbonatados.

Todo lo anterior puede ser comprobado por medio de la ejecución de ensayos de mecánica de rocas para poder obtener mejores resultados que los realizados en campo.



6.5 Cimentaciones para Súper Estructuras

En esta ocasión consideraremos como superestructuras las plataformas de perforación y las plantas generadoras, utilizando como referencia criterios que se aplican a las cimentaciones de naves industriales

Existen distintos tipos de cimentación para naves industriales, cada uno con sus propias características que la hacen diferente al resto. Las cimentaciones podrían dividirse esencialmente en tres: cimentaciones superficiales (cimentaciones ciclópeas, losas de cimentación, zapatas aisladas, zapatas corridas, zapatas combinadas), cimentaciones semiprofundas y cimentaciones profundas.

Elegir la cimentación más apropiada para el proyecto en cuestión es de suma importancia, puesto que se trata de la base (literalmente hablando), siendo el grupo de elementos que soportan a la superestructura la encargada de transferir el peso de la estructura al terreno.

Cuando se planifica la realización de una construcción, han de tomarse en consideración los distintos pesos que vaya a tener que soportar, incluyendo el de la propia estructura, la maquinaria, el mobiliario y los acabados, por mencionar algunos.

Deben contemplarse además varios escenarios de incidencia de carga, como por ejemplo la posibilidad de hundimiento o inclinaciones, e incluso colapsos, así como también las condiciones del clima.

Más que preguntarse por los tipos de cimentación para estas superestructuras que son mejores, la interrogante a descubrir sería qué sistema de cimentación es el más adecuado para ellas, es fundamental tratar de que el terreno sobre el cual se apoyarán los cimientos sea lo suficientemente resistente. Si esto no es posible, se deben buscar alternativas.

Adicionalmente a sus funciones principales, otros propósitos con los cuales deben cumplir los cimientos son:

1. Ajustarse a posibles movimientos del terreno.
2. En caso que las haya, soportar agresiones del agua y su presión, así como del propio terreno.
3. Tener tal resistencia para no romper por cortante.
4. Soportar esfuerzos de flexión producidos por el terreno, para lo que se suelen usar armaduras en su cara interior que se encargan de absorber las tracciones.

Elegir un tipo de cimentación depende de factores como las características mecánicas del terreno y su cohesión, así como la magnitud de las cargas existentes y el ángulo de rozamiento interno, entre otros. Lo más recomendable para tomar una decisión acertada, es apoyarse con expertos en el tema.

Todas las cimentaciones deben cumplir dos requisitos simultáneos:

- a) Capacidad de carga por apoyo adecuada cimentación.
- b) Asentamientos estructurales tolerables.

Aunque relacionados, estos dos requisitos no se satisfacen automáticamente al mismo tiempo.

Una cimentación con insuficiente capacidad de apoyo también se asienta excesivamente; pero lo mismo puede sucederle a una cimentación con capacidad adecuada. Por tanto, los dos factores, capacidad de carga, o apoyo, y asentamiento, deben ser revisados para basar el diseño de los cimientos en la condición que resulte crítica.

6.5.1 Pasos del Diseño de Cimentaciones

En la práctica, el procedimiento general que se sigue para el diseño de cimientos consiste:

1. Determinar la capacidad de carga inherente al tipo o tipos de cimentación posibles, dadas las condiciones del subsuelo y los requisitos estructurales del proyecto.
2. Reducir las capacidades últimas de carga calculadas multiplicándolas por un factor de seguridad de 2 a 3. El factor de seguridad más alto se utiliza donde se tiene menor certeza acerca de las condiciones del subsuelo.
3. Calcular los asentamientos que pueden ocurrirle a una cimentación con capacidad de carga permisible reducida y con las cargas estructurales previstas.
4. Si los asentamientos son inaceptables en todos los tipos de cimentación considerados, explorar otras alternativas, como mejora del suelo, reubicación del edificio, disminución de las presiones o cargas de apoyo, diferentes profundidades de apoyo y revisión de la superestructura.

6.5.2 Capacidad de carga o apoyo de los cimientos.

La capacidad de carga o apoyo es una característica de cada sistema de suelo-cimentación, y no sólo una cualidad intrínseca del suelo. Los distintos tipos de suelo difieren en capacidad de carga, pero también ocurre que en un suelo específico dicha capacidad varía con el tipo, forma, tamaño y profundidad del elemento de cimentación que aplica la presión.

7. Metodología

7.1 Proyecto de investigación bibliográfica.

Para la realización de este trabajo se recurrió a delimitar los temas que se relacionan directamente con la alteración hidrotermal, la mecánica de suelo, infraestructuras en geotermia y súper estructuras civiles.

Con estos tópicos definidos, el siguiente paso fue buscar documentos científicos, papers, recursos por internet que aportaran para justificar la investigación.

Luego teniendo la información recopilada, esta fue utilizada para analizar los factores importantes relacionados a la ingeniería civil y la geotermia, utilizando esta información se estructuro de tal manera que los resultados de la investigación se presenten como una herramienta que sirva para determinar si un sitio es apto para soportar las estructuras características de una plataforma o planta geotérmica.

8. Análisis de datos

De acuerdo con la investigación bibliográfica realizada y con lo observado en los campos geotérmicos del país la presencia de minerales de arcilla en el suelo, producto de la alteración hidrotermal, complica la selección de sitios para construir cualquier tipo de obra civil en las áreas geotérmicas y más aquellas obras mayores como plantas generadoras o plataformas de pozos.

Es difícil encontrar sitios en los que el suelo tenga contenidos pobres de arcilla, lo que es ideal para poder construir sobre el mismo.

En cualquier área dónde no exista potencial geotérmico y el suelo presente contenidos representativos de minerales de arcilla ya que se encuentra generalmente en ambiente volcánico, la preocupación por estabilizarlos es relativamente fácil de resolver haciendo uso de las distintas técnicas para estabilización de suelos arcillosos, pero en áreas geotérmicas la presencia de minerales de arcilla es el primer indicador de que el sitio no es el mejor para construir sobre todo si los minerales de arcilla ya son identificables en superficie.

Si en este estudio de suelos encuentra minerales de alteración hidrotermal del tipo argilítica a argílica Intermedia (o argílica o argílica moderada), significa que el sitio elegido ya tiene altos contenidos de arcilla (esmectita, caolinita, entre otras).

Si existe zona de alteración hidrotermal visible, probablemente la presencia de suelos arcillosos será predominante, por ejemplo, la alteración puede no ser visible pero conforme se realizan los estudios profundos los minerales de arcilla comienzan a aparecer, confirmando la alteración hidrotermal.

Si el suelo tiene estructura débil o no tiene estructura y es porosos hay alteración hidrotermal y grandes probabilidades de que contenga arcilla.

Por lo general los suelos alterados presentan colores claros, debido a la presencia de caolinita (arcilla) o amarillento a beige por la presencia de esmectita, que se forma en condiciones de temperatura de 100 – 200°C.

Los suelos arcillosos son prácticamente impermeables y pueden presentar dos fenómenos que son desastrosos: en contacto con la humedad de expanden en gran forma, y conforme pierden humedad se contraen, en ambos fenómenos se producen enormes esfuerzos internos que pueden provocar hundimientos o levantamientos en cualquier estructura existente sobre ellos.

Un suelo alterado cuya presencia de minerales de arcilla es considerablemente dominante en presencia de humedad, su consistencia será plástica.

Asimismo con la presencia de alteración argílica intermedia o avanzada se puede producir corrosión o incrustación en los equipos e instalaciones.

Los suelos arcillosos poseen una baja capacidad de carga comparada con otros tipos de suelo, por lo tanto, la capacidad de soporte es débil para los tipos de estructura que debe soportar.

Algunos efectos de la presencia de abundantes minerales de arcilla son deslizamiento, hundimiento, etc.

Algunos tipos de alteración hidrotermal en estructuras existentes



Fotografía 1. Alteración hidrotermal en los cimientos de un muro.



Fotografía 2. Formación de corrosión.



Fotografía 3. Formación de algas.



Fotografía 4. Alteración hidrotermal en muro.



Fotografía 5. Suelos humeantes



Fotografía 6. Corrosión.

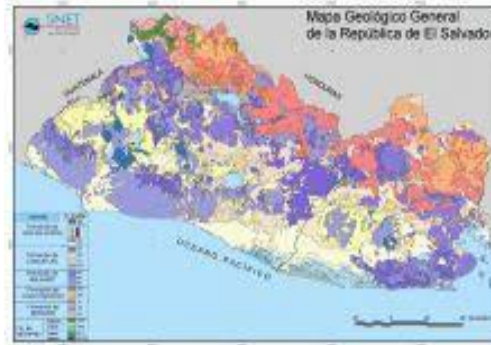
9. Presentación de resultados

Se presenta a continuación el trabajo estructurado en forma de un Check List que servirá para identificar los sitios que estén considerados para albergar alguna de las estructuras civiles en geotermia.

CHECK LIST DE EVALUACIÓN PRELIMINAR PARA LA SELECCIÓN DE SITIOS DE EMPLAZAMIENTO DE SUPERESTRUCTURAS GEOTÉRMICAS			
NOMBRE DEL ÁREA/CAMPO GEOTÉRMICO:		NOMBRE DE LA EMPRESA PROPIETARIA:	
NOMBRE DEL PROYECTO:		NOMBRE DEL RESPONSABLE DEL PROYECTO	
FECHA:	DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO:		
I. RECONOCIMIENTO VISUAL DEL SITIO			
1. El sitio presenta manifestación hidrotermal visible? (fumarolas, lodo hirviendo, zona de alteación hidrotermal)		SI	NO
2. El suelo es perceptiblemente caliente?		SI	NO
3. El suelo es firme?		SI	NO
4. El sitio es de fácil acceso?		SI	NO
5. Se observan manifestación hidrotermal al rededor del sitio?, si la respuesta es si especifique de que tipo es la manifestación observada:			
SI	NO	Suelos Humeantes	Fumarolas
			Lodos Calientes
			Ríos Calientes
Otros:			
6. Uso actual del suelo:		Agrícola	Terreno Ocioso
			Asentamiento Urbano
Otros:			
7. Señale en la siguiente figura el o los colores que puede observar en el suelo en forma general:			
		8. Si el color del suelo esta entre las filas 6 - 2 continúe a la siguiente parte	

II. GEOLOGÍA DEL SITIO

1. Según el mapa geológico identifique, las formaciones, materiales y periodos de formación del sitio



2. De acuerdo con la extracción de testigos que minerales existen en los primeros 200 m de exploración

3. De acuerdo a los minerales encontrados existe alteración hidrotermal?	SI	NO
4. Si existe alteración hidrotermal, de qué tipo es?	Alteración Potásica	Argílica Intermedia
	Propilítica	Silificación

Otras:

5. Si no existe alteración hidrotermal en los primeros 200 m continúe a la siguiente parte

III. Geotecnia

Enfoque sus respuestas en los primeros 50 metros de profundidad analizando muestras de suelo cada dos metros

1. Clasificación del suelo por Textura

DIVISION PRINCIPAL	SIMBOLO DEL GRUPO	NOMBRES TÍPICOS	CRITERIO DE CLASIFICACION		
SUELOS DE GRANOS GRANDES 50% o más es retenido en el tamiz No. 200	GRAVAS 50% o más de la fracción gruesa pasa por el tamiz No. 4	GW	Gravas bien gradadas y mezclas de arena y grava con pocos finos o sin finos	$C_u = \frac{D_{60}D_{10}}{(D_{30})^2}$ Mayor que 4 $C_g = \frac{D_{10}}{D_{30} \times D_{60}}$ Entre 1 y 3 Si los criterios para GW no se cumplen	
		GP	Gravas y mezclas de gravas y arenas mal gradadas con pocos finos o sin finos		
	GRAVAS CON FINOS	GM	Gravas limosas, mezclas de grava - arena y limo	Límites de Atterberg localizados bajo la línea "A" o índice de plasticidad inferior a 4. Límites de Atterberg sobre la línea "A" e índice de plasticidad superior a 7.	
		GC	Gravas arcillosas, mezclas de grava - arena y arcilla		
	ARENAS Más del 50% de la fracción gruesa pasa por el tamiz No. 40	ARENAS LIMPIAS	SW	Arenas y arenas gravosas bien gradadas con pocos finos o sin finos	$C_u = \frac{D_{60}D_{10}}{(D_{30})^2}$ Superior a 6 $C_g = \frac{D_{10}}{D_{30} \times D_{60}}$ Entre 1 y 3 Si no se cumplen los criterios para SW
			SP	Arenas y arenas gravosas mal gradadas con pocos finos o sin finos	
		ARENAS CON FINOS	SM	Arenas limosas, mezclas de arena y limo	Límites de Atterberg localizados bajo la línea "A" o índice de plasticidad inferior a 4. Para los límites de Atterberg localizados en el área sombreada se debe clasificar utilizando símbolos dobles. Límites de Atterberg sobre la línea "A" e índice de plasticidad superior a 7.
			SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla	
			ML	Limos inorgánicos, arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas	
			CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media; arcillas gravosas, arcillas arenosas, arcillas limosas, suelos sin mucha arcilla	
SUELOS DE GRANOS FINOS 50% o más pasa por el tamiz No. 200	LIMOS Y ARCILLAS Límite líquido superior a 50%	OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad	GRÁFICO DE PLASTICIDAD Para la clasificación de los suelos finos y de la fracción fina de los suelos granulares Los límites de Atterberg situados en el área sombreada corresponden a la clasificación de limo y requieren símbolos dobles. Ecuación de la línea A: $IP = 0.73(LL - 20)$	
		MH	Limos inorgánicos, arenas finas o limos micáceos o de diatomeas limos elásticos		
		CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas grasas		
	LIMOS Y ARCILLAS Límite líquido superior a 50%	OH	Arcillas orgánicas de plasticidad alta o media		
		PT	Turba, estiércol y otros suelos altamente orgánicos		

2. Grado y Tipo de Estructura

Grado 0: Sin estructura

Grado 1: Estructura debil

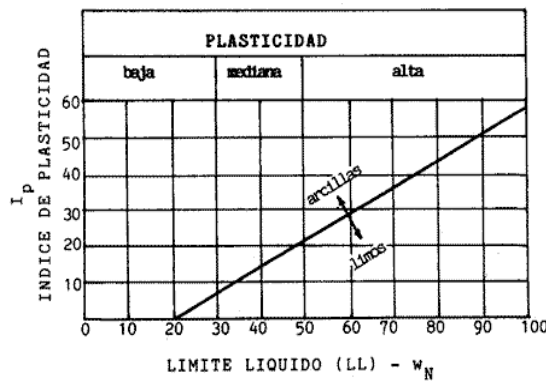
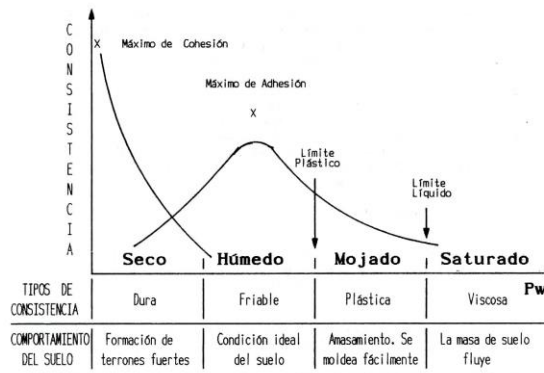
Grado 2: Estructura moderada

Grado 3: Estructura Fuerte

ESTRUCTURA DEL SUELO			
ESFEROIDAL		EN FORMA DE PRISMA	
GRANULAR (POROSA)	MIGAJÓN (MUY POROSA)	PRISMÁTICA (CUSPIDES PLANAS)	COLUMNAR (CUSPIDES REDONDEADAS)
LAMINAR		DE BLOQUE	
MASIVA	EN PLACAS	EN BLOQUES	UNIGRANULAR

3. Si el grado de la estructura es 2 - 3, para los primeros 25 metros pase a la siguiente pregunta

4. Consistencia del suelo



5. Si el IP es superior al 20%, el LL varía entre 0-30 y la consistencia es dura o friable pase a la siguiente pregunta

6. Ángulo de fricción interna

Ángulo de fricción Interna y Peso Específico de Suelos			
Tipo de suelo	Consistencia	Ángulo de fricción interna ϕ en grados	Peso específico en kg/cm^2
Arena gruesa o arena con grava	compacta	40	2250
	suelta	35	1450
Arena media	compacta	40	2080
	suelta	30	1450
Arena limosa fina o limo arenoso	compacta	30	2080
	suelta	25	1365
Limo uniforme	compacta	30	2160
	suelta	25	1365
Arcilla -limo	suave	20	1440-1920
	mediana		
Arcilla limosa	suave	15	1440-1920
	mediana		
Limo	suave	0.1	1440-1920
	mediana		

7. Capacidad de carga permisible del suelo

Valores de cargas permisibles sobre suelos en kg/cm^2	
Cama de roca sólida cristalina masiva en buenas condiciones	100
Roca foliada (esquitos, pizarras) en buenas condiciones	40
Roca sedimentaria en buenas condiciones	15
Gravas o arenas excepcionalmente compactas	10
Gravas compactas o mezcla de grava y arena	6
grava suelta; arena gruesa compacta	4
compacta o arena gruesa confinada y húmeda	3
Arena fina suelta o húmeda, arena fina confinada	2
Arcilla rígida	4
Arcilla media rígida	2
Arcilla suave	1

8. Si los valores de capacidad de carga sobre el suelo son superiores a $5 kg/cm^2$ el sitio puede ser usado para emplazar las super estructuras

Otros comentarios:

10. Conclusiones y recomendaciones

Las áreas geotérmicas no pueden analizarse como cualquier otro tipo de terreno, ya que sus condiciones son excepcionalmente distintas y la forma de aplicar la ingeniería civil debe ajustarse a estas.

Son terrenos inciertos puede ser que hoy sean ideales para construir y dentro de cierto tiempo se presente algún tipo de manifestación producto de la alteración hidrotermal que inhabilite cualquier estructura que haya sido construida.

Elegir los sitios que mejor se ajusten a las propiedades mecánicas del suelo, para construir sobre el mismo es todo un reto que inicialmente deben superar geólogos y geotecnistas. Realizar mapeo de fumarolas y continuar monitoreándolas.

Observar detenidamente los posibles sitios para construir las estructuras es la primera herramienta del ingeniero civil, pues las características visibles en superficie pueden indicar si el suelo es un real candidato para construir sobre él.

La herramienta desarrollada en este documento, no es definitiva, pero puede ser utilizada para tener una noción preliminar y determinar si el sitio seleccionado es ideal o no.

Arriesgarse a construir sobre suelos que presentan algún tipo de alteración hidrotermal es una bomba de tiempo que acarrea consecuencias económicas considerables.

Antes de cualquier construcción, realizar análisis laboratorio de tales como ensayo de mecánica de rocas y análisis petrográfico y por medio de difracción de rayos X, con el fin de fundamentar las decisiones y asegurar que el sitio seleccionado cumple los requerimientos ingenieriles necesarios para alojar una estructura de grandes dimensiones.

Enfocar en los minerales de alteración presentes en el sitio de obras principalmente los minerales de arcilla, los cuales se identifican en los primeros 100 – 1200 m

11. Recomendaciones

Se recomienda realizar investigación de campo que pueda corroborar la información bibliográfica presentada en este documento, a fin de conocer el comportamiento del suelo en las áreas y campos geotérmicos del país.

Es sumamente importante que se realicen todos los estudios geotécnicos apoyados en la geología del sitio, para poder elegir de forma correcta el sitio de construcción.

12. Agradecimientos

A Dios Padre, Hijo y Espíritu Santo, por la bendición de estar viva, por guiar mis pasos y darme sabiduría e inteligencia para saber distinguir lo correcto de aquello q no lo es.

A mi madre Margarita Aguirre por estar a mi lado en cada momento de mi vida y por ser mi mejor fans.

A David Ramírez, por ser parte de una nueva etapa en mi vida, por apoyarme, por creer que juntos podemos vencerlo todo.

A Ricardo Flores, por creer en mí, por darme una oportunidad para seguir creciendo como profesional.

A Elizabeth Torio Henríquez, por compartir sus conocimientos, por su tiempo y esmero.

A mi compañero Mario Pacheco por su dedicación y esfuerzo.

A Thor y Minerva, por dar siempre amor.

A los que ya no están en esta tierra pero dejaron una enorme huella en mi vida...

Desde el fondo de mi corazón simple y humildemente GRACIAS.

Margarita Aguirre

Al creador por permitir que concluya satisfactoriamente estos estudios. A mi familia y amigos por estar siempre a mi lado. A las autoridades de LaGeo que, sin su permiso, mi participación no hubiera sido posible. Al Ing. Armando Rugamas y al Ing. Fidel Serrano por también autorizar mi participación en el diplomado.

A todos los maestros que fueron parte de este diplomado por compartir su conocimiento. A todos los compañeros, nacionales y extranjeros, por los buenos momentos, experiencia y lecciones compartidas ya que me han servido para seguir en mi formación de vida.

A Elizabeth Torio por dedicar de su tiempo para que finalizáramos este trabajo y a Margarita, por su conocimiento reflejado en el trabajo. A todos los compañeros de LaGeo Santa Tecla que compartieron conmigo el tiempo que estuve en esas oficinas.

Gracias por todo.

Mario Pacheco

13. Referencias bibliográficas

- Betancourt, J., Castro, J. y Hurtado, C. (2016). Guía de estandarización para el diseño de plataformas geotérmicas en El Salvador. Diplomado en geotermia para américa latina, edición 2016, Ciudad Universitaria, El Salvador.
- Flamenco, A. 2017. Sistemas de acarreo para fluidos geotérmicos. Unidad 3, módulo VIII. Diplomado en geotermia para América Latina. El Salvador.
- García, F. (2006). Ensayos Geotécnicos. Escuela Politécnica Superior. Huesca, España.
- Guánchez, E. (2017). Los 15 Aspectos Que Debe Incluir Un Estudio De Suelos. Zigurat Global Institute Of Technology, Universidad de Carabobo, Venezuela.
- Makshev, V. (2001). Apuntes de clases Metalogénesis, Departamento de Geología, Universidad de Chile, Chile.
- Torio, E. (2017). Alteraciones hidrotermales en los sistemas. Unidad 4, módulo IV. Diplomado en geotermia para América Latina. El Salvador.
- <http://www.ugr.es/~minechil/apartado14.htm>
- <http://geo-civ-unach.blogspot.com/2013/01/importancia-de-la-geologia.html>
- <https://aen.mx/tipos-de-cimentacion-para-naves-industriales/>
- <http://www.arqhys.com/construccion/propiedades-mecanicas-suelo.html>.
- <http://www.arqhys.com/construccion/propiedades-mecanicas-suelo.html>
- http://www.wikivia.org/wikivia/index.php/Clasificaci%C3%B3n_ASTM
- http://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s09.htm
- <https://www.lacomunidadpetrolera.com/2012/08/clasificacion-de-la-porosidad.html>
- <http://geotecnia-sor.blogspot.com/2010/11/consistencia-del-suelo.html>
- <https://grupos.unican.es/gidai/web/asignaturas/CI/Cimentaciones.pdf>
- <http://apuntesingenierocivil.blogspot.com/2011/02/cohesion-y-friccion-interna-propiedades.html>