GEOLOGÍA APLICADA A LA EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA

Técnicas geológicas

- **Etapa de reconocimiento**
  - **Manifestaciones superficiales**
  - **Evaluación preliminar**
  - **Decisión de área a mas detalle**
- **Etapa de exploración**
- **MAPA GEOLÓGICO A DETALLE**
  - **Manifestaciones superficiales**
  - **Rasgos geológicos (fallas, fracturas, distribución superficial, prof de diferentes tipos de roca y permeabilidad)**

Tareas especificas

- **Registros de reconocimiento**
  - 1. Registros bibliográficos
  - 2. Mapas geológicos regionales: Basamento cristalino, volcánicos, sedimentos, estructuras regionales, estratigrafía, historia estructural y tectónica. Distribución y ambiente geológico de actividad geotérmica.

Investigación del prospecto

1. Mapeo detallado de rumbo y buzamiento
2. Análisis estructural (con diagrama de rosas) de fallas y diques.
3. Secciones cruzadas o cortes
4. muestras de rocas de todas las unidades para comparación petrológica con pozos.
5. Mapeo de manifestaciones superficiales y alteraciones hidrotermales regionales.
6. Historia volcánica

Crear un modelo de trabajo del sistema geotérmico

Seleccionar sitios de pozos exploratorios basados en el modelo de trabajo.

Tomar en cuenta

Ciclo del sistema hidrotermal

Requerimientos:

- 1.Juegode formaciones rocosas y/o estructuras por la cual circula agua a niveles profundos
- 2.Fuente de calor (flujo de calor regional o localización de intrusiones magmáticas).
- 3.Adecuada disponibilidad de agua meteórica.
- 4.Suficiente tiempo y área superficial de intercambio de calor.
- 5.Patrones de retorno a la superficial

asociaciones

- Alta temperatura asociados a complejos volcanicos, rocas rioliticas.
- Zonas de caldera, rift, areas de bloques fallados
- Interseccion de fallas

TIPOS DE ALTERACIÓN

- REEMPLAZAMIENTO
- DEPOSICIÓN DIRECTA
- LIXIVIACIÓN

- **La tasa de reemplazamiento es altamente variable**

Factores que controlan a la alteración hidrotermal de las rocas

a) Temperatura y la diferencia de temperatura (Δtº) 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.

- El reconocimiento del mineral de reemplazamiento es dependiente sobre el tipo de roca.
- Tipo de roca Facilidad de identificación
- Rocas volcánicas (Broadlands) Fácilmente
- Rocas sedimentarias (Geysers) Difícil
- Rocas metamórficas de bajo grado (Ngawha) Difícil

Productos de reemplazamiento típico en sistemas geotérmicos para rocas volcánicas que reaccionan con aguas cloruradas

Mineral original	Mineral de reemplazamiento
Vidrio volcánico	Cuarzo, zeolitas (mordenita, laumontita) cristobalita, calcita, arcillas (montmorilonita)
Magnetita, ilmenita, titanomagnetita	pirita, leucoxeno, titanita, pirrotina, hematita.
Piroxeno, anfibolita, olivino, biotita	Clorita, illita, cuarzo, pirita, calcita, anhidrita.
Plagioclasa cálcica	Calcita, adularia, albita, wairakita, cuarzo, anhidrita, clorita, illita, caolín, epidota, prehnita, montmorillonita.
Sanidina, ortoclasa, anortoclasa	Adularia, illita.

Orden usual de orden de reemplazamiento de minerales de alteración

Vidrio volcánico magnetita,> anfibolita, > piroxeno, > feldespato k, > plagioclasa.

Productos de reemplazamiento de alteración típica en sistemas geotérmicos con fluidos ácidos.

Temperatura	**Mineral de reemplazamiento**
Bajo (<200° C)	Cristobalita, caolinita, alunita, pirita, y sílice residual.
Alto (>200° C)	Alunita, pirofilita, diásporo, dickita, enargita.

Alteración por deposicion directa

Lugares donde se depositan

- Fracturas
- Juntas
- Fallas
- Cavidades
- Vesículas
- Espacios porosos
- Cavidades de lixiviación

Alteración hidrotermal por lixiviación

- La lixiviación es el proceso por el cual minerales primarios o secundarios en una roca son disueltosasí, creandoespacios vacíos.
- La lixiviación típicamente ocurre en los márgenes del campogeotérmico y por lo tanto no es generalmente vista ennúcleos o recortes de la zona de flujo principal.

POR REEMPLAZAMIENTO

- Son minerales primarios en rocas que están sujetas a un fluido geotérmico que tienen una tendencia a ser reemplazados por nuevos minerales que son estables o al menos meta estables bajo la nueva temperatura, presión, Ph, y condiciones químicas.

alteraciones

- **Propilítica**:
- **clorita, epidota y/o calcita, y plagioclasa albitizada**

Este tipo de alteración representa un bajo grado de hidrólisis de los minerales de las rocas y por lo mismo su posición en zonas alteradas tiende a ser marginal.

Generada por soluciones de pH neutro a alcalino y en rangos de temperatura bajos (200°-300°C).

- Las formaciones de clorita, epidota y albita
- Cloritización de la biotita:
- biotita + H^+ ➔ clorita + cuarzo + K^+
- Epidotización y albitización de la plagioclasa:
- plagioclasa + cuarzo + H_2O + Na^+ ➔ epidota + albita + H^+

Argílica Intermedia (o argílica o argílica moderada):

- Importantes cantidades de **caolinita, montmorillonita**, esmectita o arcillas amorfas, principalmente reemplazando a plagioclasas; puede haber sericita
- Hay una significativa lixiviación de Ca, Na y Mg de las rocas.
- La alteración argílica intermedia representa un grado más alto de hidrólisis relativo a la alteración propilítica.
- Este tipo de alteración tiene lugar en rangos de pH entre 4 y 5
- La caolinita se forma a temperaturas bajo 300°C (aunque generalmente en el rango <150°-200°C). Sobre los 300°C la fase estable es pirofilita.
- La formación de caolinita a partir de la sericita es como sigue:
- Caolinización de la sericita:
- $4\ KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2 + 6\ H_2O + 4\ H^+ \rightarrow 3\ Al_4Si_4O_{10}(OH)_8 + 4\ K^+$
- Este tipo de alteración (especialmente en ambiente pórfidos) puede gradar a alteración propilitica hacia roca fresca (mas montmorillonita) y a alteración sericítica hacia el interior (mas caolinita).

Argílica avanzada

- Caracterizada por la **destrucción total de feldespatos** formación de **caolinita y/o alunita**.
- los minerales de las rocas transformados a dickita, caolinita, pirofilita, diásporo, alunita y cuarzo. jarosita, pirita y/o zunyita.
- Este tipo de alteración se da en un amplio rango de temperatura pero a condiciones de pH entre 1 y 3.5. A alta temperatura (sobre 350°C) puede darse con andalucita además de cuarzo. Bajo pH 2 domina el cuarzo, mientras que alunita se da a pH sobre 2.
- La alunita se forma a partir de la caolinita por la reacción siguiente:
- Alunitización de la caolinita:
- $3\ Al_4Si_4O_{10}(OH)_8 + 2K^+ + 6H^+ + (SO_4)^= \rightarrow 2\ KAl_3(SO_4)_2(OH)_6 + 6\ SiO_2 + 3\ H_2O$

Silicificación:

- caracterizada por la destrucción total de la mineralogía original. La roca queda convertida en una masa silícea. Representa el mayor grado de hidrólisis posible. Ojo: los rellenos hidrotermales de espacios abiertos por cuarzo "no son" una silificación.

Fílica (Sericítica o cuarzo-sericítica):

- Ambos feldespatos (plagioclasas y feldespato potásico) transformados a **sericita y cuarzo secundarios**
- en un rango de temperatura de 300º-400ºC y en un rango de pH 5 a 6.
- La reacción de formación de sericita es la siguiente:
- Sericitización del feldespato potásico:
- $3\ KAlSi_3O_8 + 2H^+ \rightarrow KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2 + 6\ SiO_2 + 2\ K^+$
- A temperaturas más bajas se da illita (200°-250°C) o illita-smectita (100°-200°C).A temperaturas sobre los 450°C, corindón aparece en asociación con sericita y andalucita.

Potásica:

- Alteración de plagioclasas y minerales máficos a **feldespato potásico secundario y/o biotita secundaria**. Biotita en vetillas ocurre principalmente en el rango 350°-400°C. Feldespato potásico en vetillas en el rango 300°-350°C. Biotita y feldespato están comúnmente asociados con cuarzo, magnetita y/o pirita, formados a condiciones de pH neutro a alcalino. Esta alteración corresponde a un intercambio catiónico (cambio de base) con la adición de K a las rocas.
- altas temperaturas (principalmente en el rango 350°-550°C. Las reacciones de formación de feldespato potásico y biotita son las siguientes:
- Formación de feldespato potásico secundario:
- plagioclasa + K^+ -> feldespato potásico + (Na^+, Ca^{2+})
- Formación de biotita secundaria:
- hornblenda + (H+, Mg^{2+}, K^+) -> biotita + (Na^+, Ca^{2+})

MINERAL	FÓRMULA
Alunita	KAl3(OH)6(SO4)2
Jarosita	$KFe_3(OH)_6(SO_4)_2$
Haloisita	$Al_4(OH)_8Si_4O_{10}.4H_2O$
Caolinita	$Al_4(OH)_8Si_4O_{10}$
Diquita	$Al_4(OH)_8Si_4O_{10}$
Pirofilita	$Al_2(OH)_2Si_4O_{10}$
Diáspore	α-AlO.OH
Zunyita / Topáz	Al13Si5O20(OH,F)18Cl / $Al_2SiO_4(F,OH)_2$
Ilmenita	$FeTiO_3$ ó $FeO.TiO_2$
Rutilo	TiO_2
Cristobalita	SiO2
Cuarzo	α-SiO_2
Pirita	FeS_2
Marcasita	FeS_2
Esmectita* (Montmorillonita)	$(½Ca,Na)(Al,Mg,Fe)_4(Si,Al)_8O_{20}(OH)_4 \cdot nH_2O$
Ilita/Esmectita	
Clorita/Esmectita	
Ilita (Hidromoscovita)	$(K,H_3O)(Al,Mg,Fe)2(Si,Al)_4O10[(OH)_2,(H_2O)]$
Clorita*	$(Fe, Mg, Al)_6(Si, Al)_4O_{10}(OH)_8$. **
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	$(Na,Ca,K)_4Al_8Si_{40}O_{96}.28H_2O$
Laumontita	$CaAl_2Si_4O_{12}.4H_2O$
Wairakita	$Ca(AlSi_2O_6)_2.2H_2O$

* Grupo de minerales
** Fórmula general

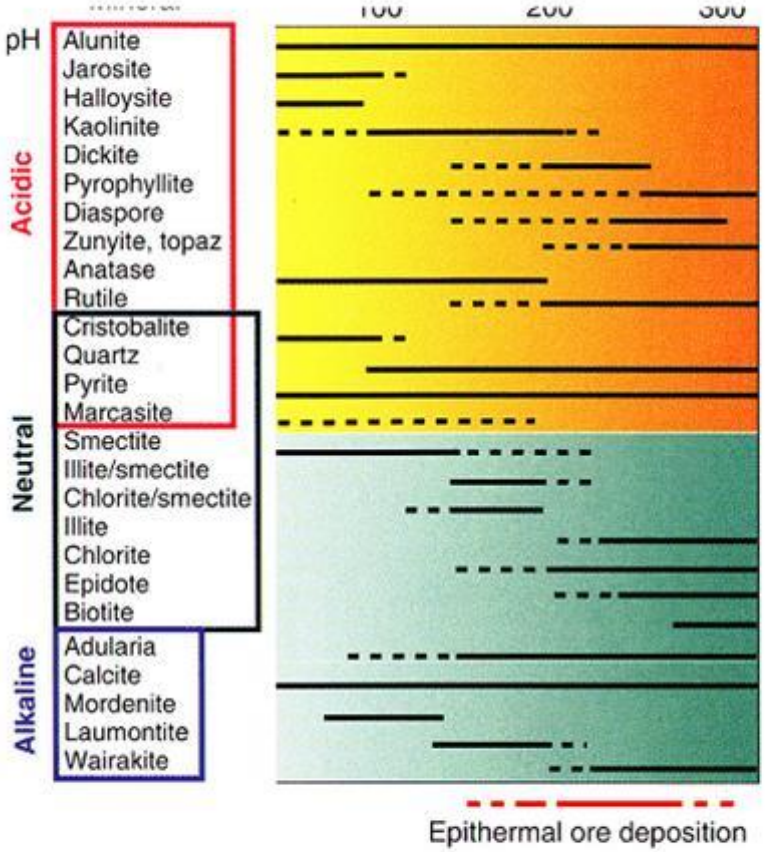


Fig. 3.1 Temperature stability of hydrothermal minerals (deduced from geothermal studies [25,41]) common in the epithermal environment, arranged by their stability with respect to pH. Zones of mineral assemblages may be more meaningful than individual minerals in mapping paleoisotherms [31,41].

Figura 1 y 3.1. Dos versiones con ligeras modificaciones de la estabilidad térmica de los principales minerales hidrotermales en diferentes condiciones de pH

Hedenquist, Izawa, Arribas & White (1996)
http://www.ingeominas.gov.co/option,com_docman/task,doc_view/gid,2100/Itemid,178.htm

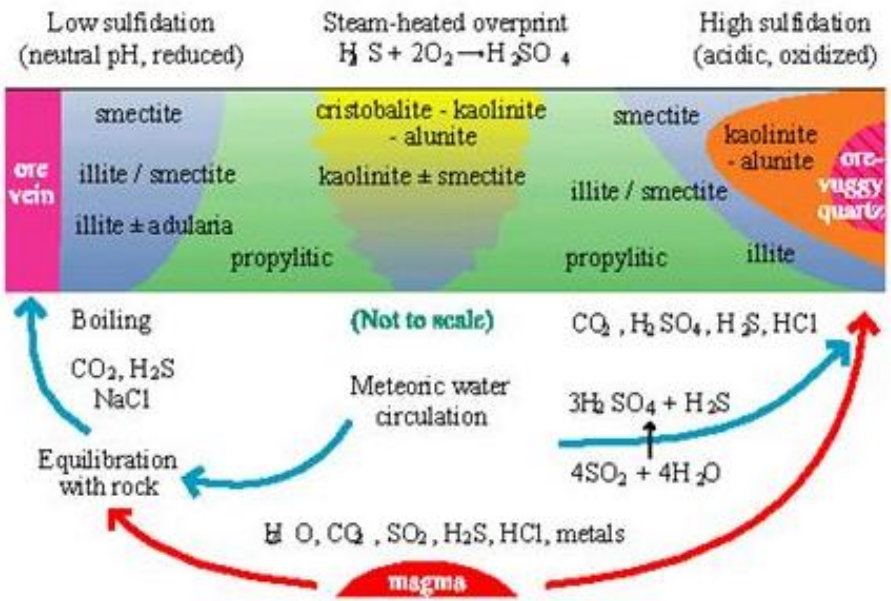
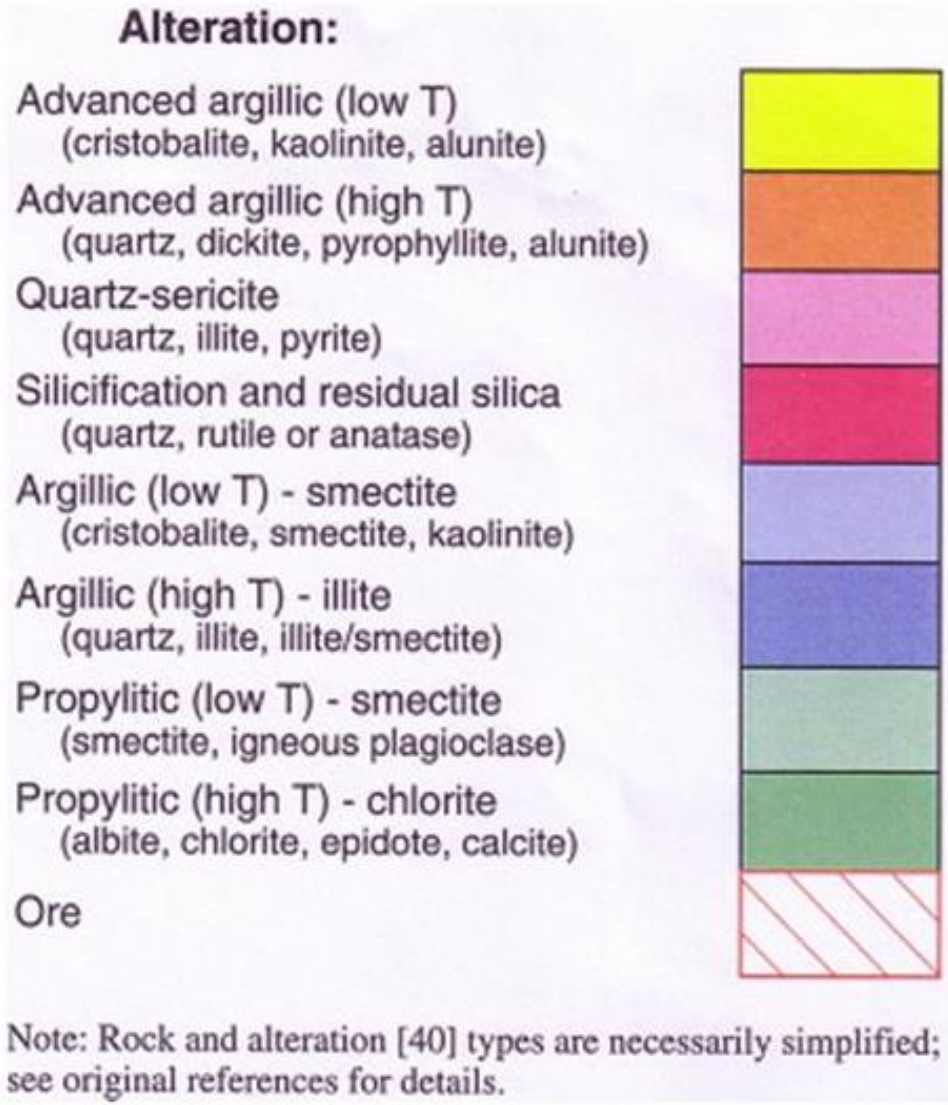


Figura 3.2. Distribución esquemática de las alteraciones hidrotermales asociadas con los depósitos de alta y baja sulfuración

Hedenquist, Izawa, Arribas & White (1996)



Rango de alteracion

- Es una medida de los nuevos minerales basados en su significado
- Se determina por :
- Macroscopicamente (muestra de mano)
- XRD DIFRACCION DE RAYOS X
- DTA ANALISIS TERMICO DIFERENCIAL
- PMA II ANALIZADOR INFRAROJO

Adularia	Mineral de alto rango con respecto a la permeabilidad.
Albita	Mineral de bajo rango con respecto a la permeabilidad.
Epidota	Mineral de alto rango con respecto a la temperatura.
Esmectita	Mineral de bajo rango con respecto a la temperatura.

Cambios de la roca debido a alteracion hidrotermal

- Cambios quimicos
- Fisico
- mineralogicos

- Cambios químicos Adicción o remoción de óxidos elementales y elementos trazas.
- Cambios físicos: densidad, porosidad y permeabilidad, propiedades magnéticas, resistividad
- Cambios mineralógicos: minerales secundarios

Cambios quimicos

Oxido	Comportamiento típico	Mineral hidrotermal
SiO_2	Agregado y removido	Cuarzo, cristobalita, silicatos.
TiO_2	Incambiable	Titanita, leucoxeno.
Al_2O_3	Agregado y removido	Muchos silicatos
Fe_2O_3	Agregado y removido	Clorita, pirita, pirrotina, siderita, epidota, hematita.
MnO	Incambiable?	
CaO	Agregado y removido	Calcita, wairakita, epidota, prenhita, anhidrita, titanita, motmorilonita, fluorita.
Na_2O	Agregado y removido	Albita
K_2O	Agregado	Adularia, illita, alunita.
S, SO_2	Agregado	Anhidrita, alunita, barita, pirita, pirrotina.
H_2O	Agregado y removido	Todas las arcillas y zeolitas, epidota, prehnita.
P_2O_5	Incambiable	Apatito
Cl	Removido	

Cambios fisicos

- Densidad: puede aumentar o disminuir
- Lixiviacion cecrece la densidad de la roca
- Deposicion de silice aumenta la densidad
- Reemplazamiento no concluyente

- Porosidad y permeabilidad:
- Decrecimiento de porosidad
- Reduce la permeabilidad
- Lixiviacion incrementa la porosidad y permeabilidad

- Propiedades magneticas
  - Desmagnetiza
- ResistividadLa conductividad de las rocas en un reservorio geotérmico es afectado por:
- Concentración electrolítica del agua caliente.
- Abundancia de minerales conductivos,por ejemplo, arcillas y zeolitas.

Significado de los minerales de alteracion

- temperatura

Mineral	Temperatura
Esmectita	30 a 120° C
Interatratificación illita-esmectita	120 a 220° C
Illita	>220° C
Biotita	>220 a >325° C
Epidota	>250° C
Laumontita	120 a 220° C
Wairakita	>220° C

temperatura

Calcosilicatos		Minerales arcillosos	
Minerales	**Temperatura**	**Mineral**	**Temperatura**
Mordenita	>120° C	Montmorilonita	<140° C
Laumontita	<210° C	Illita-montmorilonita	>210° C
Wairakita	>220° C	Sericita	>250° C
Epidota	>240° C		
Tremolita	>290° C		
Granate	>300° C		

- Permeabilidad:
- Los más importantes son feldespatos:
- Adularia =alta permeabilidad.
- Albita=baja permeabilidad.
- **Permeabilidad alta: cuarzo, anhidrita, wairakita, illita, adularia, abundante pirita y abundante calcita.**
- **Permeabilidad baja: prehnita, pirrotina, abundante laumontita y abundante esfena en vez de epidota.**

permeabilidad

Minerales que indican permeabilidad

Mineral	Permeabilidad
Andesina	Extremadamente baja
Albita	Baja
Albita mas adularia	Moderada
Adularia	Alta

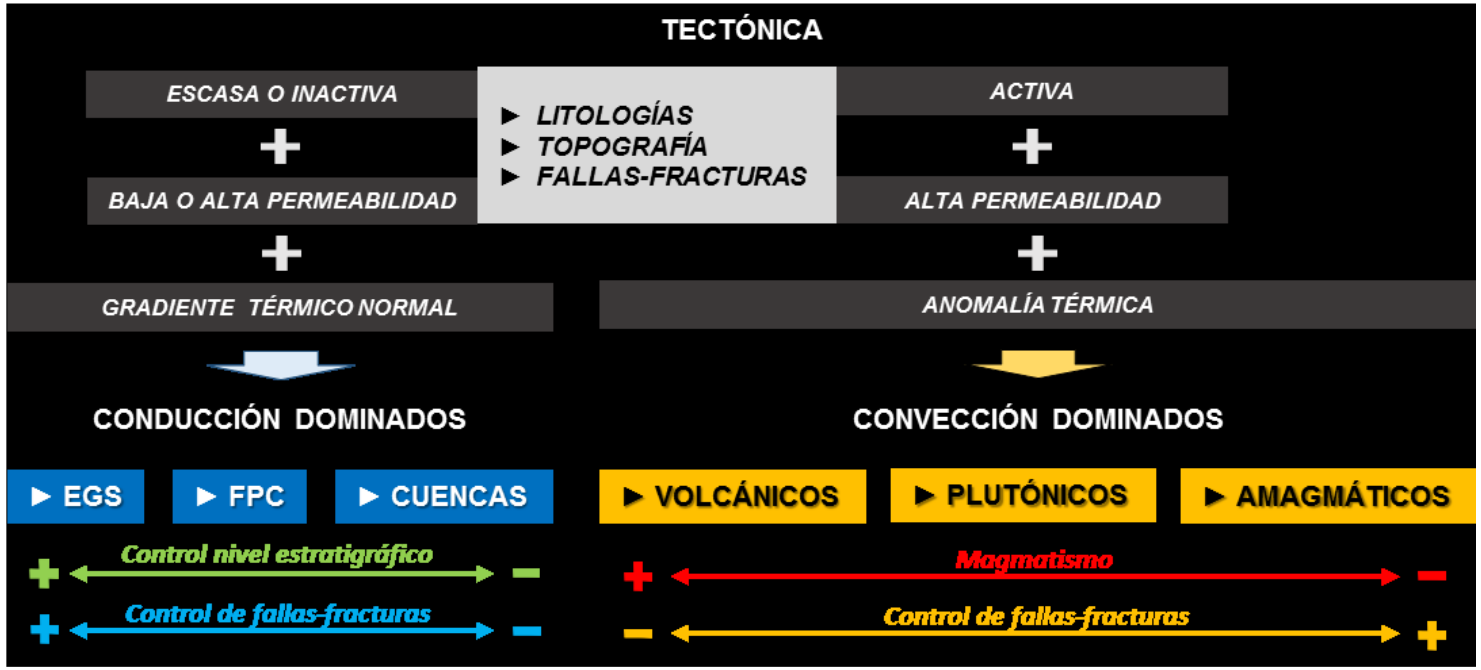
Composición de los fluidos

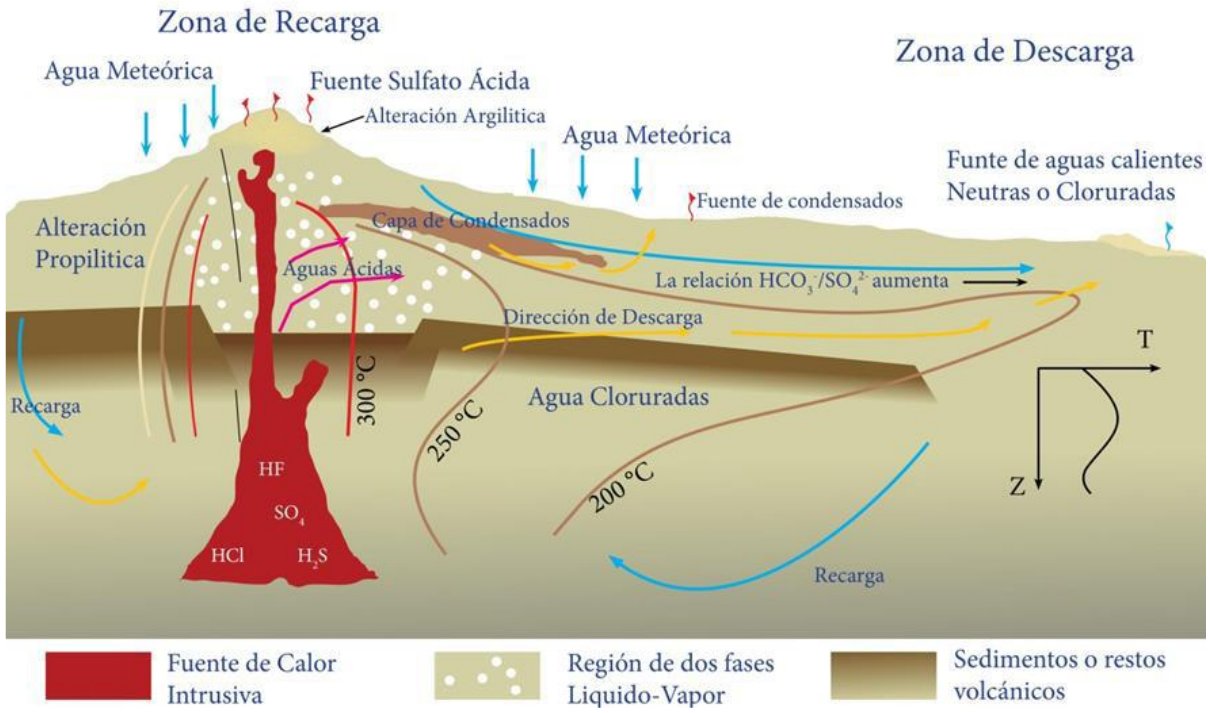
Ensamblaje	Composición del agua
Cuarzo, adularia, albita, calcita, clorita, illita, pirita	Aguas alcalinas cloruradas
Calcita, esmectita, interestratificación de illita-esmectita, caolinita	Aguas ricas en CO_2
Caolinita, alunita, cristobalita, azufre nativo	Aguas ácido sulfatadas

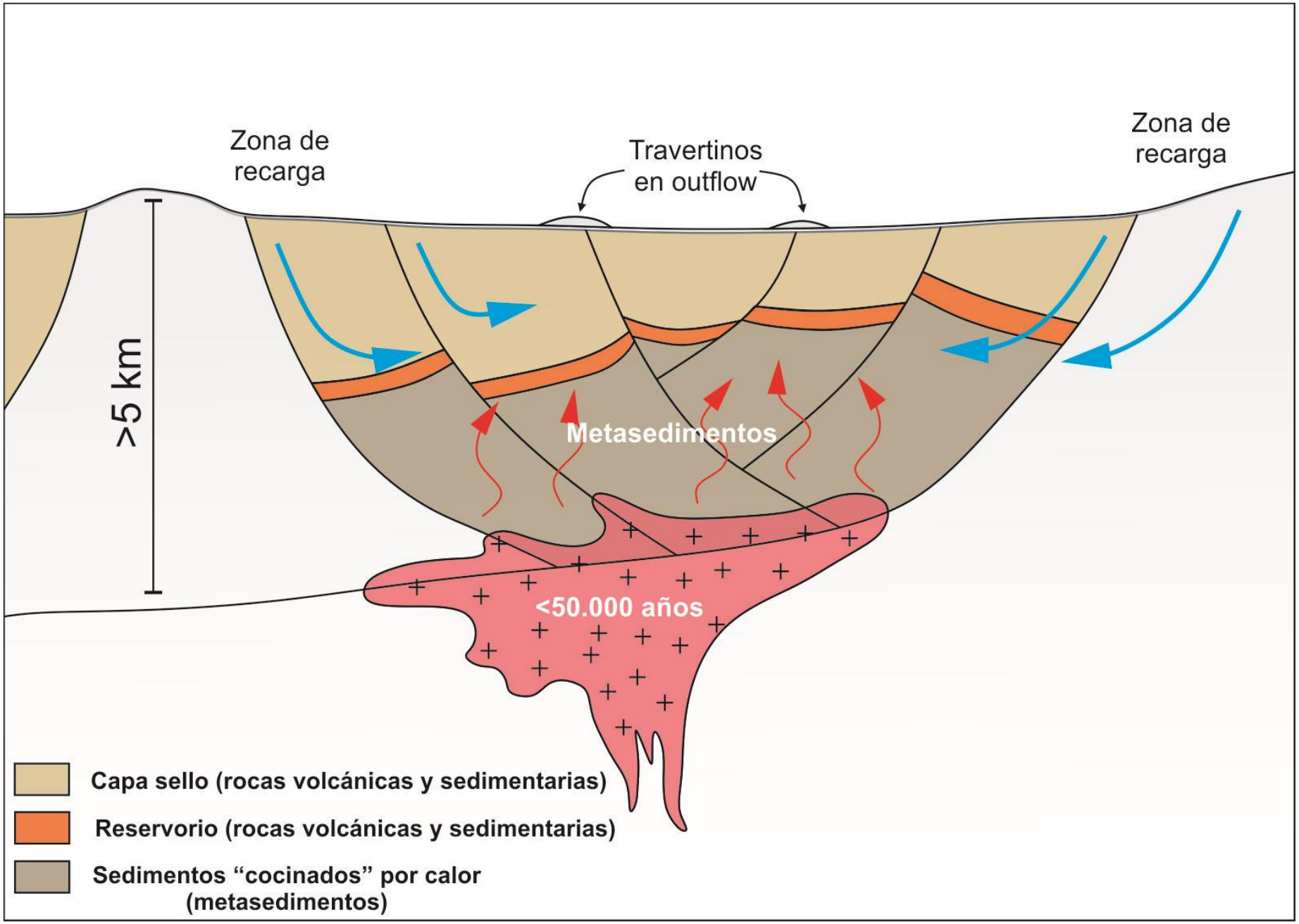
Composición del fluidos

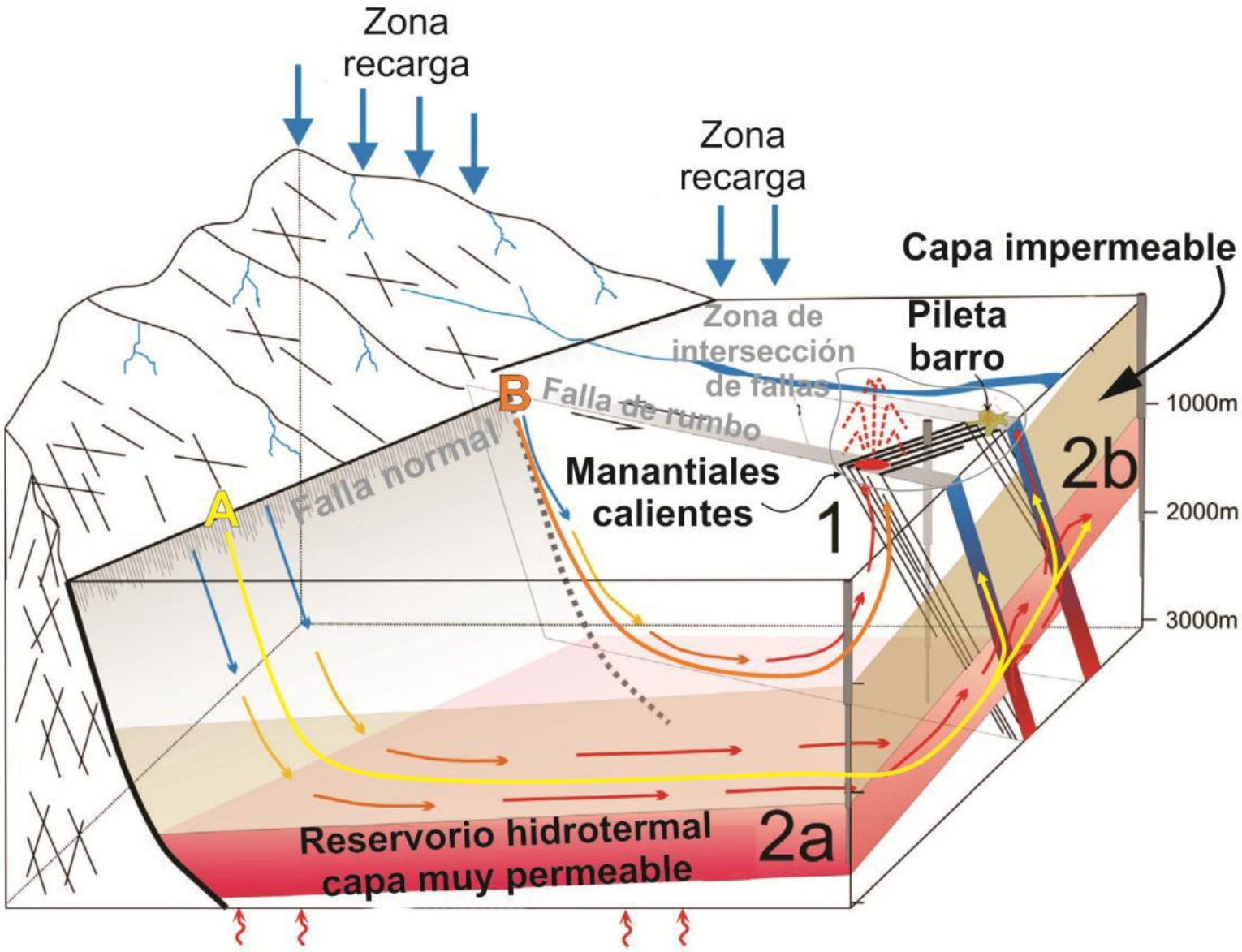
Minerales que indican composición del fluido

- **Fluido rico en sulfatos (ácido) temperatura <100° C**: caolinita, haloysita, cristobalita, alunita, jarosita, sílice.
- **Fluido ácido temperatura >250° C**: dickita, alunita, diásporo.
- **Fluido bicarbonatado**: calcita, siderita, aragonito, illita.
- **Fluido con pH neutro (alcalino cloruradas)**: Adularia, albita, calcita, epidota, prehnita.


TECTÓNICA
ESCASA O INACTIVA
+
BAJA O ALTA PERMEABILIDAD
+
GRADIENTE TÉRMICO NORMAL
CONDUCCIÓN DOMINADOS
► EGS
► FPC
► CUENCAS
Control nivel estratigráfico
Control de fallas-fracturas
► LITOLOGÍAS
► TOPOGRAFÍA
► FALLAS-FRACTURAS
ACTIVA
+
ALTA PERMEABILIDAD
+
ANOMALÍA TÉRMICA
CONVECCIÓN DOMINADOS
► VOLCÁNICOS
► PLUTÓNICOS
► AMAGMÁTICOS
Magmatismo
Control de fallas-fracturas


Zona de Recarga
Zona de Descarga
Agua Meteórica
Fuente Sulfato Ácida
Alteración Argilitica
Agua Meteórica
Funte de aguas calientes
Neutras o Cloruradas
Fuente de condensados
Capa de Condensados
Alteración
Propilitica
Aguas Ácidas
La relación HCO_3^-/SO_4^{2-} aumenta
Dirección de Descarga
T
Recarga
300 °C
250 °C
Agua Cloruradas
200 °C
Z
HF
SO_4
HCl
H_2S
Recarga
Fuente de Calor
Intrusiva
Región de dos fases
Liquido-Vapor
Sedimentos o restos
volcánicos


Zona de recarga
Travertinos en outflow
Zona de recarga
>5 km
Metasedimentos
<50.000 años
Capa sello (rocas volcánicas y sedimentarias)
Reservorio (rocas volcánicas y sedimentarias)
Sedimentos "cocinados" por calor (metasedimentos)


Zona
recarga
Zona
recarga
Capa impermeable
Zona de
intersección
de fallas
Pileta
barro
B
Falla de rumbo
Falla normal
A
Manantiales
calientes
1
2b
1000m
2000m
3000m
Reservorio hidrotermal
capa muy permeable
2a

Infiltración de agua fria

- Abundante goetita/hematita presentes en venitas o agregados
- Abundantes minerales ricos en magnesio (vermiculita, vermiculita-talco, dolomita, ankerita)

- Objetivos del mapeo geológico en geotermia
- Cuales son las características principales del mapeo geológico
- Cuales son los significados de las alteraciones