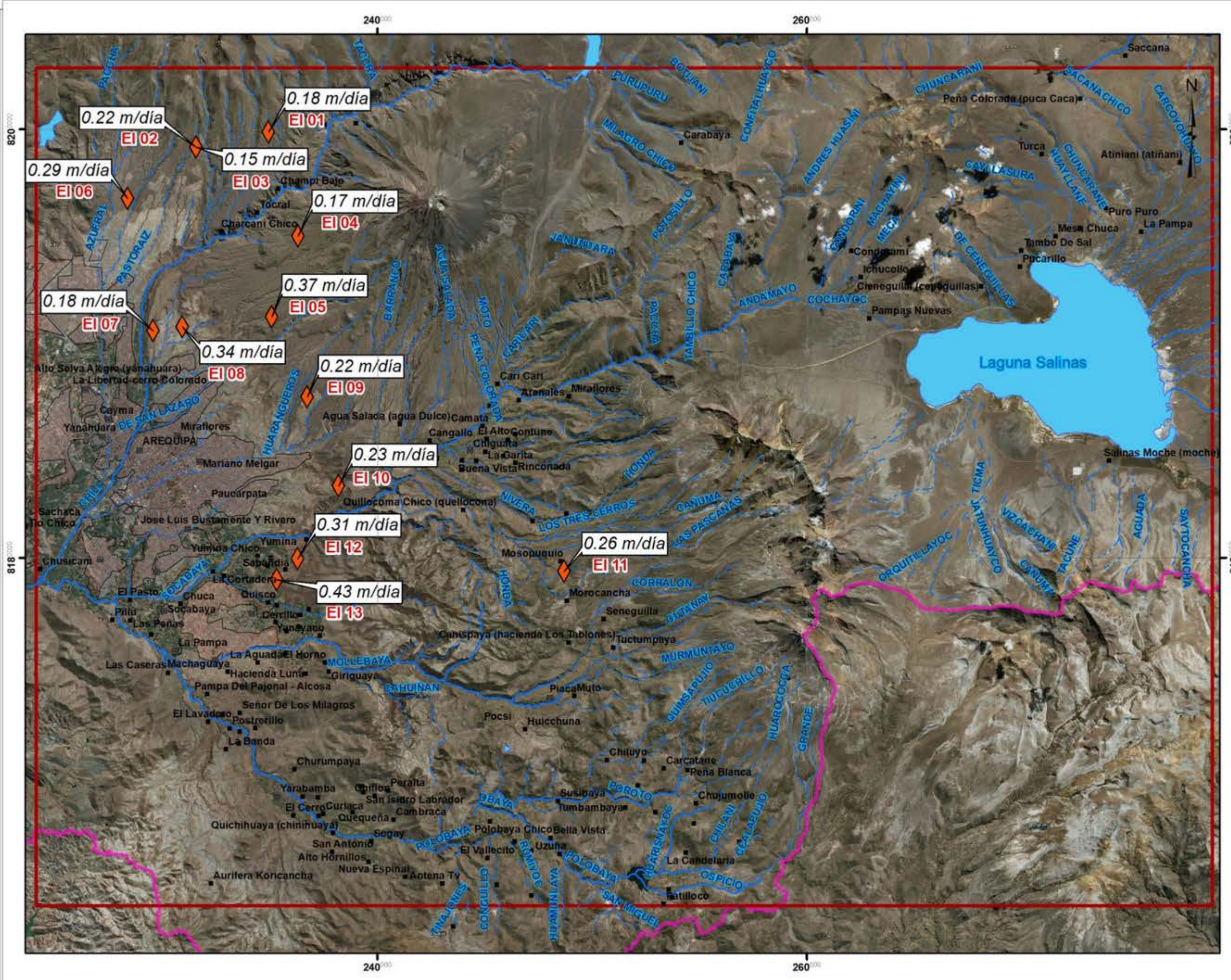




SIMBOLOGÍA

- Centro poblado
- ▭ Área de estudio
- ▨ Ciudad de Arequipa
- ▭ Laguna.
- ▭ Cuenca Quilca-Vitor-Chili
- ◆ Ensayos de Infiltración

DRENAJE

- Quebrada
- - - Quebrada Intermitente
- - - Quebrada Seca
- Río
- - - Río Intermitente



MAPA DE UBICACIÓN DE ENSAYOS DE INFILTRACIÓN
DELIMITACIÓN DE LOS PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DE LOS ACUÍFEROS UBICADOS EN LA ZONA ORIENTAL DE AREQUIPA

7.3.2. Determinación de sistemas de flujos

Los sistemas de flujo en aguas subterráneas conocido corresponden a flujos de recorrido local, intermedio y regional (Toth, 1963), considera un ratio de profundidad y la extensión lateral de un sistema.

Los sistemas de flujos locales son recargados en la parte alta de una topografía local y esta descarga en los lados adyacentes de esta topografía.

Los sistemas de flujos intermedios tienen una área de recarga y descarga en áreas separadas, por una o mas elevaciones topográficas y bajas.

En los sistemas de flujos regionales, las áreas de recarga abarcan hasta la línea divisoria de una cuenca y el área de descarga abarca hasta los valles mas bajos.

Toth (1963) identifico tres zonas generales de flujos (Grafico 7.3) y denota claramente sistemas de flujos locales, sistemas de flujos intermedios y sistemas de flujos regionales, los cuales le permitieron hacer las siguientes afirmaciones:

- Si los relieves locales son despreciables y existe solo una topografía general de una pendiente, solo se desarrollaran sistemas de flujo regional.
- Si la pendiente o relieve regional es despreciable, solo se desarrollaran sistemas locales.
- Si tenemos a su vez un relieve local y una pendiente regional, se desarrollaran sistemas de flujos locales, intermedios y regionales.
- Los sistemas de flujos regionales están caracterizados por tener largos recorridos, lentos y de circulación profunda. En las zonas de descarga, las aguas presentaran un alto grado de mineralización y elevada temperatura.
- Los Sistemas locales están caracterizados por presentar flujos de recorridos cortos y baja mineralización. La temperatura de descarga estará sujeto a la media anual del medio.

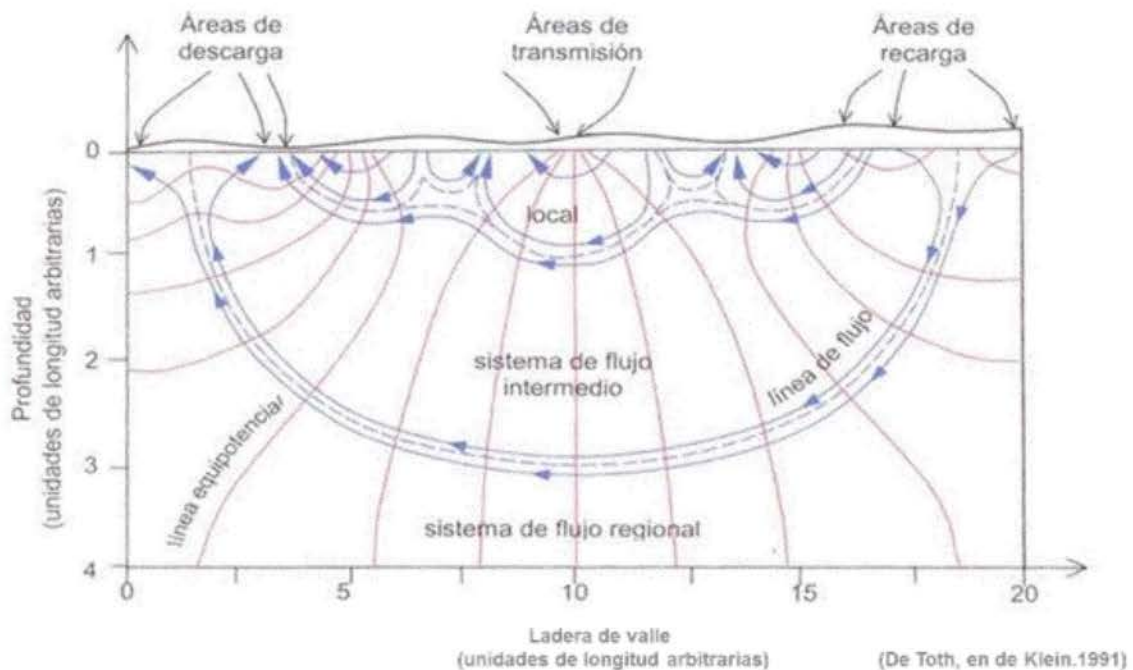


Gráfico 7.3. Esquema general que explica los sistemas de flujo local, intermedio y regional.

Para sistemas asociados a los flujos de una laguna, el funcionamiento de un sistema de flujos se basa en las características físicas del basamento de la laguna, considerando su ubicación, tamaño y /o características litológicas, Según el comportamiento hidráulico de una laguna se muestra en el Grafico 7.4

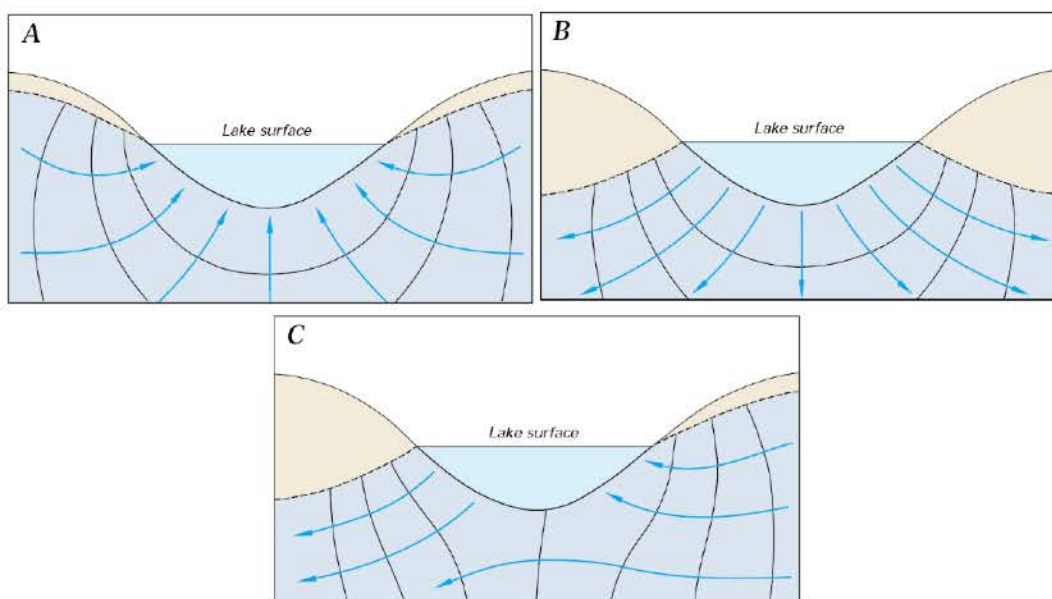


Grafico 7.4. A) laguna ganadora del medio superficial y subterráneo B) Laguna con comportamiento de recarga a flujos subterráneos y ganadora de flujos superficiales C) Laguna con comportamiento mixto, recargado por flujos subterráneos adyacentes y de recarga a flujos subterráneos. (De USGS en Schwartz, 2003).

7.3.2.1. Interpretaciones

En la zona oriental de Arequipa, se han identificado dos sistemas hidrogeológicos y 3 tipos de sistemas de flujos subterráneos con respecto al tiempo, profundidad y composición química de sus aguas (Figura 7.7).

Los flujos de recorrido local se ubican en la cumbre del volcán Pichupichu, con tiempo de circulación estacionarios y variabilidad de caudal (caudales bajos generalmente).

Los flujos de recorrido intermedio, tiene circulación desde las zonas de recarga del volcán Pichupichu, pasando por las faldas del mismo, con tiempos de circulación de varios años hasta desembocar en los manantiales de buen caudal, estos son los más importantes en el aspecto económico y social.

Los flujos de recorrido regional, identificados con tiempos de circulación de varias años a décadas, asociados a las fuentes termales de alta temperatura y cargados de sales y mineralización (Aguas de Jesús).

Según la conductividad hidráulica que presentan los depósitos volcánicos, altamente permeable en la zona de recarga y variable entre las zonas moderada y baja, en las laderas del volcán Pichupichu, los flujos identificados en su mayoría es de recorrido intermedio, los flujos locales se presentan en las inmediaciones de la laguna Salinas y el zonas cercanas al estrato volcán Pichupichu y los flujos regionales se evidencian en las fuentes termales como Aguas de Jesús (temperatura y mineralización).

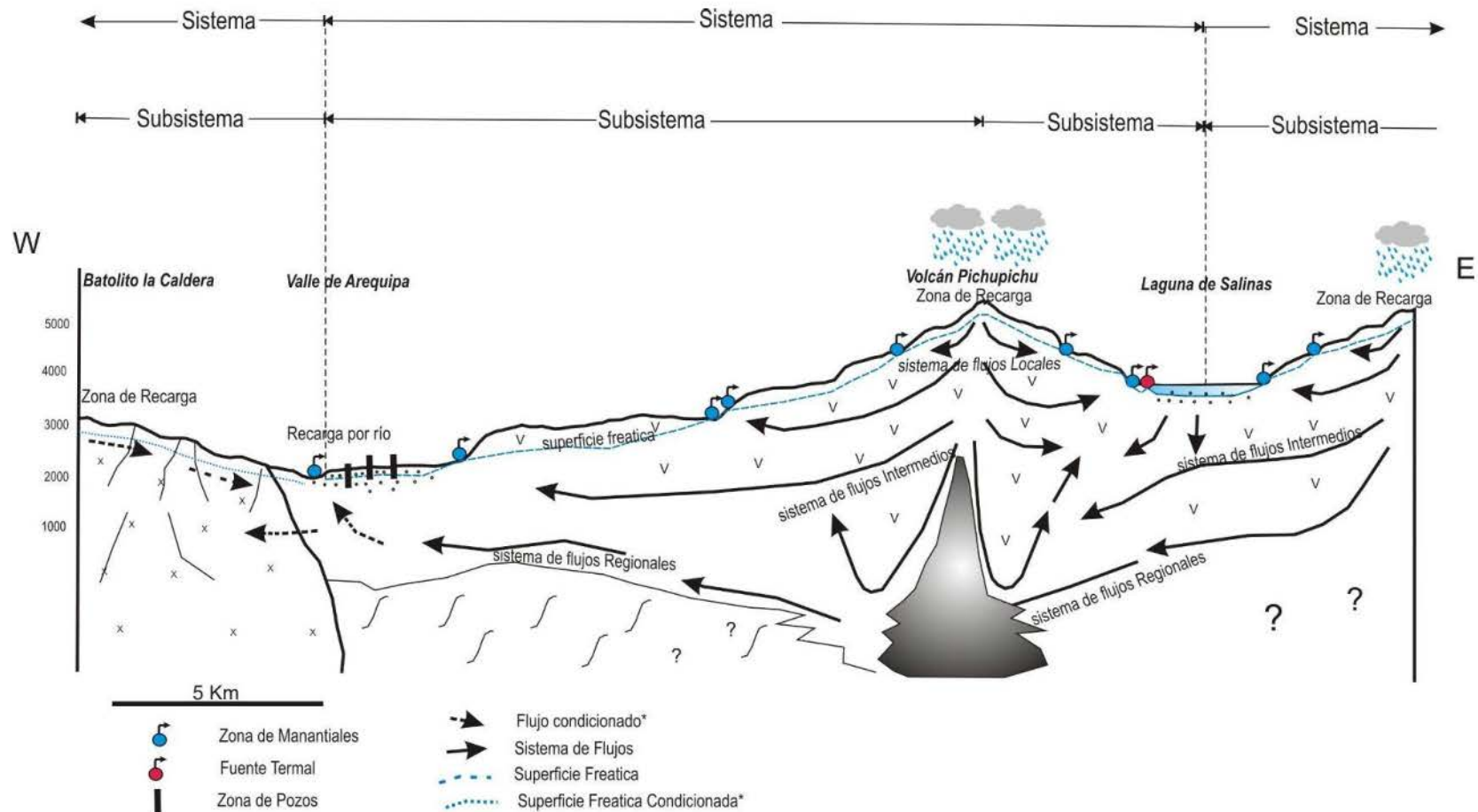


Figura 7.6. Modelo hidrogeológico del funcionamiento de los sistemas de flujos de aguas subterráneas en la zona oriental de Arequipa (Fuente: Sulca & Peña 2010)

8. HIDROQUÍMICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

8.1. Estaciones de muestreo de aguas subterráneas

El objetivo principal planteado en este acápite es evaluar la naturaleza química de los afloramientos de agua, su posible origen químico, la calidad de las aguas, así como la interacción de las aguas subterráneas con los materiales del entorno.

En la zona de estudio se ha muestreado 44 fuentes de aguas subterráneas, que corresponden a manantiales, fuentes termales y pozos, se tomó parámetros físico-químicos en cada estación de muestreo

El ultimo muestreo (2016) corresponde a los manantiales Yumina, Ojo el Milagro 2 y Ojo del Milagro 3, y las fuentes aledañas, entre pozos y fuentes termales (Agua de Jesús)

8.2. Selección de la serie analítica

La serie analítica, se seleccionó con la finalidad de describir las propiedades de los componentes hidroquímicos de las aguas subterráneas.

Los parámetros más importantes medidos y analizados son los siguientes:

- Parámetros físico-químicos: pH, temperatura, conductividad eléctrica, TDS, carbonatos y bicarbonatos.
- Parámetros Inorgánicos: sulfato, cloruros y nitratos.
- Metales totales y metales disueltos: Al, Ag, Sb, As, Be, Ba, B, Bi, Cd, Ce, Ca, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, Ge, Hf, K, La, Li, Lu, Mg, Mn Mo, Na, Nb, Ni, P, Pb, Rb, Hg, Se, Si, Sn, Sr, Ta, Te, Th, Ti, Tl, U, V, Wo, Yb, Zn, Zr. entre los principales (serie estándar para metales totales y disueltos ICP-MASA).

En cada estación de muestreo, se registraron las coordenadas UTM del punto (proyección WGS 84) y las características físicas como apariencia, color y olor. Se tomaron parámetros de campo (pH, temperatura, conductividad eléctrica, TDS, etc.) y se recolectaron las muestras respectivas para los análisis en laboratorio. Para la toma de parámetros en campo, se utilizó dos equipos multiparamétricos de marca WTW y Thermo Orion. Estos equipos, se calibraron utilizando sus respectivos estándares y siguiendo las indicaciones del fabricante,

8.3. Análisis de resultados

El laboratorio seleccionado, para el análisis de las muestras de agua, fue el laboratorio de Ingemmet, donde se analizaron las nueve (9) muestras de aguas subterráneas tomadas el 2016 y las treinta y cinco (35) muestras anteriores muestreadas entre el 2009 y 2015.

Para el presente trabajo solamente se consideraron los manantiales y las fuentes termales, ya que su análisis corresponde a la zona de providencia en forma natural, tratando de evaluar las características generales del reservorio acuífero en rocas volcánicas.

La gran variedad de componentes y características físico-químicas del agua subterránea natural, exige su clasificación en grupos, para tener una información sistemática y sencilla sobre la composición química del agua, se puede visualizar en mapas.

La revisión visual de las facies predominantes en las muestras de agua se basa en la elaboración de un mapa hidroquímico (Figura 8.1), que muestra a través del diagrama de Stiff, la predominancia de las aguas subterráneas que afloran en el área de estudio.

8.4. Parámetros físico-químicos de las aguas

8.4.1 pH

La medición del pH, se realizó *in situ*, durante las campañas de campo del 2009, 2015 y 2016, en cada fuente inventariada y muestreada y con equipos portátiles. En general los valores muestran una tendencia neutra con valores entre 6.5 y 8.3. Sin embargo, algunas fuentes, como Salinas Huasa (1225-037:5.41), Quepa Salinas (1325-010:5.60) y Aguas el Milagro (1325-011:5.20), tienen valores bajos, correspondiente a aguas ligeramente ácidas, los cuales interpretamos que se deben al contacto que tiene las aguas con las cenizas y materiales volcánicos en algún momento de la circulación en profundidad.

Las fuentes de mayor interés como la Bedoya (1325-028:6.04), Yumina (1325-012:6.37), Ojo del Milagro 2 (1325-014:6.37), Ojo del Milagro 3 (1325-013:6.28), tiene pH muy cerca de los límites inferiores de pH neutro, encontrándose en el límite inferior de ligera acidez.

No se encontraron valores de alcalinidad, ninguna muestra que pase el rango superior de neutro 8.5.

8.4.2. Temperatura

Los valores de temperaturas en el agua subterráneas están relacionado a la profundidad de circulación que tiene el agua en su recorrido, las fuentes cuyos valores son superiores a 20° C, en lugares fríos y que superan en 4°C la temperatura del ambiente, en lugares cálidos, se consideran fuentes termales (D.S.015-2005 – MINCETUR).

Las fuentes inventariadas en el presente informe tiene valores variados, desde valores inferiores a 5° C hasta los 36.40 °C, corroborándose que existen 4 fuentes termales: Charcani V (1325-024: 34.20 °C), Agua de Jesus (1325-048:23°C), Los Cornejos el membrillo (1325-049: 23°C) y el manantial Aguas Calientes (1320-004: 33.50 °C), que se ubica en las inmediaciones de la laguna Salinas).

Las fuentes de mayor interés como la Bedoya (1325-028:17.40°C), Yumina (1325-012:16.40°C), Ojo del Milagro 2 (1325-014:18.30 °C), Ojo del Milagro 3 (1325-015:18.20°C), tienen temperaturas de flujo intermedio cuya interpretación se debe a los descensos moderados de los flujos de agua en profundidad, desde el origen de su recarga, hasta el manantial.

8.4.3. Conductividad Eléctrica (CE)

De acuerdo a los estudios hidrogeológicos realizados por Ingemmet en las diferentes cuencas hidrográficas del Perú, se evidencia que los valores habituales de conductividad eléctrica para aguas subterráneas en zonas continentales (alejadas de la línea de costa) oscilan entre 10 µS/cm y 1300 µS/cm, estos valores coincidentemente se encuentran dentro del rango de valores aptos para consumo humano y riego.

En la zona oriental de Arequipa, las fuentes de mayor interés como la Bedoya (1325-028:944 µS/cm), Yumina (1325-012:641 µS/cm), Ojo del Milagro 2 (1325-014:632 µS/cm), Ojo del Milagro 3 (1325-015: 625 µS/cm), tienen valores de alta calidad para aguas dulces, los que quiere decir que provienen de un acuífero bueno a muy bueno.

La galería filtrante Charcani CB-17 (1325-027; 1538 µS/cm); los manantiales Villa el Golf (1325-035:2004 µS/cm), Las Peñas Macho (1325-047:2065 µS/cm), se encuentran con valores elevados de contenido de sales. Las fuentes que si evidencian alto contenido de sales son las fuentes termales Agua de Jesús (1325-048: 3110µS/cm y Los Cornejos-membrillo (1325-049: 2720 µS/cm), presentan valores elevados, enriquecidos en minerales, aptas para el tratamiento

medicinal pero no aptos para el consumo humano. Estas fuentes se relacionan a su posible estructura de circulación, que puede ser una falla regional, que origina una circulación profunda y mayor tiempo de residencia en el subsuelo, lo que permite que el contenido de sales se eleve.

Los manantiales y pozos que se encuentran en las inmediaciones de la zona urbana, y por ser manifestaciones de acuíferos aluviales someros y de permeabilidad elevada, se encuentran más susceptibles a ingreso de aguas residuales contaminadas, lo que hace que su conductividad eléctrica se incremente.

8.5. Facies hidroquímicas

Teniendo como base, el mapa de inventario de fuentes, se ha evaluado las concentraciones de los componentes iónicos mayoritarios en el agua, como los cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+) y aniones (HCO_3^- , SO_4^{2-} y Cl^-).

El predominio de las facies hidroquímicas se ha calculado usando el software Aquachem versión 5.1, que a su vez nos ha permitido generar un mapa hidroquímico que represente los valores y el predominio de los elementos químicos mayoritarios.

Para establecer comparaciones entre los elementos predominantes se ha planteado los puntos en el diagrama de Stiff, los cuales nos permitirán visualizar figurativamente los resultados ubicados sobre un mapa hidroquímico (Figura 8.1).

Para el análisis e interpretación final de datos hidroquímicos se han utilizado los diagramas de Piper y evolución de flujos de Miffilin, Stiff, Schoeller-Berkaloff; con la finalidad de dar una interpretación de su posible origen o procedencia del agua subterránea (interacción agua roca), así como su calidad para los distintos usos.

8.5.1. Diagramas de Stiff

Son representaciones gráficas, que muestran sintéticamente las características químicas principales del agua, facilitando su clasificación. En la figura 8.1, se observan los diagramas de Stiff para cada fuente analizada, los puntos planteados en el mapa corresponden a surgencias subterráneas (manantiales y fuentes termales) dejando de lado muestras de puntos de registro, los pozos y la galería filtrante (aguas con intervención del hombre y aguas superficiales), que no son representativas para los objetivos del estudio.

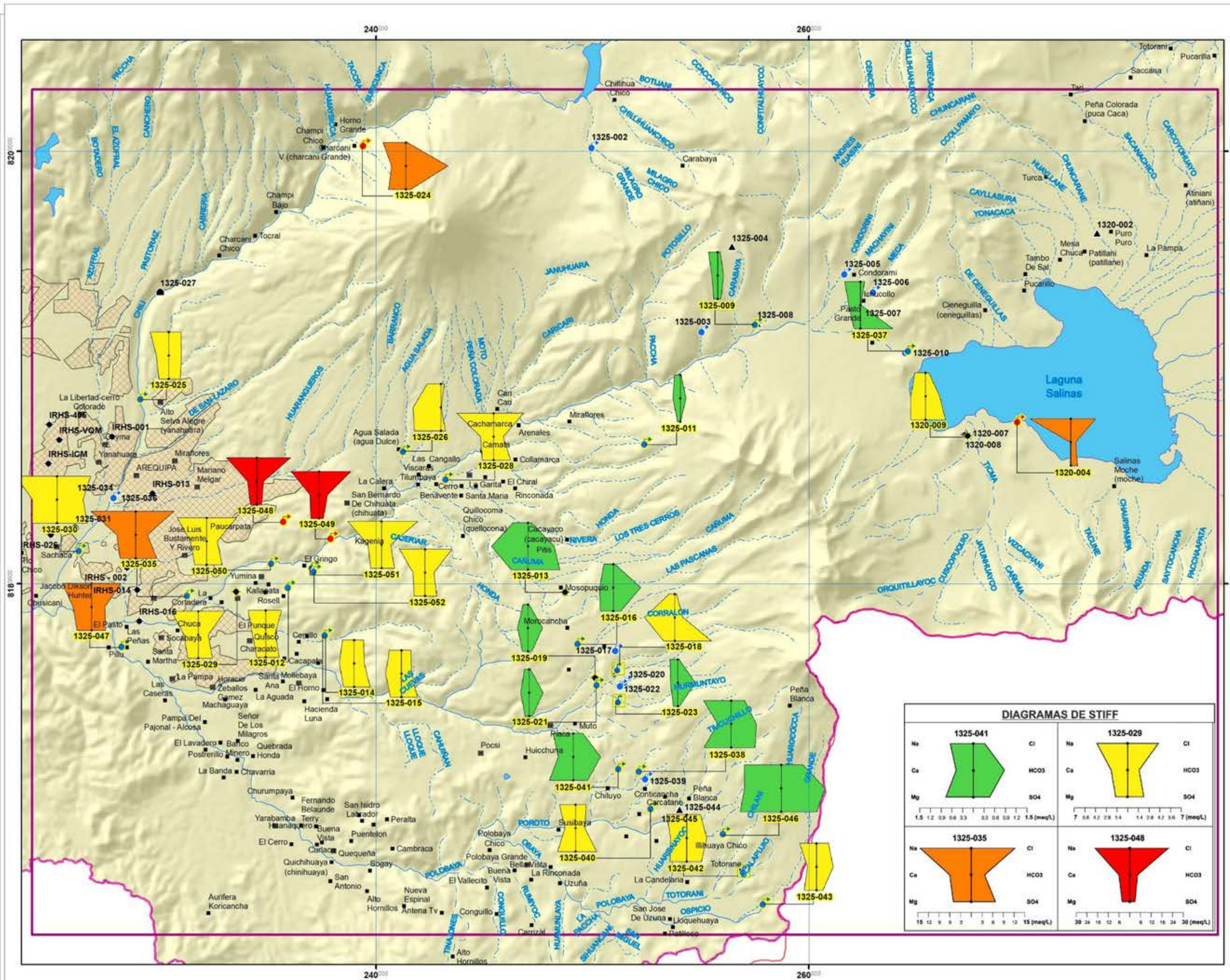
En la figura 8.1 se observa el mapa hidroquímico de la zona de estudio con los diagramas de Stiff, representando cada punto de muestreo, analizado y clasificado con los valores respectivos.

En la zona oriental de Arequipa, los manantiales y fuentes termales, se observan cuatro rangos de valores hidroquímicos:

- De 0 a 1.5 meq/L (11 muestras)
- De 0 a 7 meq/L (16 muestras)
- De 0 a 15 meq/L (4 muestra)
- De 0 a 30 meq/L (2 muestra)

En el mapa se visualiza mayormente los gráficos de Stiff de color amarillo y verde, los que tienen bajos contenidos de sales y minerales, a diferencia de las aguas termales que también se encuentran cargados de minerales.

La predominancia hidroquímica de las fuentes de aguas subterránea más importantes para el presente reporte son La Bedoya (1325-028), Clorurada Sódica (Cl-Na), Yumina (1325-012) Clorurada Sódica (Cl-Na), Ojo del Milagro 2 (1325-014) y Ojo del Milagro 3 (1325-015) Sulfatada Cálcica ($\text{SO}_4\text{-Ca}$) cuyos valores se deben al contacto con rocas volcánicas a través de su recorrido.

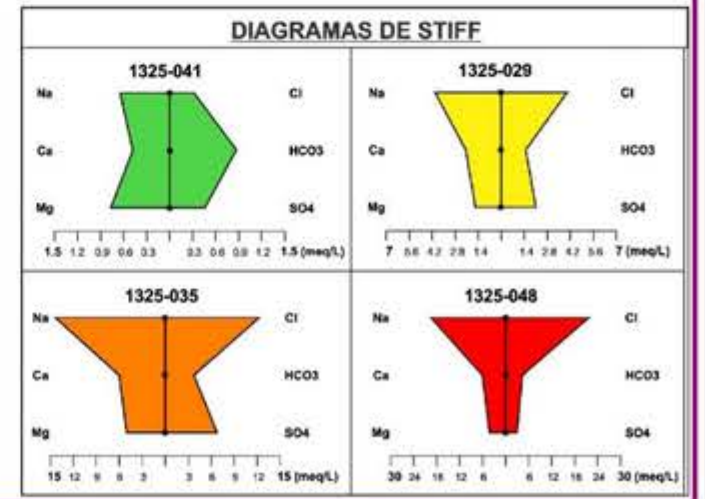


SIMBOLOGÍA

- Centro poblado
- Área de estudio
- ▨ Ciudad de Arequipa
- Laguna
- Cuenca Quilca-Vitor-Chili

DRENAJE

- Quebrada
- - - Quebrada Intermitente
- - - Quebrada Seca
- Río
- - - Río Intermitente



INGEMMET

INSTITUTO GEOLOGICO, MINERO Y METALURGICO

Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico

MAPA HIDROQUÍMICO

DELIMITACIÓN DE LOS PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DE LOS ACUÍFEROS UBICADOS EN LA ZONA ORIENTAL DE AREQUIPA

8.5.2. Diagramas de Piper y evolución de flujos Mifflin

Se ha utilizado este diagrama, para plotear los resultados de elementos mayoritarios, donde se representa las fuentes evaluadas de un solo sistema acuífero, en un mismo gráfico, sin dar lugar a confusiones. Los puntos ploteados corresponden a los contenidos predominantes de aniones versus los metales disueltos (cationes), los mismos que tienen predominancias coincidentes con el mapa hidroquímico elaborado con el diagrama de Stiff (Figura 8.1).

Los diagramas de Scatter nos permite corroborar estas predominancias con la evolución de flujos utilizando la relación hidroquímica $\text{Cl} + \text{SO}_4$ vs $\text{Na} + \text{K}$ (meq/l) (Mifflin, 1988 en Ángeles et al, 2004) (Gráfico 8.1, 8.2 y 8.3).

8.5.2.1. Interpretaciones

Considerando que, las predominancias químicas están relacionadas con la evolución de flujos, se establece el gráfico comparativo entre el diagrama de Piper y el diagrama de Scatter. En aguas naturales las fuentes de predominio bicarbonatado tienen corto recorrido, pero también existen fuentes sulfatadas que tienen corto recorrido, normalmente se presenta cuando los componentes iónicos son bajos.

a) Para acuíferos porosos no consolidados.

Recordando que los reservorios en acuíferos porosos no consolidados se encuentran en depósitos aluviales o fluviales (porosos), y expuestas a las cargas iónicas, se han encontrado cuatro tipos de predominancias químicas del agua (Grafico 8.1).

Para esta interpretación se ha separado en tres gráficos:

En los acuíferos porosos no consolidados se tiene aguas subterráneas de predominancia bicarbonatada cálcica ($\text{HCO}_3\text{-Ca}$), seguida de bicarbonatada sódica ($\text{HCO}_3\text{-Na}$), sulfatada cálcica ($\text{SO}_4\text{-Ca}$) y Cloruradas Sódicas (Cl-Na).

La predominancia bicarbonatada cálcica del agua procede fundamentalmente de la zona edáfica, donde hay una alta concentración de CO_2 debido a la respiración de organismos y la descomposición de la materia orgánica, las aguas que tiene contacto con materia orgánica y su recorrido es local a intermedio adquieren la predominancia bicarbonatada.

La predominancia sulfatada cálcica sódica ($\text{SO}_4\text{-Ca}$) coincide con fuentes de recorrido local a intermedio, dejando solo dos fuentes de recorrido regional. Estas fuentes son aguas con mayor tiempo de retención en el subsuelo y con mayor distancia de recorrido; sin embargo, es posible analizar con parámetros como el caudal y la temperatura, que nos ayudará a determinar si las fuentes de predominancia sulfatada, son de recorrido intermedio o tiene un enriquecimiento adicional de sulfato y calcio.

Las fuentes de mayor interés como la Bedoya (1325-012) (clorurada sódica), Yumina (1325-012) (clorurada sódica), Ojo del Milagro 2 (1325-014) (sulfatada cálcica), Ojo del Milagro 3 (1325-015) (sulfatada cálcica), tiene características especiales.

Las fuentes de Yumina (1325-012) y La Bedoya (1325-012) tiene un recorrido intermedio a regional, las aguas subterráneas que llegan a estos manantiales adquieren cloruros de la lluvia y de las rocas volcánicas, la precipitación sobre rocas volcánicas fracturadas y meteorizadas otorga un fuerte componente del ion cloruro. Este analito no forma sales de baja solubilidad, no se oxida ni se reduce en aguas naturales, tampoco es adsorbido significativamente ni entra a

formar parte de procesos bioquímicos, lo que se le considera un buen trazador, manteniendo su predominancia química (clorurada) hasta la surgencia en el manantial.

La segunda predominancia sódica lo adquieren del contacto del agua con zonas arcillosas, el sodio es muy soluble en el agua puede ser absorbido por las arcillas en procesos de intercambio catiónico y en contacto con aguas de recorrido local otorga la predominancia clorurada sódica.

Esta interpretación nos permite aseverar que las aguas de los manantiales Yumina (1325-012) y La Bedoya (1325-012) viene de la parte alta del estrato volcán Pichupichu.

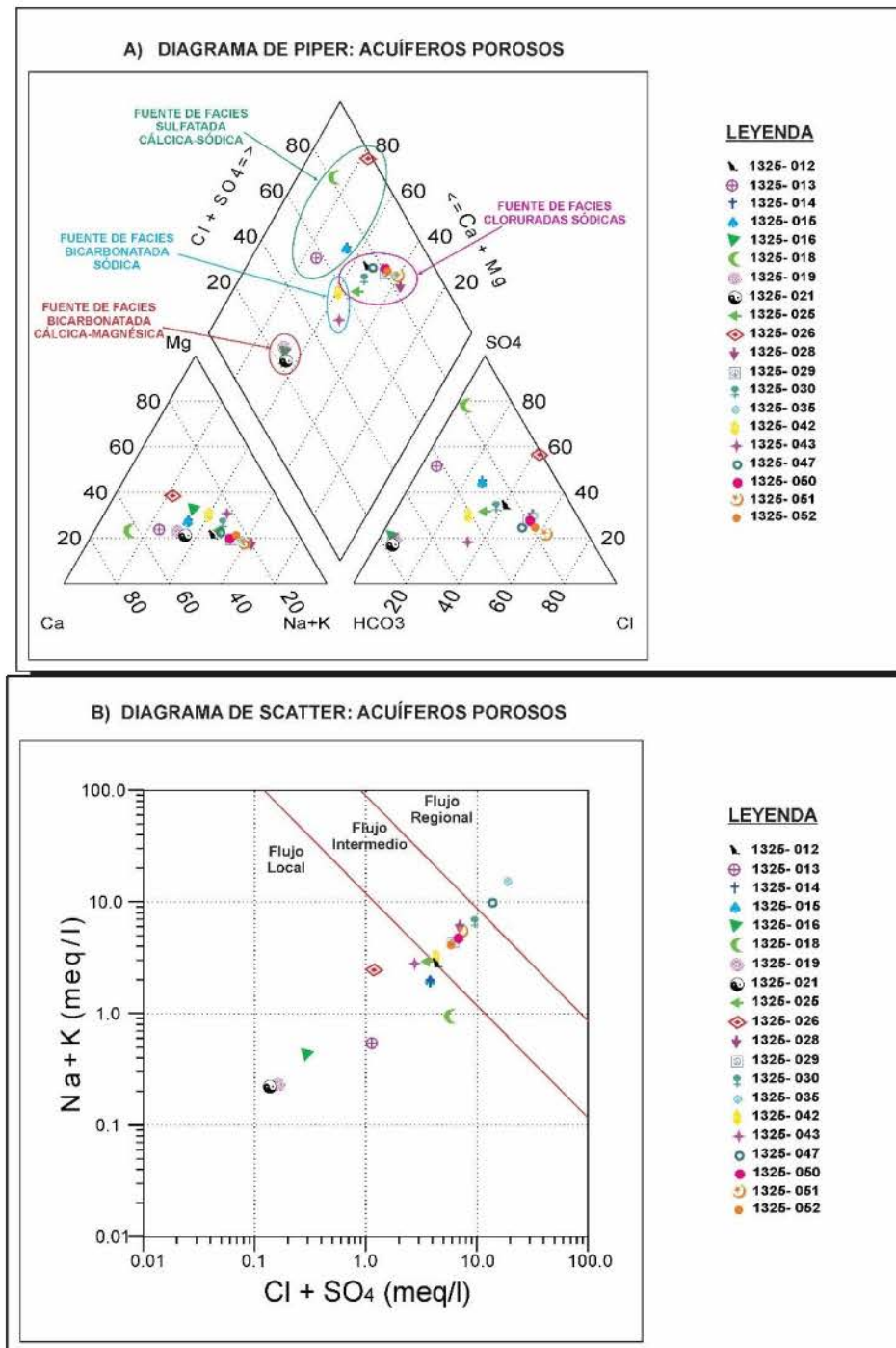


Gráfico 8.1. Diagramas de Piper y Scatter para acuíferos porosos no consolidados

Las fuentes de Ojo del Milagro 2 (1325-014) y Ojo del Milagro 3 (1325-015) de predominancia sulfatada cálcica se encuentran muy cerca de recorrido intermedio, su predominancia sulfatada lo adquiere del lavado de materiales salinos, de la oxidación de sulfuros y de la descomposición de sustancias orgánicas que tuvieron contacto con el agua.

Su segunda predominancia los adquiere de los procesos de reducción disolución y por el intercambio catiónico de las fases solidas de sodio y Magnesio, con los recorridos del agua subterránea. Por lo tanto, su fuente de alimentación y recarga proviene de la parte alta del cerro Pichupichu.

b) Para acuíferos fisurados volcánicos

El volcánico Barroso ubicado en las inmediaciones del estrato volcán Pichupichu, constituyen los mejores reservorios en acuíferos fisurados. Estas rocas se encuentran fracturadas y por lo tanto son permeables y se ubican en el lugar donde se produce la mayor precipitación pluvial, la parte más elevada de la cuenca.

En las rocas volcánicas la exposición a cargas iónicas mayoritarias es baja, donde además se han encontrado solo dos tipos de predominancias químicas del agua (Grafico 8.2).

Los acuíferos fisurados descargan en una primera línea de surgencia, cerca de la zona de recarga a través de manantiales de predominancia bicarbonatada sódica cálcica ($\text{HCO}_3\text{-Na}$) y sulfatada sódico cálcica ($\text{SO}_4\text{-Na}$), evaluados en 13 manantiales que afloran a lo largo de la superficie, desde la zona de recarga hasta el contacto con depósitos no consolidados.

La predominancia bicarbonatada sódica ($\text{SO}_4\text{-Na}$) coincide con cuatro fuentes de recorrido local y de corto tiempo de residencia en el subsuelo, la presencia de cationes sódico y cálcico evidencian que tienen mezcla de aguas de recorrido local y recorrido intermedio, otro grupo de fuentes de predominancia química sulfatadas sódico cálcica, evidencian que estas aguas tiene recorrido local pero con mayor tiempo de residencia en el subsuelo, cuya concentración se acerca a la línea de recorrido intermedio.

El manantial La Trampa (1325-040) tiene aguas de recorrido intermedio y composición bicarbonatada sódica, la cual se debe al contacto de aguas subterráneas con materia orgánica o raíces de plantas. Sin embargo, es posible analizar con parámetros como el caudal y la temperatura, que nos ayudará a determinar si las fuentes de predominancia sulfatada, son de recorrido intermedio o tiene un enriquecimiento adicional de sulfato y calcio del contacto con rocas volcánicas ácidas.

De acuerdo a las características permeables de la zona de recarga y la presencia de rocas fracturadas de la parte alta de la cuenca, donde se encuentran los depósitos volcánicos del estrato volcán Pichupichu, sus características fracturadas, sumadas a la meteorización y la presencia de material erosionado contribuyen a que las aguas de precipitación que tienen contacto con estos materiales adquieran predominancia químicas de cloruros y sulfatos, los que van a otorgar facies químicas con predominancias de sulfatada y clorurada. Las interacciones que adquiere el agua a lo largo de su recorrido contacto con materiales arcillosos, salinos, suelos erosionados meteorizados o alterados, le otorgaran una segunda predominancia Cálcica, Sódica Magnésica.

Esta variación también se puede diferenciar de acuerdo a la profundidad de recorrido del agua, donde a mayor recorrido elevara su temperatura en rangos de 3 m por cada 100 metros de infiltración. Mayor recorrido implica también mayor tiempo de residencia en el subsuelo y mayor contenido de sales.

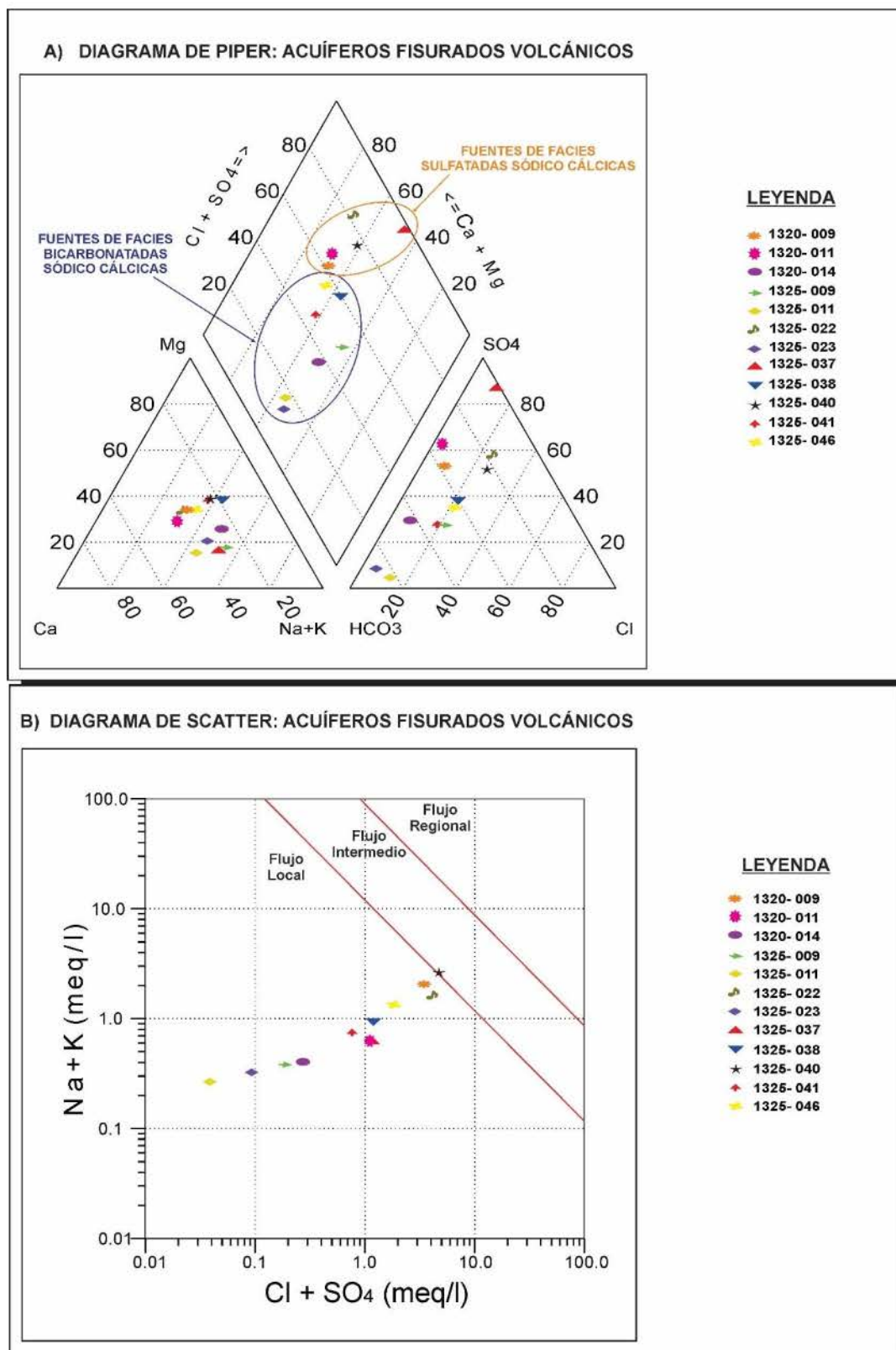


Grafico 8.2. Diagramas de Piper y Scatter para acuíferos fisurados volcánicos

c) Para fuentes termales

Las fuentes termales, tiene características especiales, circulación profunda o circulación cercana a una cámara magmática, la misma que le otorga alta temperatura, ya alto contenido de sales y minerales (Grafico 8.3 A y 8.3B).

Las fuentes termales identificadas en el presente reporte son cuatro (4), tres (3) tienen predominancia clorurada sódica (Cl-SO_4), identificando su recorrido regional y una tiene predominancia bicarbonatada sódico cálcica, también de recorrido regional, pero, pero con mezclas de agua superficiales y materia orgánica.

Las fuentes termales Aguas Calientes (1320-002), Aguas de Jesús (1325-048) y Los Cornejos-el Membrillo (1325-049), cuyas temperaturas se encuentran entre 33.5°C , 23°C y 23°C respectivamente, evidencian su largo recorrido, pero su intermedia a baja profundidad de infiltración generan profundidades relativamente bajas.

Según el diagrama de Scatter, esta fuente proviene de flujos regionales. Su predominancia clorurada sódica, lo adquieren de la lluvia que cae en la zona de recarga, circula a cierta profundidad muy cercana a contenido de materiales con contenido de sales o materiales arcillosos, que le otorgan su segunda predominancia química de Na.

La fuente termal Charcani V (1325-024) tiene recorrido (intermedio), su temperatura de 36°C indica que son aguas con mayor tiempo de residencia en el subsuelo y enriquecida con infiltración de aguas superficiales, que le otorgan su predominancia bicarbonatada.

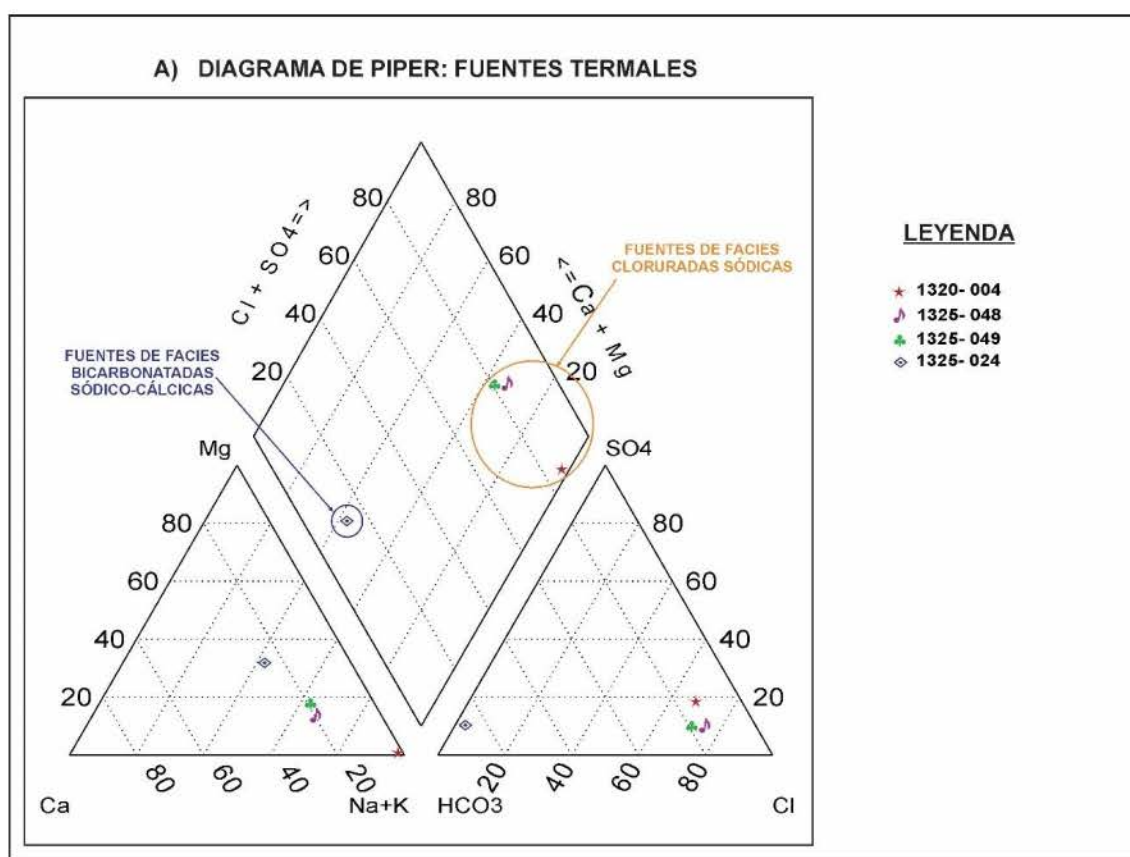


Grafico 8.3A. Diagramas Piper para acuíferos relacionados a fuentes termales

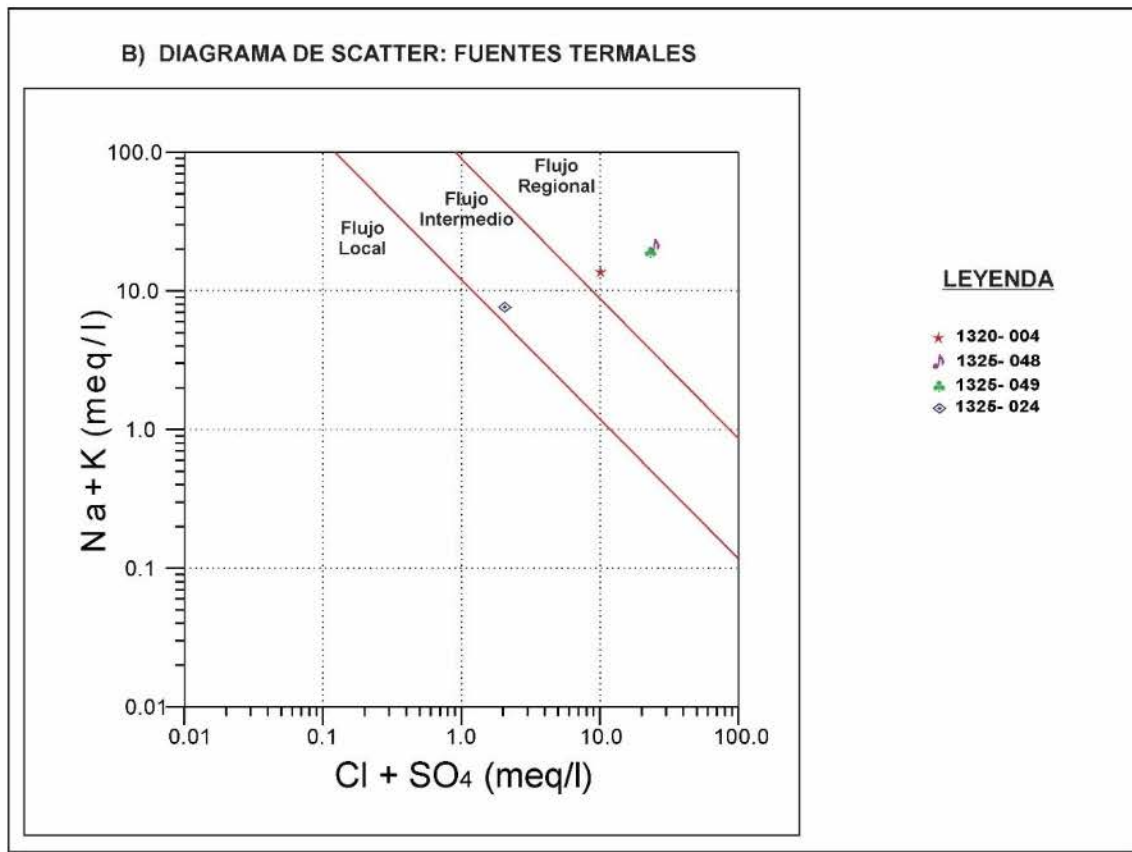


Grafico 8.3 B. Diagramas Scatter para acuíferos relacionados a fuentes termales

8.6. Evolución química de las aguas subterráneas en la zona oriental de Arequipa

Desde que el agua alcanza el nivel piezométrico más próximo hasta que sale al exterior en un manantial o fuente termal, puede transcurrir unos días o miles de años, y el recorrido puede ser local o de varios kilómetros. Por lo tanto, la evolución de la composición química de las aguas dependerá de los materiales por donde atraviesa, el contenido de minerales con las que entra en contacto y del tiempo de residencia en el sub-suelo.

Chebotarev, en el libro de Frezze y Cherry, (1980), realizaron un ensayo mediante el procesamiento de más de 10,000 muestras de aguas de pozos. Los aniones en las subterráneas tienden a evolucionar químicamente siguiendo la siguiente regularidad: $\text{HCO}_3 \gg \text{SO}_4 \gg \text{Cl}$. Estos cambios ocurren en la medida que el agua se mueve desde zonas de alimentación y recarga con grandes caudales variables (flujos locales), pasando a través de zonas intermedias (flujos intermedios), hasta llegar a zonas donde los flujos son escasos y el agua es vieja, desde el punto de vista geológico (flujos regionales), correlacionales con los acuíferos de Arequipa.

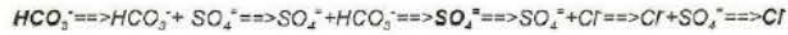
Evolución catiónica:



Causas de evolución catiónica:

- Intercambio catiónico con las arcillas

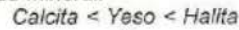
Evolución aniónica:



Causas de la evolución aniónica:

- Solubilidad mineral
- Disponibilidad mineral

Solubilidad mineral:



Disponibilidad mineral:

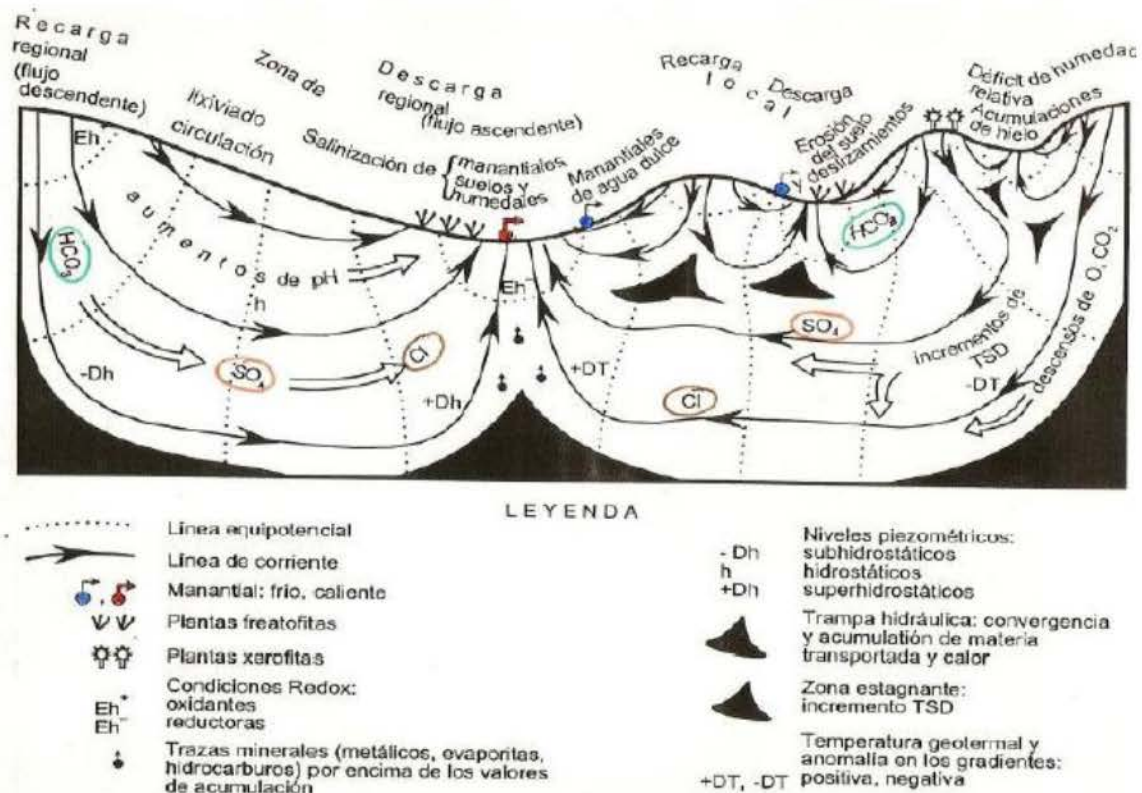
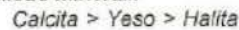


Figura 8.2 Sistemas de flujos para la evolución química de las aguas subterráneas. (L. Rebollo, 2010)

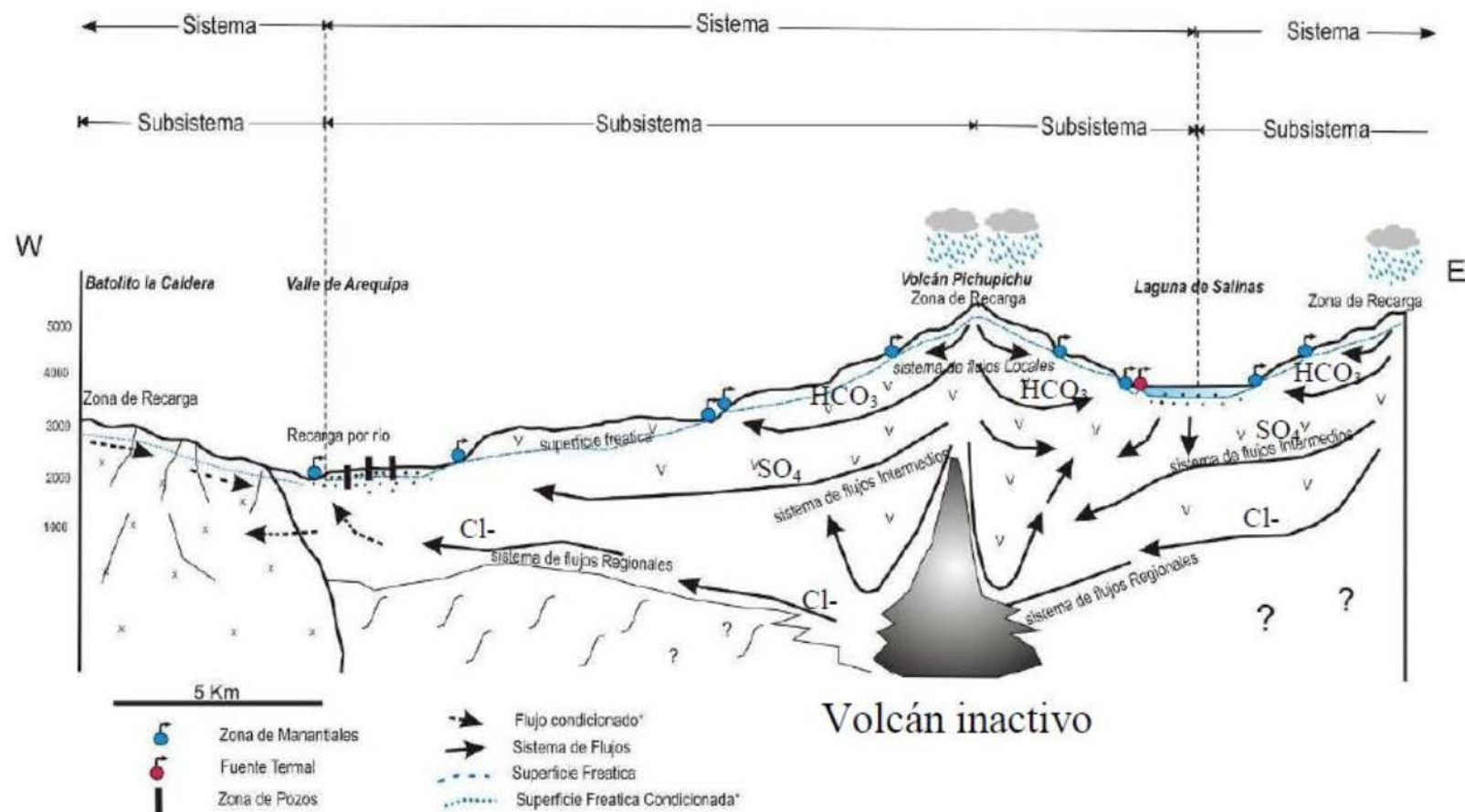


Figura 8.3 Sistema de flujos subterráneos y evolución química de las aguas subterráneas en la zona oriental de Arequipa (Sulca 2012).

8.7 Análisis isotópico

La utilización de isótopos ambientales (tanto estables como radiactivos) se ha convertido desde hace más de 40 años, en uno de los métodos eficaces y complementarios para el estudio de las aguas subterráneas. Una de las mayores ventajas de su utilización es que, son constituyentes de la molécula de agua y sus variaciones se deben a procesos naturales, descartando la acción antrópica; por lo tanto, constituyen trazadores naturales del agua. El fraccionamiento isotópico del agua se produce, con los cambios de estado que experimenta el agua como la evaporación, condensación, etc., a lo largo del ciclo hidrológico (Herráez, 2008). El fraccionamiento isotópico depende estrechamente de la temperatura, de la velocidad de evaporación y de la humedad atmosférica.

Si la evaporación se produce lentamente se puede considerar que existe equilibrio, pero si es rápido no existe equilibrio. En la naturaleza la evaporación se produce con mucha frecuencia en condiciones de no equilibrio; sin embargo, el proceso de condensación se produce lentamente y en condiciones de equilibrio.

Los resultados isotópicos (Cuadro 8.1) en el área de estudio dependen básicamente del efecto de continentalidad, la altura (hasta 6075 msnm.) y temperatura, es por eso que nuestros resultados presentan un empobrecimiento Isotópico (Sulca & Peña, 2010). Los Pozos muestran un mayor empobrecimiento debido que las aguas están asociadas a sistemas de flujos intermedios en su mayoría y locales a regionales.

Cuadro 8.1

Resultados de ^{18}O y ^2H , de las principales fuentes de la sub cuenca del río Chili.

Nº	X(m)	Y(m)	Z(m)	Nombre	Código	$\delta \text{‰}^{18}\text{O}$	$\delta \text{‰}^2\text{H}$
1	235918	8179822	2564	Yumina	13205-012	-10,17	-66,3
2	248733	8179615	3335	ojo de milagro	13205-013	-9,05	-57,2
3	237624	8177624	2566	Ojo del Milagro	13205-014	-9,69	-63,1
4	239405	8200255	3200	Charcani V	13205-024	-9,28	-61,5
5	243213	8184827	2897	La Bedoya	13205-028	-11,83	-84,8
6	226258	8181520	2222	Tingo	13205-030	-12,77	-95,4
7	256931	8166634	3399	Totorani	13205-042	-11,52	-80,1
8	235721	8182878	2628	Agua de Jesús	13205-048	-10,73	-75,2
9	228976	8179714	2328	IRHS-014-Socabaya	IRHS-014	-13,28	-103,1
10	224247	8186395	2366	IRHS-385-C. Colorado	IRSH-385	-14,66	-114,3
11	228330	8182739	2285	IRHS-5-ETF Parque industrial	IRSH-5-ETF	-11,87	-87,7

Fuente: Sulca & Peña, 2010

Utilizando el diagrama isotópico (Taylor, 1974) con datos de O^{18} y Deuterio, y considerando que el Perú aún no se tiene una línea meteorológica local, interpretamos los resultados utilizando comparaciones en base a la línea meteorológica mundial, desarrollada por la Agencia Internacional de Energía Atómica (AIEA), que a escala regional es válida.

8.7.1. Interpretaciones

- Los resultados isotópicos de los manantiales se ubican por encima de la LMM (Grafico 8.4) y los datos de pozos incluyendo el manantial Tingo, se ubican por debajo; por lo tanto, se interpreta que tienen composición isotópica ligera, las aguas de pozos y manantiales corresponden a origen pluvial, con ligera mezcla del agua de los pozos con aguas superficiales.
- Las aguas subterráneas que se encuentran en los pozos se recargan a una altitud similar, cuya interpretación corresponde a la parte alta de Arequipa donde aflora los volcanes Misti, Chachani y Pichupichu, en cambio los manantiales tienen resultados isotópicos con mezclas de aguas recargadas a diferentes altitudes, lo cual explica que provienen de un mismo acuífero o material de recarga que corresponden a las lavas andesíticas fracturadas del Grupo Barroso las que facilita la infiltración de aguas de lluvia a diferentes altitudes.

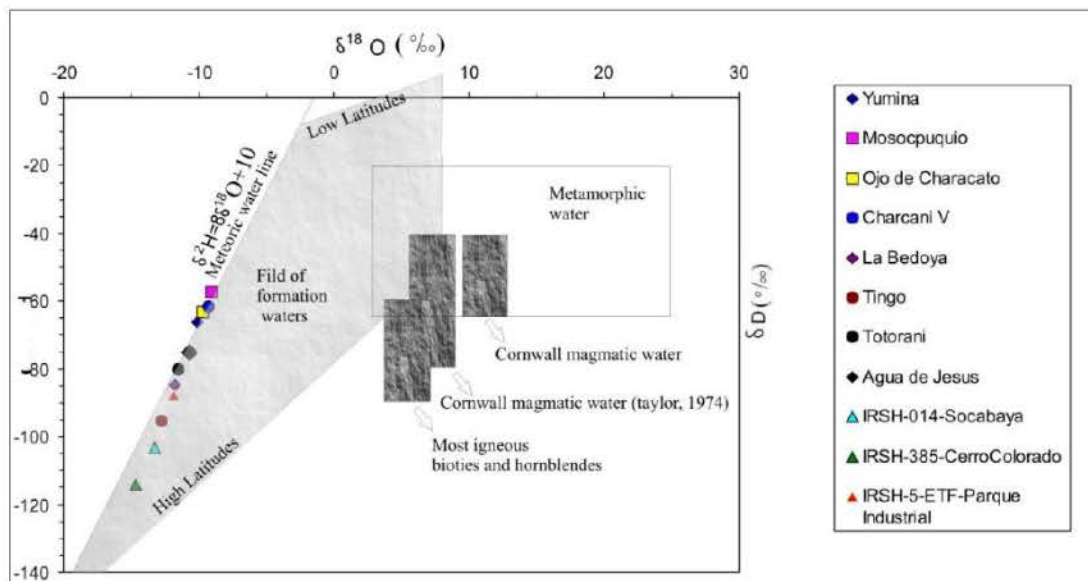


Grafico 8.4. Relaciones isotópicas del O^{18} y D de las fuentes de las aguas subterráneas con la LMM. (Línea Meteorológica Mundial), (Sulca 2012).

9.0. VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS

Es importante mantener el cuidado de las fuentes de agua subterránea que tienen calidad, por lo tanto, en el presente ítem conoceremos las características físicas de las rocas reservorio y las rocas relacionadas a los manantiales evaluando su estado actual, es decir cuan susceptibles pueden ser frente al peligro de contaminación.

Para este trabajo se ha elaborado un mapa de vulnerabilidad de acuíferos (Figura 9.1), usando el método GOD. Este mapa no pretende diagnosticar el peligro de contaminación que tenga la zona, pero sí exponer el estado actual y natural de las formaciones geológicas frente al peligro de contaminación.

El primer paso hacia la protección de las aguas subterráneas es tomar conciencia de la escala y seriedad del problema, para ello es necesario cuantificar la debilidad de los factores que están directamente relacionados con los acuíferos a contaminarse, investigar cuáles son los factores que aumentan el riesgo de contaminación y, acorde a esta información, tomar medidas de prevención para evitar problemas futuros (Foster *et al.*, 1993).

La vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero es una propiedad intrínseca de cada material que establece la susceptibilidad a ser afectado adversamente por una carga contaminante, independientemente de la presencia de contaminantes (Foster & Hirata, 1988).

El riesgo de contaminación está determinado básicamente por las características del acuífero, las que, por lo general, son permanentes a escalas razonables de tiempo, y por la existencia de actividades potencialmente contaminantes, las que son esencialmente dinámicas.

Existen numerosas metodologías para determinar la vulnerabilidad de un acuífero, desde que Margat (1968) introdujera el término “vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación”, se han sucedido numerosas definiciones, calificaciones y metodologías sobre lo mismo, en muchos casos orientados a su representación cartográfica.

Hasta la fecha, se considera la vulnerabilidad como una propiedad referida exclusivamente al medio (tipo de acuífero y cobertura, permeabilidad, profundidad, recarga, etc.), sin tener en cuenta la incidencia de las sustancias contaminantes (vulnerabilidad intrínseca) y la otra orientación, que agrupa los que sí le otorgan (además del comportamiento del medio) trascendencia al tipo y carga del contaminante (vulnerabilidad específica).

Para evaluar la vulnerabilidad específica de un acuífero a la contaminación, uno de los métodos más empleados es el índice DRASTIC, desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los EE.UU. (Aller *et al.*, 1987), pero para la zona Oriental de Arequipa no se cuenta con las variables necesarias, por lo tanto, se usó el método GOD, que si se tiene variables conocidas y principalmente centrada en la geología de la zona.

La información generada mediante este índice se refiere al cálculo ponderado de la contaminación de un acuífero, según su característica intrínseca y la presencia de un contaminante.

El presente trabajo de vulnerabilidad de acuíferos en la parte oriental de la ciudad de Arequipa se desarrolla desde el punto de vista de la prevención, con este mapa no se pretende diagnosticar el peligro de contaminación actual que existe en el área de estudio, pero sí se busca

describir el estado actual y natural de las formaciones geológicas e hidrogeológicas susceptibles o vulnerables frente al peligro de contaminación. Es decir, se trata de medir cuan vulnerable pueden ser los acuíferos frente a un peligro de contaminación.

Para elaborar el mapa de vulnerabilidad de acuíferos en la zona oriental de Arequipa, se utilizó el método GOD. Este método fue propuesto por FOSTER (1987), se basa en la asignación de índices entre 0 y 1 a 3 variables que son las que significan: G (*ground water occurrence* – tipo de acuífero) O (*overall aquifer class* – litología de la cobertura) D (*depth* – profundidad del agua o del acuífero) (Gráfico 9.1).

Para la cuantificación o ponderación de las unidades hidrogeológicas se utilizó el cuadro de caracterización hidrogeológica donde se asignaron valores de vulnerabilidad a cada una de las unidades hidrogeológicas según el método GOD (Cuadro 9.1)

GOD es un índice utilizado para determinar la vulnerabilidad intrínseca a nivel regional y local, por lo que no toma en cuenta el tipo de contaminante. Este método establece la vulnerabilidad del acuífero, como una función de la inaccesibilidad de la zona saturada, desde el punto de vista hidráulico a la penetración de contaminantes y la capacidad de atenuación de los estratos encima de la zona saturada como resultado de su retención física y la reacción química con los contaminantes (Agüero y Pujol, 2002; Foster e Hirata, 1988; Vrba y Zoporozec, 1994).

Para una mejor lectura del mapa se ha establecido una leyenda que se detalla a continuación (Cuadro 9.2).

Cuadro 9.1
Valores de vulnerabilidad de acuíferos para materiales geológicos de la zona oriental de arequipa.

CLASIFICACIÓN HIDROGEOLÓGICA		UNIDAD GEOLÓGICA	DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA	PONDERACIÓN	GRADO DE VULNERABILIDAD
ACUÍFERO	FISURADO VOLCÁNICO	Grupo Barroso	Lavas andesíticas y traquiandesíticas, masivas y fluidales, en general con texturas porfíricas	0.64	ALTA
		Deposito Volcánico	Andesitas gris oscuras, escoriases, con cristales de cuarzo	0.6	ALTA
	POROSO NO CONSOLIDADO	Depósito. Aluvial	Gravas y arenas mal seleccionados en matriz limo arenosa, y materiales residuales no consolidados.	0.75	EXTREMA
		Depósito. aluvial, lacustrino		0.75	EXTREMA
		Depósito. fluvioglaciar	Fragmentos angulosos a subangulosos, diámetro variable en matriz.	0.75	EXTREMA
	POROSO VOLCÁNICO	Grupo Barroso	Depósito de avalanchas de escombros en combinación con flujo de lavas, lahares, arenas y arcillas	0.75	EXTREMA
ACUITARDO		Depósito. Antropógeno	Depósito generado por el hombre. Ruinas desechos, relaves, coprolitos, canchas minerales, desechos industriales etc.	0.12	BAJA
		Depósito. Biogenico	Intercalación de limos, arenas y niveles orgánicos.	0.15	BAJA
		Complejo volcánico Pichupichu	Lavas y tobas	0.15	BAJA
	INTRUSIVO	Complejo basal de la costa	Gneis, Granulita, Esquisto	0.144	BAJA
		Rocas intrusivas	Diorita, riolita, brecha, gabro, monzodiorita, tonalita, granito	0.144	BAJA
	SEDIMENTARIO	Formación Cachíos	Lutitas y areniscas gris oscuras; Lutitas muy deleznales, areniscas calcáreas con nódulos calcáreos.	0.18	BAJA
		Formación Matalaque	Lavas andesíticas de matriz afírica intercalada con aglomerados andesíticos gris claro.	0.18	BAJA
		Formación Puente	Areniscas masivas de grano fino, intercaladas con lutitas	0.18	BAJA
	VOLCÁNICO	Formación Añashuayco	Tobas riolíticas y riodacíticas blancas con estratos basales de tobas rosadas.	0.18	BAJA
		Grupo. Barroso	Brechas monolíticas, domos dacíticos, lapilli, cenizas y tobas	0.18	BAJA
		Grupo Barroso	Lavas y tobas	0.5	MODERADA
		Formación Llallahui	Tobas riodacíticas y andesitas porfíricas	0.18	BAJA
		Formación Sencca	Tobas grises clara ligeramente rosada, dacítica poco compacta	0.18	BAJA
		Depósito. Volcánico	Flujos piroclásticos	0.336	MODERADA

Fuente: Elaboración propia 2018

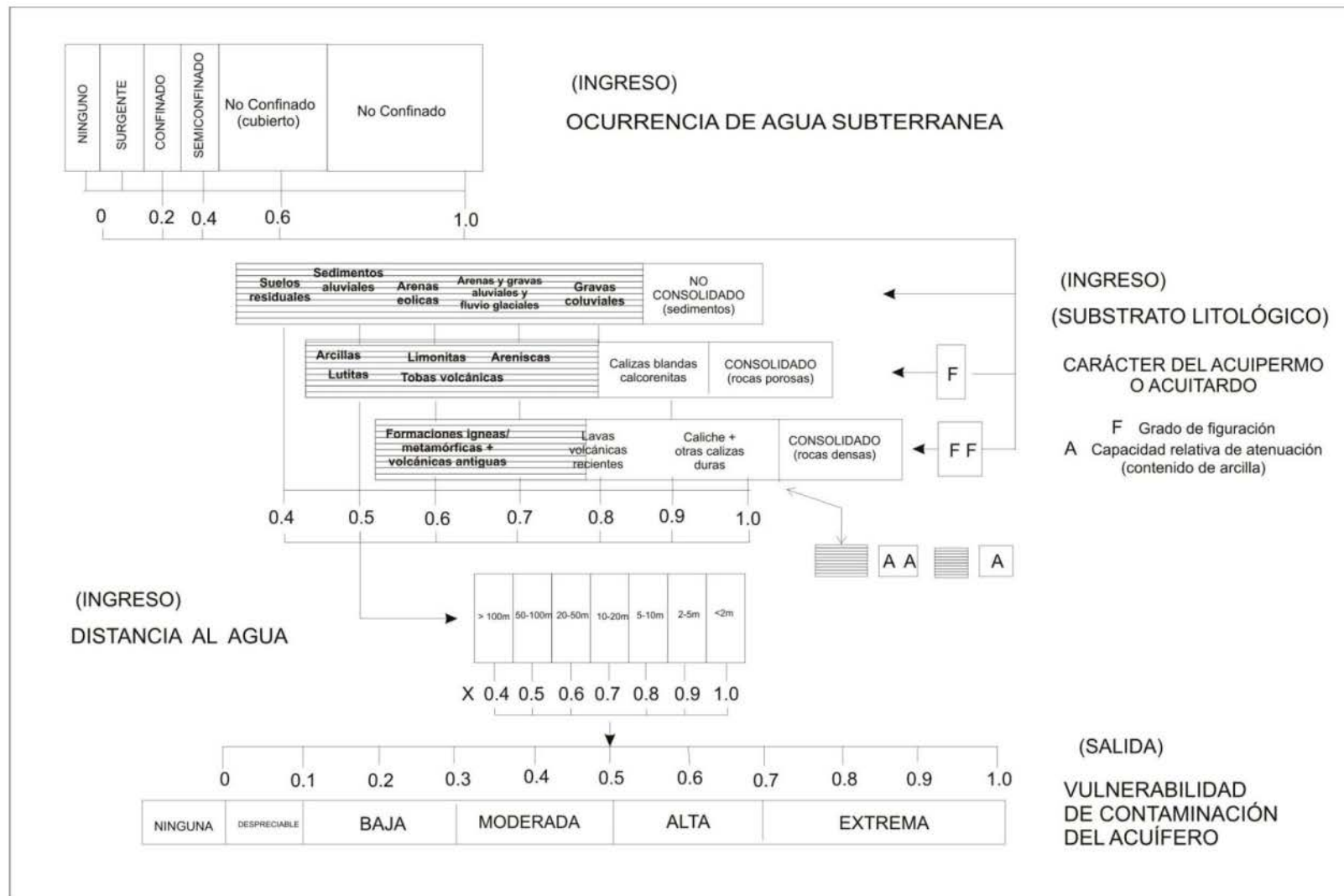


Gráfico 9.1 Patrón de parámetros y valores de ponderación, utilizados para la elaboración de mapa de vulnerabilidad, según el índice GOD (Foster, 1987).

Cuadro 9.2**Leyenda hidrogeológica establecida para el mapa de vulnerabilidad de acuíferos**

Nro.	Característica de los materiales	Color	Categoría GOD
1	Materiales donde los acuíferos son muy vulnerables. Zonas donde es necesario extremar las medidas preventivas. Materiales donde la contaminación puede propagarse velozmente y a grandes distancias.		EXTREMA
2.	Materiales con acuíferos vulnerables, terrenos donde la circulación subterránea es rápida y la filtración y o atenuación natural escasa.		ALTA
3.	Materiales donde los acuíferos se encuentran parcialmente protegidos, de la entrada o de la propagación de agentes contaminantes, por ciertas características específicas de los materiales.		MODERADA
4.	Materiales donde la contaminación puede revestir características variables, por ser poco extenso y de tipo muy diversificado.		BAJA
5.	Materiales impermeables, en rocas intrusivas, donde la contaminación es nula, no se excluye la existencia de pequeños acuíferos libres, muy vulnerables, asentados en áreas de alteración.		DESPRECIABLE

Fuente: IGME, 1976.

Considerando las características propias de las formaciones geológicas, apoyados con el mapa hidrogeológico (fundamentalmente valores de permeabilidad y litología), se han clasificado y ponderado las unidades geológicas que afloran en la zona oriental de Arequipa de acuerdo a su estado natural.

Esta ponderación nos ha permitido valorar cuatro categorías de vulnerabilidad, representadas en el mapa de vulnerabilidad de acuíferos (Figura 9.1). No se ha considerado la ubicación de agentes contaminantes, pues para ello se necesita otra metodología más detallada.

9.1 VULNERABILIDAD EXTREMA

Están considerados los acuíferos directamente expuestos a la contaminación, aquellos que son permeables desde el contacto con la superficie. Los acuíferos porosos no consolidados y los acuíferos porosos volcánicos pertenecientes al Grupo Barroso, se encuentran dentro de esta categoría, con valores ponderados de 0.75.

Son de vulnerabilidad extrema porque se trata de depósitos muy permeables y de acuíferos potenciales, porque en ellos existe explotación de aguas subterráneas. Sobre estos depósitos se desarrolla la ciudad de Arequipa y las áreas agrícolas que mueven a esta ciudad; por lo tanto, se producen con mayor frecuencia agentes de contaminación antrópica.

9.2 VULNERABILIDAD ALTA

En esta categoría se consideran todos aquellos afloramientos con litología fracturada y fallada que corresponden a los acuíferos volcánicos. Estos acuíferos, en su mayoría, tienen surgencias de aguas subterráneas a través de manantiales. Las fisuras de estos materiales se encuentran expuestas directamente a la infiltración de agentes contaminantes sin ningún tipo de filtración o retención. Se les ponderó con valores entre 0.6 y 0.64, según el método GOD y corresponde a los acuíferos fisurados volcánicos.

9.3 VULNERABILIDAD MODERADA

En esta categoría se incluyen los acuitardos volcánicos, en ellos la velocidad de circulación del contaminante es reducida, por lo que la propagación de una contaminación es bastante lenta y no llega a alcanzar grandes distancias; pero que por estar fracturados y tener estructuras que faciliten la circulación de contaminantes, se les considera de vulnerabilidad moderada.

Están incluidos en esta categoría los acuitardos pertenecientes a los depósitos piroclásticos, que tienen un valor ponderado de 0.336; y las lavas y tobas del Grupo Barroso, que tienen un valor ponderado de 0.5. Este valor, se encuentra en el límite entre valores de vulnerabilidad alta y vulnerabilidad moderada, por lo que, a esta unidad se le considera una vulnerabilidad de moderada a alta y se recomienda protección. Aledaño a esta unidad afloran los manantiales Yumina, Ojo del Milagro 1 y Ojo del Milagro 2 que son manifestaciones del acuífero poroso volcánico.

9.4 VULNERABILIDAD BAJA

Están considerados principalmente los acuitardos intrusivos, volcánicos y sedimentarios, compuestos por granitos, dioritas, gneis, tobas, brechas, arcillas, lutitas y areniscas; estos acuitardos tienen baja permeabilidad y fueron ponderados con valores entre 0.12 y 0.18, el riesgo de contaminación en estos materiales es bajo, pero si se encuentra en contacto directo con agentes contaminantes el riesgo se eleva, debido a la elevada porosidad que posee.

9.5 VULNERABILIDAD DESPRECIABLE

En estos materiales las permeabilidades son, en general, bajas y no existen acuíferos. El grado de exposición a la contaminación es muy relativo, en proporción a la escasa importancia de los acuíferos. En el caso de la zona oriental de Arequipa, no tenemos ninguna unidad en esta categoría, puesto que son casi impermeables.