



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y
METALÚRGICA**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



**ESTUDIO GEOLÓGICO Y CONTAMINACIÓN NATURAL DE
METALES PESADOS POR FUENTES TERMALES EN EL CAMPO
GEOTERMAL DE PINAYA, SANTA LUCIA - PUNO**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. ZULLY MARISOL LLANQUE QUISPE

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO GEÓLOGO

PUNO – PERÚ

2021



DEDICATORIA

A mi madre Marleny por los consejos que me brinda y por darme su amor.

A mi padre Carlos por apoyarme incondicionalmente en todo momento, por su apoyo en los tiempos difíciles y también en los favorables.

A ellos no solo les dedico la presente tesis si no todos los éxitos en mi vida.

A mis queridos hermanos Maricielo y Arnold a quienes adoro, son los mejores.

Zully Llanque



AGRADECIMIENTOS

Le expreso mi enorme gratitud a Dios por lo que tengo y quien soy, a la vida por ser maestra de aprendizaje constante y crecimiento.

De igual manera doy gracias a mis padres por siempre estar para mí y apoyarme en las decisiones que he tomado.

A mi alma Mater la Universidad Nacional del Altiplano y a todos mis docentes, gracias por las enseñanzas impartidas y por los consejos brindados, de cada uno de ellos me llevo una enseñanza en particular, en particular a mi director de Tesis Dr. Miguel Calcina por su aporte y sugerencias durante la realización del presente trabajo de Investigación.

Le doy las gracias al Ing. Víctor encargado del tambo de Pinaya por darme las facilidades para realizar los trabajos de campo.

Agradezco igualmente a todas y cada una de las personas que de una u otra manera contribuyeron a la culminación de la presente Tesis.

Zully Llanque



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

RESUMEN 19

ABSTRACT 20

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES..... 22

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 26

1.1.1. Problema General 26

1.1.2. Problema Específico..... 26

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN 27

1.3.1. Objetivo General 27

1.3.2. Objetivos Específicos 27

1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN 27

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. SISTEMA GEOTÉRMICO 30

2.1.1. Manifestaciones Fluidas de los Sistemas Volcánicos y Magmáticos

Hidrotermales 31

2.1.2. Evolución de los Fluidos en los Sistemas Volcánicos y Magmáticos



hidrotermales	32
2.1.3. Elementos de un Sistema Geotérmico.....	34
2.1.4. Tipos de Sistemas Geotérmicos	38
2.1.5. Características de los Fluidos Geotérmicos Relacionados a Volcanismo.....	40
2.2. MANIFESTACIONES GEOTÉRMICAS.....	42
2.3. ORIGEN DE LOS FLUIDOS GEOTÉRMICOS	46
2.3.1. Aguas Meteóricas	46
2.3.2. Aguas Magmáticas	47
2.3.3. Aguas de Formación.....	47
2.3.4. Aguas Fósiles.	48
2.4. MECANISMOS DE SURGENCIA DE LOS FLUIDOS GEOTÉRMICOS	48
2.5. PLAY GEOTÉRMICO	49
2.5.1. Play de Convección Dominante	50
2.5.2. Play de Tipo de Dominio Extensional.....	53
2.5.3. Play de Conducción Dominante	54
2.6. RELACIÓN AGUA/ROCA Y EL TIEMPO DE RESIDENCIA DE LOS FLUIDOS.....	56
2.7. ALTERACIÓN HIDROTERMAL RELACIONADA A SISTEMAS GEOTÉRMICOS.....	59
2.8. RELACIÓN DE LAS FUENTES TERMALES, FALLAS Y ZONAS DE ALTERACIÓN	61
2.9. GEOQUÍMICA DE LAS FUENTES TERMALES.....	62
2.9.1. Clasificación de las Aguas Termales en Función de su Composición.....	64
2.9.2. Química de las Aguas Termominerales	66
2.9.3. Representación de Datos Hidroquímicos	67
2.10. AGUAS TERMALES	70



2.10.1. Historia de Aguas Minero Medicinales en el Perú.....	70
2.11. CONTAMINACIÓN AMBIENTAL.....	72
2.11.1. Tipos de contaminación ambiental.....	72
2.12. METALES PESADOS	73
2.13. CALIDAD DEL AGUA.....	75
2.14. PARÁMETROS FÍSICO QUÍMICOS.....	76
2.15. ELEMENTOS QUÍMICOS QUE INFLUYEN EN LA UTILIZACIÓN DE LAS AGUAS.....	80
2.16. PARÁMETROS QUÍMICOS QUE INFLUYEN EN LA UTILIZACIÓN DE LAS AGUAS	83
2.16.1. Arsénico (As)	84
2.16.2. Plomo (pb).....	86
2.16.3. Cadmio(cd).....	88
2.16.4. Antimonio (Sb).....	89
2.17. NORMATIVIDAD LEGAL VIGENTE.....	90
2.17.1. Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM	90
2.17.2. Categorías de los Estándares de Calidad Ambiental para Agua	91
2.18. APROVECHAMIENTO DE LAS AGUAS TERMALES	98
2.18.1. Como Uso Turístico	98
2.18.2. Como Uso de Bebidas	98

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIALES Y EQUIPOS.....	100
3.2. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	100
3.2.1. Precampo	101
3.2.2. Campo	101
3.2.3. Postcampo	103



3.3. SOFTWARES UTILIZADOS 105

CAPÍTULO IV

CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.1. UBICACIÓN 107

4.1.1. Ubicación Política 107

4.1.2. Ubicación Geográfica..... 107

4.2. ACCESIBILIDAD 108

4.3. ASPECTOS CLIMÁTICOS 108

4.3.1. Temperatura 108

4.3.2. Precipitación..... 108

4.3.3. Humedad 108

4.3.4. Vientos 109

4.4. FAUNA Y FLORA..... 109

4.4.1. Fauna. 109

4.4.2. Flora 111

4.5. ASPECTO SOCIAL 113

4.6. GEOLOGÍA REGIONAL 115

4.6.1. Formación Arcurquina (Kis-ar)..... 115

4.6.2. Grupo Puno (P-pu) 115

4.6.3. Grupo Tacaza (PN-ta) 118

4.6.4. Grupo Palca (Nm-pa) 122

4.6.5. Grupo Maure (Nm-ma) 124

4.6.6. Grupo Sillapaca (Nm-si) 124

4.6.7. Depósitos Cuaternarios 127

4.6.8. Rocas intrusivas y subvolcánicas 127

4.7. ESTRATIGRAFIA 130

4.8. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL 131



4.8.1. Sistema de Fallas	131
4.9. GEOMORFOLOGÍA	132
4.9.1. Sistema Montañoso	132
4.9.2. Sistema Fluvial	134
4.9.3. Sistema Glaciar	137
4.9.4. Sistema Volcánico	139
4.9.5. Sistema Antrópico	140
4.10. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LAS FORMACIONES GEOLÓGICAS	143
4.11. CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS GEOTÉRMICAS.....	145
4.11.1. Caracterización de Aguas Calientes	145
4.10.2. Caracterización de Jaraña	153
4.10.3. Caracterización de Jarpaña	160
CAPÍTULO V	
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
5.1. CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DE LAS AGUAS TERMALES Y LOS CUERPOS RECEPTORES (RÍOS).....	166
5.1.1 Ubicación de las Estaciones de Muestreo	166
5.1.2. Descripción de las Estaciones de Muestreo	166
5.1.3. Temperatura de las Estaciones de Muestreo	175
5.1.4. Características Físico - Químicas de las fuentes termales (Aguas Calientes, Jaraña y Jarpaña) y sus cuerpos receptores (ríos).....	176
5.2. CONTAMINACIÓN NATURAL POR CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EN LAS FUENTES TERMALES Y EN LOS CUERPOS RECEPTORES (RÍOS).....	187
5.2.1. Resultados de Laboratorio por ICP-OES de Las Fuentes Termales y Los Cuerpos Receptores.	187



5.3. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DEL CAMPO GEOTERMAL...	190
5.3.1. Geología Local o Formaciones Geológicas	190
5.3.2. Estructuras Geológicas	192
5.3.3. Caracterización Hidrogeológica	193
VI. CONCLUSIONES.....	195
VII. RECOMENDACIONES	196
VIII. REFERENCIAS	197
ANEXOS	203

Área : Geología Regional

Tema : Contaminación Natural de Metales Pesados

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 03 de setiembre del 2021.



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Patrón mundial de placas, crestas oceánicas, trincheras oceánicas, zonas de subducción y campos geotérmicos..	31
Figura 2. Sección transversal esquemática que muestra intrusiones subvolcánicas poco profundas un estrato volcán asociado y los ambientes deducidos para la formación de pórfidos.....	33
Figura 3. Representación esquemática de http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/16676 un sistema geotérmico ideal.	35
Figura 4. Modelo conceptual de un sistema dinámico con intercambio de masa y energía	36
Figura 5. Comparación entre una olla de presión y un modelo de un campo geotérmico	37
Figura 6. Modelo de un sistema geotérmico.....	38
Figura 7. Fumarolas, laguna de aguas termales y volcán de fango	43
Figura 8. Esquema del origen meteórico de las aguas termales	47
Figura 9. Esquema del origen mixto de las aguas termales	48
Figura 10. Ejemplos de un play activo o de intrusión magmática reciente	51
Figura 11. Ejemplos de un play de intrusión magmática extinta.....	53
Figura 12. Play de tipo de dominio extensional	54
Figura 13. Configuración típica de una cuenca sedimentaria intracratónica con varias depresiones o subcuencas	55
Figura 14. Estructura típica de conducción térmica (isotermas rojas), rutas de flujo del agua subterránea, y temperaturas de descarga.....	55
Figura 15. Los controles geológicos sobre la temperatura en un tipo de play de basamento de roca	56
Figura 16. Asociaciones de minerales de alteración comunes en sistemas hidrotermales	60
Figura 17. Resumen generalizado de la gama de temperaturas en las que aparecen minerales de alteración.	61
Figura 18. Diagrama de Piper Hill Langelier	68
Figura 19. Diagrama de Stiff	69
Figura 20. Ciclo geoquímico general de los metales pesados.	75



Figura 22. Esquema de la metodología de trabajo.....	105
Figura 23. Se muestra a una pareja de huallatas.	109
Figura 24. Se visualiza a una gran cantidad de alpacas que se alimentan en los bofedales.....	110
Figura 25. Vista de pajonales en toda la llanura.	111
Figura 26. Bofedales y en la parte derecha de la misma se observa a las aguas termales de Aguas Calientes.	112
Figura 27. Pinco Pinco.....	112
Figura 28. Yareta	112
Figura 29. Mina ubicada en el lugar denominado Antaña.....	113
Figura 30. Vista del lugar denominado como Antaña, en la parte izquierda se observa el campamento que los pobladores que se dedican a la extracción de Au han construido.	114
Figura 31. Vista de Au, que los pobladores obtienen.	114
Figura 32. Vista del tambo de Pinaya.	114
Figura 33. Vista EW se aprecia la intercalación de areniscas y conglomerados correspondientes al Grupo Puno.....	116
Figura 34. Vista EW donde se visualiza el espesor de los estratos de areniscas(arcosas) y conglomerados polimícticos.	116
Figura 35. Vista SW-NE se observa presencia de vetillas de calcita que cruzan los estratos de arcosa como los estratos de los conglomerados polimícticos.	117
Figura 36. Vista NW – SE secuencias de areniscas verdes y rojas intercaladas con conglomerados.....	117
Figura 37. Muestra de mano de conglomerado	118
Figura 38. Muestra de mano de arcosa	118
Figura 39. Vista WE (Vista al norte de Pinaya) se muestra a la falla inversa que divide al grupo Puno y al Grupo Tacaza	119
Figura 40. Vista WE se observa la otra falla inversa que divide de igual manera al Grupo Tacaza y al Grupo Puno.	120
Figura 41. Vista SE NW del cerro Santiane en donde se observa dos contactos que dividen al Grupo Tacaza, Grupo Palca y al Grupo Sillapaca.	120
Figura 42. Muestra de mano de andesita silicificada.....	121
Figura 43. Muestra de mano de andesita	121



Figura 44. Muestra de mano de roca andesita porfirítica	122
Figura 45. Vista del SW al NE del cerro Ichocollo, se observa el contacto que existe entre el grupo Palca y el Grupo Tacaza.....	123
Figura 46. Vista del SW al NE del cerro Sillapaca donde se visualiza el contacto entre el Grupo Sillapaca y el Grupo Tacaza.....	124
Figura 47. Vista del NW al SE de la cordillera del Sillapaca (Grupo Sillapaca)	125
Figura 48. Vista del SE al NW del cerro Santiane se observa el contacto entre el Grupo Palca y el Grupo Sillapaca.....	126
Figura 49. Vista SE al NW del cerro Tacleoco se observa el diaclasamiento conocido como disyunción columnar.....	126
Figura 50. Muestra de mano de andesita porfirítica	127
Figura 51. Vista SW NE donde se visualiza el C.P. Pinaya y los depósitos cuaternarios glaciares	127
Figura 52. Muestra de mano de andesita	128
Figura 53. Vista SN del domo volcánico.....	129
Figura 54. Vista SW NE se observa al Grupo Tacaza y la intrusión de un cuerpo ígneo	129
Figura 55. Vista de la granodiorita rosa in situ.....	130
Figura 56. Muestra de mano de granodiorita.....	130
Figura 57. Columna estratigráfica del área de estudio a escala regional.....	131
Figura 58. Vista NS donde se observa a la cordillera del Sillapaca y colinas altas que lo acompañan.....	133
Figura 59. Vista SW al NE se observa a las aguas termales denominada “Jarpaña” rodeado de colinas altas y medias.....	133
Figura 60. Vista WE se observa un cauce fluvial rodeado de colinas medias.....	134
Figura 61. Vista NS se observa a la cordillera del Sillapaca, así mismo se observa a las aguas termales denominadas “Aguas Calientes” y en la llanura se observa los bofedales.	135
Figura 62. (A)Vista del río Taquipunco) (B) Vista desde otra perspectiva del río Taquipunco (C)Vista del río Pacaje (D)Vista del río Jallpamayo	135
Figura 63. Vista WE se observa a la terraza aluvial.	136
Figura 64. Vista WE se observa a una Llanura aluvial, con terrazas aluviales rodeados de colinas altas.....	136
Figura 65. Valle “V” rodeado de colinas altas y colinas medias.....	137



Figura 66. Valle “V” acompañado de colinas medias.	137
Figura 67. Valle en "U" “ubicado a cercanías de las aguas termales de Aguas Calientes.	138
Figura 68. Valle en "U" ubicado en Jaraña.....	138
Figura 69. Morrenas glaciares, los cuales ocupan grandes extensiones de terreno... ..	139
Figura 70. Domo Volcánico ubicado a espaldas del C.P. Pinaya.....	140
Figura 71. Zona urbana del C.P. Pinaya y al fondo se observa una colina media.....	141
Figura 72. Cantera de toba, que se usan para la reparación de las carreteras.	141
Figura 73. Vista al fondo de manifestaciones termales y su evaporación	146
Figura 74. Manifestaciones geotermales en la zona de Pinaya.	146
Figura 75. Vista al fondo de manifestaciones termales y su evaporación.....	147
Figura 76. Las manifestaciones termales presentan una orientación NW.....	147
Figura 77. Plano de falla con estrías, en lavas afaníticas rojizas.....	148
Figura 78. Plano de la falla con una cinemática sinistral, normal.	148
Figura 79. Sínter reciente de Aguas Calientes.....	149
Figura 80. Muestra de mano de sínter	149
Figura 81. Muestra de mano de sínter blanquecino.....	150
Figura 82. Pinaya I Denominada así en función de su tamaño al ser la más pequeña de las fuentes termales perteneciente a aguas calientes	150
Figura 83. Pinaya II, es una fuente que tiene forma de piscina amorfa que es somera y su temperatura es de 80 C°.	151
Figura 84. Pinaya III, tiene aspecto de piscina con una temperatura, lo de color naranja son óxidos.....	151
Figura 85. Pinaya IV es la más grande fuente termal de Aguas Calientes	152
Figura 86. Piscina rústica de concreto, ubicado en Aguas Calientes.....	153
Figura 87. Manifestaciones geotermales en la zona de Jaraña.	154
Figura 88. Vista de Jaraña I Y Jaraña II ambas fuentes termales son pequeñas y se encuentran situadas dentro del Valle en “U”.....	156
Figura 89. Vista de Jaraña III, se observa la evaporación de la fuente termal.	156
Figura 90. Jaraña IV, al fondo se observan capas de lavas andesíticas con silicificación.....	157
Figura 91. Vista de Jaraña V, se localiza a lado de la carretera.....	157
Figura 92. Vista de Jaraña VI y Jaraña VII, el sínter que poseen ambas fuentes termales es mínimo.....	158



Figura 93. Piscina rústica de concreto, ubicado en Jaraña	158
Figura 94. Manifestaciones geotermales en la zona de Chupahuito.....	159
Figura 95. Vista SN de las manifestaciones geotermales en la zona de Chupahuito.	159
Figura 96. Vista de Jarpaña I, se observa la presencia de sínter.....	161
Figura 97. Vista de Jarpaña II en donde se observa que es una fuente termal muy pequeña.....	162
Figura 98. Vista de Jarpaña III, alrededor se tiene la presencia de precipitaciones de sínter antiguos.....	162
Figura 99. Vista de Jarpaña IV, se observa la presencia de óxidos de Fe.	163
Figura 100. Vista de cerca de Jarpaña IV.....	163
Figura 101. Vista de Jarpaña V, al fondo se observa al Grupo Tacaza, Palca y Sillapaca.	164
Figura 102. Vista de cerca de Jarpaña V, en donde claramente se observa que la temperatura es mucho menor en comparación de Aguas Calientes y Jaraña.	164
Figura 103. Las precipitaciones de sínter calcáreo antiguos	165
Figura 104. Estación de muestreo de la muestra M1, localizado en Aguas Calientes.	167
Figura 105. Estación de muestreo de la muestra M2 localizado en el río Sillihuirí, el cual es proveniente de los nevados de la cordillera del Sillapaca.	168
Figura 106. Estación de muestreo de la muestra MP-001(M4), perteneciente a una fuente termal en la zona de Aguas Calientes.....	168
Figura 107. Estación de muestreo de la muestra MP-002(M5) localizado en el río Taquipunco	169
Figura 108. Se muestra la forma en cómo se obtuvo la muestra.....	170
Figura 109. Estación de muestreo de la muestra M6, esta muestra se tomó del caño de una vivienda del C.P. de Pinaya.	170
Figura 110. Estación de muestreo MJ-001.	171
Figura 111. (A)Se muestra a la fuente termal donde se realizó el muestreo (B)Se muestra cómo se realizó la toma de la temperatura de dicha fuente, de manera similar se realizó en las otras.	171
Figura 112. Estación de muestreo de la muestra MJ-002.....	172
Figura 113. Estación de muestreo de la muestra MJ-003.....	173
Figura 114. Estación de muestreo de la muestra MJ-004.....	174



Figura 115. (A) Se observa a la fuente termal, que es pequeña, así mismo se observa las botellas donde se almacenaron las muestras.	174
Figura 116. Estación de muestreo de la muestra MJ-005 debajo del puente.....	175
Figura 117. Vista de cerca del río Jallpamayo.....	175
Figura 118. Diagrama de Piper con las estaciones de muestreo ploteadas.....	182
Figura 119. Diagrama de Stiff con las estaciones de muestreo ploteadas.	183
Figura 120. Diagrama de Schoeller - Berkaloff, presenta las concentraciones de iones de las estaciones muestreadas.....	185
Figura 121. Diagrama de Wilcox con las estaciones de muestreo ploteadas.	186
Figura 122. Diagrama de Riverside con las estaciones de muestreo ploteadas.....	187



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Valores límites máximos permisibles de los parámetros químicos establecidos, tanto para el consumo humano como para baños termales. ...	84
Tabla 2.	Subcategoría B: Aguas superficiales destinadas para recreación.	95
Tabla 3.	Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales.....	96
Tabla 4.	Equipos y Materiales Para el Desarrollo del Proyecto.....	100
Tabla 5.	Ubicación Política del área de estudio.	107
Tabla 6.	Ubicación Geográfica del área de estudio.	107
Tabla 7.	Accesibilidad al área de estudio.....	108
Tabla 8.	Unidades Geomorfológicas.....	142
Tabla 9.	Ubicación de las estaciones de muestreo de las aguas termales.	166
Tabla 10.	Ubicación de las estaciones de muestreo de los cuerpos receptores.	166
Tabla 11.	Temperaturas de los sitios de muestreo.	176
Tabla 12.	Parámetros fisicoquímicos de las fuentes termales, obtenidos del laboratorio de aguas del INIA - PUNO.	178
Tabla 13.	Parámetros fisicoquímicos de los cuerpos receptores (ríos), obtenidos del laboratorio de aguas del INIA - PUNO.....	179
Tabla 14.	Resultados “Pruebas de laboratorio de análisis de calidad de agua (ICP-OES)”.....	188



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

WGS84	: World Geodetic System 84
UTM	: Universal Transverse Mercator (Sistema de coordenadas universal transversal de Mercator).
GIS	: Geographic Information System (Sistema de información geográfica).
ICP-OES	: Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (Espectroscopia de Emisión de Plasma Óptica Inductivamente Conectada).
WHO(OMS)	: World Health Organization (organización mundial de la salud)
MINAM	: Ministerio del ambiente
EIA	: Evaluación del impacto ambiental
D.S.	: Decreto supremo
ECA	: Estándares de calidad ambiental.
LMP	: Límites máximos permisibles
LAS	: Laboratorios Analíticos del Sur
INGEMMET	: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico
SENAMHI	: Servicio Nacional de Meteorología e hidrología del Perú.
DIRCERTUR	: Dirección Regional de Comercio Exterior y Turismo
DO	: Oxígeno disuelto
Ph	: Potencial de hidrogeniones
°C	: Grados centígrados
Atm	: Atmosfera
Sal	: Salinidad
ORP	: Capacidad de reducción del oxígeno
TDS	: Sólidos disueltos totales
LAS	: Laboratorios Analíticos del Sur
EPP	: Equipo de protección personal
Ha	: Hectáreas
Km	: Kilometro
Und	: Unidad



μS	: Microsiemens
mg/L	: Miligramos por Litro
ed.	: Edición.
s.f	: Sin fecha.
p. (pp.)	: Página (páginas)
núm	: Número
et al.	: Proviene del latín <i>et allis</i> (y otros)
SW	: Suroeste
NW	: Noroeste
SE	: Sureste
NE	: Noreste
As	: Arsénico
Pb	: Plomo
Cd	: Cadmio
Sb	: Antimonio
Li	: Litio
Br	: Bromo
Cl	: Cloro
Ag	: Plata
Au	: Oro
Cu	: Cobre
Zn	: Zinc
V	: Vanadio
Na	: Sodio
K	: Potasio
Mg	: Magnesio
Cr	: Cromo
Mg	: Manganeso
Hg	: Mercurio
B	: Boro



RESUMEN

El campo geotermal de Pinaya está ubicado en el altiplano de los Andes a 3.5 km del centro poblado menor de Pinaya, distrito de Santa Lucia, provincia de Lampa en el Departamento de Puno, a una altitud de 4,400 m.s.n.m. Las fuentes termales en el Perú constituyen un recurso invaluable, se les da diferentes usos como balnearios, aguas medicinales y fuentes de energía geotérmica. Sin embargo, antes de ser usados para tales fines se debe realizar un estudio de calidad de aguas. El objetivo fue determinar las características fisicoquímicas, la presencia de contaminación natural por concentración de metales pesados en las fuentes termales, cuerpos receptores (ríos) y definir las características geológicas que presenta el campo geotermal de Pinaya. La metodología consistió en analizar las propiedades fisicoquímicas, se realizó análisis por ICP-OES en los laboratorios del Sur. De acuerdo a las características fisicoquímicas la zona de Aguas Calientes y Jaraña son clasificadas como aguas hipertermales, Jaraña como aguas frías. Las muestras MJ-004 y MJ-002 poseen un pH ácido 6,6 y 4,8 respectivamente, las demás muestras son consideradas como básicas. De acuerdo a la conductividad eléctrica las aguas de las fuentes termales poseen una mayor salinidad que los cuerpos receptores. Existe contaminación natural por As, B, Li, Fe y Al se superan los límites permisibles para la categoría 1 (B1) contacto primario, para la categoría 3 (D1) riego de vegetales y (D2) bebidas de animales. Las aguas termales son de origen meteórico asociado a un sistema de fallas del corredor Cusco - Lagunillas - Mañazo; los fluidos circulan por diferentes litologías, rocas sedimentarias, rocas ígneas como andesitas, tobas, secuencias volcanoclásticas, lavas andesíticas basálticas y granodioritas.

Palabras Clave: Contaminación natural, Hidrogeoquímica, Fuente geotermal, Metales pesados, Pinaya.



ABSTRACT

The Pinaya geothermal field is located in the high plateau of the Andes 3.5 km from the smaller town of Pinaya, district of Santa Lucia, province of Lampa in the Department of Puno, at an altitude of 4,400 meters above sea level. The hot springs in Peru are an invaluable resource, they are given different uses such as spas, medicinal waters and geothermal energy sources. However, before being used for such purposes, a water quality study must be carried out. The objective was to determine the physicochemical characteristics, the presence of natural contamination due to the concentration of heavy metals in hot springs, receiving bodies (rivers) and to define the geological characteristics of the Pinaya geothermal field. The methodology consisted of analyzing the physicochemical properties, analysis by ICP-OES was carried out in the laboratories of the South. According to the physicochemical characteristics, the Aguas Calientes and Jaraña areas are classified as hyperthermal waters, Jaraña as cold waters. The samples MJ-004 and MJ-002 have an acidic pH of 6.6 and 4.8 respectively, the other samples are considered basic. According to the electrical conductivity, the waters of the thermal springs have a higher salinity than the receiving bodies. There is natural contamination by As, B, Li, Fe and Al, the permissible limits for category 1 (B1) primary contact, for category 3 (D1) irrigation of vegetables and (D2) animal beverages are exceeded. The hot springs are of meteoric origin associated with a fault system of the Cusco - Lagunillas - Mañazo corridor; The fluids circulate through different lithologies, sedimentary rocks, igneous rocks such as andesites, tuffs, volcanoclastic sequences, basaltic andesitic lavas and granodiorites.

Key Words: Natural Pollution, Hydrogeochemistry, Geothermal Source, Heavy Metals, Pinaya.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Las fuentes termales viéndose siendo utilizadas por la humanidad desde épocas muy antiguas, teniendo así a los romanos quienes fueron una de las civilizaciones que más las utilizaron, existe evidencia de ello en Italia y España.

En el Perú, el uso de las aguas termales y minerales se remonta desde el siglo XVII, el vestigio de uso más antiguo y conocido es el caso de las fuentes de Baños del Inca en Cajamarca, antiguamente llamados Baños de Pultamarca (lugar caliente). Nombre dado porque en esas fuentes el Inca Atahualpa tomaba baños de relajación y recuperación, aunque evidencias históricas indican que hubo un antiguo aprovechamiento del recurso termal desde tiempos Pre-Incas (curacas de la cultura Caxamarca) (MINCETUR, 2005)

Actualmente en el Perú hay unas 589 fuentes de aguas termales, minerales y termo medicinales (Vargas, 2010) con propiedades curativas y relajantes, que brotan desde las profundidades de la tierra, se le reconoce la capacidad de fortalecer la salud, mitigar múltiples males como reumatismo, problemas de bronquios, dolores musculares, enfermedades de la piel y enfermedades cardiovasculares, así también se le atribuye propiedades de relajación.

Sin embargo, no es el caso de todas las fuentes termales del Perú en algunas existe la presencia de elementos perjudiciales para la salud humana como metales pesados que pueden entrar al cuerpo de diferentes maneras, se pueden respirar, comer o absorber a través de la piel. Por su elevada toxicidad, el impacto causado en salud por exposición prolongada o por bio-acumulación de metales pesados resulta alarmante. La intoxicación por metales pesados puede provocar problemas graves de salud, como daño a órganos, cambios de comportamiento y problemas de memoria hasta desarrollos cancerígenos.



Los síntomas específicos y cómo afectan al ser humano depende del tipo de metal y la cantidad del mismo. Por ejemplo, el As es un elemento cancerígeno que afecta a las personas en caso de ser bebido constantemente.

1.1. ANTECEDENTES

Pajuelo et al. (2016) en su artículo de congreso “Características geológicas de la zona geotérmica de Pinaya- región Puno” determinan que La zona geotérmica de Pinaya presenta manifestaciones termales ubicadas en los centros poblados de Pinaya, Atecata, Jaraña-Jarpaña y caserío Collpuyo. Identificándose así que las aguas termales de Pinaya y Jaraña ubicadas a 6 y 4 km de la falla Sillapaca presentan una mayor temperatura superficial, que a la vez circulan por las rocas del Grupo Puno y Tacaza, en una zona transtensiva.

Por otro lado, las zonas geotermales de Atecata (37°C) y Jarpaña (50°C) se encuentran ubicados a 8 y 6 km en los bordes distales a la Cordillera Sillapaca y dominados por esfuerzos transpresivos. Así mismo en Atecata, los fluidos circulan por rocas de la Formación Hualhuani y Grupo Puno cortadas por rocas intrusivas. En Jarpaña, circulan por medio de rocas del Grupo Palca y Sillapaca, cortados por unidades subvolcánicas.

Los fluidos transportan información de las rocas ubicadas en profundidad, en el caso de Jaraña las precipitaciones de sínter contienen elementos de Ag, Cu, Pb, As, Pb, Sn y Fe, permite conocer que el agua en profundidad circuló por zonas dominadas por estos elementos. En el caso de las rocas con sílice pervasiva ubicadas en la falla Lagunillas son evidencia de la circulación de fluidos magmáticos, en Atecata presentan elementos de Cu y Mo de acuerdo a los resultados de rayos X, registrando zonas mineralizadas cercanas a la falla.

Cruz & Matsuda (2014) en su paper denominado “Estudio geoquímico de las



fuentes termales de la zona geotermal de Pinaya, Santa Lucia (Puno)”. En dicho estudio realizaron la caracterización geoquímica de las aguas termales de la ZGP, indican que son de tipo clorurada sulfatada-alcalina. Así mismo se indica que el reservorio geotérmico posiblemente se encuentra sobre y alrededor de un cuerpo intrusivo asociado posiblemente al complejo intrusivo Pinaya controlado por el sistema de fallas Cusco-Lagunillas de dirección NO-SE. Por otro lado, la geotermometría química en fase líquida y el modelo de mezcla, permitió estimar la temperatura en profundidad menores a 200°C.

Mamani (2019) en su tesis denominada “Relación entre el consumo de agua potable con niveles altos de metales pesados (Plomo, Cadmio, Aluminio) con aspectos clínicos de la gingivitis en niños de 6 a 12 años atendidos en el Puesto de Salud de Calana – Tacna. 2018”.

Donde se determinó la relación entre el consumo de agua potable con altos niveles de metales pesados (plomo, cadmio y aluminio) con aspectos clínicos de la gingivitis en niños de 6 a 12 años de edad atendidos en el Puesto de salud del distrito de Calana provincia de Tacna. Se realizó un estudio correlacional. Previamente se estableció el agua potable con niveles altos de metales pesados, finalmente fueron seleccionados los pacientes con el criterio de inclusión y exclusión a un examen intrabucal, evaluando la presencia de los aspectos clínicos de la gingivitis. Resultados: De los 93 niños examinados los aspectos de la gingivitis fueron color ($p=0,020$), tamaño ($p=0,033$) forma ($p=0,796$) consistencia ($p=0,352$) y sangrado ($p=0,769$) Conclusión: Entre los aspectos clínicos de la gingivitis, el color y tamaño tienen una relación altamente significativa con el consumo de agua potable con niveles altos de metales pesados (plomo, cadmio y aluminio).

Barraza (2017) en su tesis de investigación “Geología y contaminación por fuentes hidrotermales: caso río Ollachea – Carabaya – Puno” en donde determinó que las



condiciones geológicas del área de estudio indudablemente juegan un papel importante para el afloramiento de las fuentes termales y sobre todo en el contenido mineralógico que estas aguas tienen, ya que la roca de la formación Ananea en esta zona se encuentra mineralizada, con bastante presencia de sulfuros portadores de metales pesados, la descarga de las fuentes termales Quinsa mayo, Piscina municipal y Ccollpapampa, no altera las características del cuerpo receptor (Río Ollachea) ya que el caudal del río Ollachea es muy superior al caudal de las fuentes termales.

Apaza & Calcina (2014) en su artículo de investigación “Contaminación natural de aguas subterráneas por arsénico en la zona de Carancas y Huata, Puno” determinan que la ocurrencia de arsénico en aguas subterráneas, está relacionado a dos condiciones fisicoquímicas que explican la movilidad del arsénico disuelto total (As) en función con el oxígeno disuelto (OD). Evidencian que a valores altos de OD se presentan altas concentraciones de arsénico, esta relación directa muestra condiciones oxidantes debido a la poca profundidad de la superficie freática donde el oxígeno disuelto está presente relativamente en mayor concentración.

Yorio & Muzio (2013) en su paper, “Contaminación de las fuentes de agua y sus efectos en el sistema nervioso y la conducta” hace mención que el hidroarsenicismo crónico regional endémico (HACRE) es una enfermedad grave de larga evolución provocada por la presencia en el entorno ambiental de aguas de bebida contaminadas con altas concentraciones de arsénico inorgánico (As). Llamada también arsenicosis, en Argentina fue conocida inicialmente como Enfermedad de Bell Ville. Esta enfermedad se caracteriza por presentar, luego de un período variable de exposición, lesiones en la piel y distintas alteraciones sistémicas, generando en algunos casos distintos tipos de cáncer. Estudios recientes han demostrado que la población infantil expuesta durante el período prenatal y posnatal puede tener menor desempeño neuro-conductual que los niños



no expuestos.

Fluquer & Otto (2006) en su artículo “Hidrogeología de las fuentes termales de Cajamarca y Churín para el desarrollo de las aguas termales y minerales” después de hacer la Geología de Cajamarca y Churín, hacen constar que las fuentes termales y minerales en Baños del Inca – Cajamarca incluyen dos grupos de fuentes, Tragadero y Perolitos, el ambiente donde se forman son areniscas cuarzosas del acuífero Chimú, los elementos geológicos estructurales condicionan la surgencia de las fuentes termales y minerales.

Hacen un tratamiento hidroquímico de las fuentes termales de Cajamarca y Churín, de las cuales concluyen que estas aguas son aptas para el uso en hidroterapias, balneología, para el tratamiento de enfermedades tales como artritis reumática, enfermedades neurológicas, las del sistema locomotor, enfermedades de la piel, incluso cardiovascular.

Yupanqui (2006) a través del trabajo de tesis denominado, “Análisis fisicoquímico de fuentes de aguas termominerales del Callejón de Huaylas” donde estudió numerosas fuentes termominerales, entre ellas El Pato (Huaylas), La Merced (Carhuaz), Chancos (Carhuaz) y Monterrey (Huaraz) llegó a determinar la presencia de metales pesados tales como litio, plomo, manganeso, arsénico, cadmio, plata, aluminio, hierro, cobre, cobalto, zinc, calcio, potasio, sodio en concentraciones mínimas, sin registrar la presencia de mercurio, definiendo así que son aguas medicinales. Así mismo hace mención que las propiedades medicinales de estas aguas pueden complementarse con las características paisajísticas y climáticas del Callejón de Huaylas, pudiendo ofrecerse como importantes centros turísticos de salud termal.

Valenzuela (2003) en el boletín N° 25 titulado “Aguas termales en el oriente central del Perú” en donde se determinó que la zona Sur del Perú es la que cuenta con

mayores potencialidades de fuentes termales, minerales y termomedicinales. La razón de la misma es el tectonismo activo por la subducción de la placa de nazca que provoca altos flujos de calor, al encontrarse material cuaternario con grandes potencias hace que actúen como acuíferos y albergan aguas frías. Aguas calientes se encuentra ubicado en el sector IV en donde se menciona que por su cercanía debería ser usada como baños termales locales y turísticos, además que las aguas cuentan con adecuadas temperaturas.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Hoy en día los problemas ambientales son de mucha relevancia, es por ello que muchas instituciones públicas y privadas estudian el caso y ven su remediación; en el Perú se tiene la presencia de una gran cantidad de fuentes termales esto en el norte, centro y sur del Perú, la temperatura y la composición de las mismas es variable dependiendo de distintos factores, el uso que se les da es variable pudiendo ser usado como balnearios y como fuente de energía geotérmica principalmente. Sin embargo, antes de ser usados para tales fines como el uso de balnearios, deben ser analizadas químicamente y físicamente, así como también se debe identificar si en ellas se tiene la presencia de metales tóxicos para la salud de las personas, estos estudios nos permiten asegurar la calidad de las aguas, es importante conocer su composición. Ya que muchos de los mismos, llegan a ser recepcionadas por ríos cercanos.

La zona a estudiar es el campo geotermal de Pinaya (CGP) donde se plantean las siguientes interrogantes:

1.1.1. Problema General

¿Qué características físico-químicas presentan las aguas termales y los cuerpos receptores (ríos), existe la presencia de contaminación natural y cuál es la geología del campo geotermal de Pinaya?

1.1.2. Problema Específico



- ¿Qué características físico-químicas presentan las aguas termales y los cuerpos receptores (ríos)?
- ¿Existe contaminación natural por concentración de metales pesados en las fuentes geotermales y en los cuerpos receptores (ríos)?
- ¿Cuál es la geología del campo geotermal de Pinaya?

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Objetivo General

Determinar las características fisicoquímicas, la presencia de contaminación natural por concentración de metales pesados en las fuentes termales, cuerpos receptores (ríos) y definir las características geológicas que presenta el campo geotermal de Pinaya.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar las características fisicoquímicas de las fuentes termales y los cuerpos receptores (ríos).
- Identificar la presencia de contaminación natural por concentración de metales pesados en las fuentes termales y en los cuerpos receptores (ríos).
- Definir las características geológicas del campo geotermal de Pinaya.

1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Las fuentes termales en el Perú y en nuestra región, constituyen un invaluable recurso desde el punto de vista turístico, económico y social. Actualmente no se cuenta con un estudio de calidad de las aguas termales del campo geotermal de Pinaya, que pueda garantizar el uso con fines recreacionales, es sumamente necesario realizar una evaluación de la calidad de aguas, que permita conocer los parámetros fisicoquímicos de este cuerpo de agua, y principalmente determinar las concentraciones de metales pesados en las fuentes termales así como también realizar los mismos estudios en los cuerpos



receptores de las fuentes geotermales (ríos) ya que estas aguas son usadas para el consumo de animales, así mismo se usa con fines agrícolas.

Los metales pesados pueden clasificarse en dos grupos. El primero, al que pertenecen elementos como Cu, Zn y Cr $3+$, incluye aquellos requeridos por el organismo en dosis moderadas, pero que pasan a ser tóxicos al superar cierto umbral de concentración. El segundo grupo está constituido por aquellos metales que no tienen un rol biológico conocido, pero sí una clara toxicidad (pese a lo cual han sido utilizados en farmacología). A él pertenecen, entre otros, As, Cd, Hg y Pb, junto con el Cr $+6$. Los mismos ingresan al cuerpo humano por vía respiratoria (vapores de las fuentes termales), cutánea (uso de las pozas termales) e ingesta (por la cocción de huevos en las fuentes geotermales).

El problema de la contaminación del medio ambiente por metales pesados, es que su efecto es silencioso, no se ve, y cuando nos damos cuenta del daño que producen, ya es tarde,

también contaminan el agua de las quebradas, ríos y los cultivos, así mismo al encontrarse en altas concentraciones que superen los límites permisibles, son peligrosas para la salud y afectan diferentes órganos del cuerpo.

Cada metal y cada elemento químico contaminante tienen un mecanismo de acción y un lugar de acumulación preferido. El más conocido es el plomo que afecta varios sistemas, por ejemplo, en el sistema nervioso llega a dañar a las neuronas especialmente las del cerebro. Otro metal pesado es el arsénico que afecta a prácticamente todos los aparatos y sistemas del cuerpo, puesto que interfiere con reacciones enzimáticas de amplia distribución. Así mismo el As puede provocar cáncer en pulmón y piel, e inclusive puede causar otros tipos de cáncer; el Hg se puede almacenar en el cerebro y en el tracto intestinal, la inhalación de vapor de mercurio produce una alta absorción en los



alveolos de los pulmones, una vez disuelto en la sangre se oxida y se asocia a los glóbulos rojos, también se han reportado, en mujeres ocupacionalmente expuestas al mercurio, complicaciones en el embarazo, en el parto, bebés de bajo peso, disturbios en la menstruación, abortos espontáneos y en el caso de incidencia, malformaciones en el feto, etc.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. SISTEMA GEOTÉRMICO

Los sistemas geotérmicos o también llamados campos geotérmicos son aquellos lugares en la superficie terrestre donde existen ciertas condiciones geológicas que permiten que el calor contenido en el interior de la tierra o magma se encuentren relativamente a bajas profundidades, esto es, entre 5 a 10 km este calor se desplaza por conducción, calentando las formaciones rocosas, las cuales a su vez calientan los depósitos de aguas subterráneas que se encuentran alojadas en ellas, dando lugar a la formación de los sistemas geotérmicos, los cuales, se encuentran a bajas profundidades, esto es, entre 1 a 3 km; estas superficies se sitúan generalmente alrededor de zonas volcánicas activas, ubicadas usualmente en los bordes de las placas tectónicas, debido a que en estos puntos calientes la corteza es más delgada, como se puede observar en la Figura 1; estas zonas también se caracterizan por una intensa actividad sísmica y numerosas manifestaciones termales, es por ello, que la Costa del Pacífico es conocida como Anillo de Fuego por su gran cantidad de volcanes, son zonas privilegiadas para el desarrollo de la geotermia (Bruni, 2014).

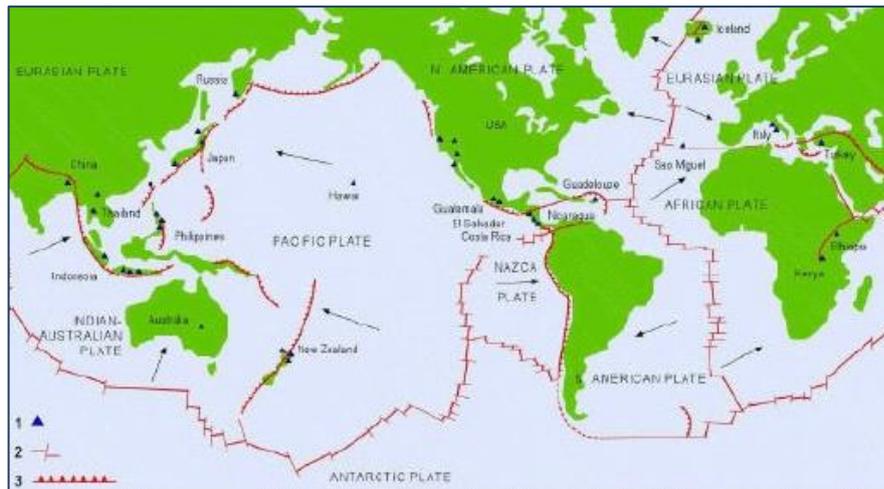


Figura 1. Patrón mundial de placas, crestas oceánicas, trincheras oceánicas, zonas de subducción y campos geotérmicos. Las flechas muestran la dirección del movimiento de las placas hacia las zonas de subducción (Bruni, 2014).

2.1.1. Manifestaciones Fluidas de los Sistemas Volcánicos y Magmáticos

Hidrotermales

Los fluidos magmáticos que ascienden a través de un sistema volcánico activo, comúnmente se mezclan con fluidos meteóricos infiltrados al alcanzar profundidades someras subsuperficiales, otorgándoles una mayor temperatura y desarrollando así un sistema hidrotermal particular con una impronta geoquímica de tipo magmática característica. De esta forma, los sistemas hidrotermales desarrollados en el interior de un edificio volcánico se denominan sistemas volcánicos-hidrotermales (Hochstein y Browne, 2000).

En algunas áreas geotermales, el sistema hidrotermal es alimentado por una fuente de calor magmática como un plutón sepultado en enfriamiento, sin que necesariamente se encuentre involucrado un edificio volcánico, en este caso se los denomina magmático-hidrotermal. Sin embargo, aunque los sistemas volcánicos-hidrotermales han sido identificados como un caso particular de sistemas geotermales magmáticos, con características químicas e isotópicas distintivas de sus fluidos, es importante considerar que en muchas ocasiones se utilizan estas denominaciones como sinónimos (Delmelle.y



Bernard, 2000; Varekamp et al., 2000).

Los sistemas volcánico-hidrotermales están principalmente relacionados con estratovolcanes o calderas recientes y presentan manifestaciones superficiales características relacionadas con la emisión de los fluidos hidrotermales (gases y aguas). Estas manifestaciones, en un esquema ideal están zonadas espacialmente con respecto al centro volcánico de emisión, por ejemplo: En el cráter activo que actúa como centro emisor es común encontrar emisiones gaseosas puntuales denominadas fumarolas o solfataras, y en el caso de contar con un efectivo aporte de agua suelen formarse lagunas cratéricas ácidas y calientes; hacia los flancos del edificio volcánico, es común encontrar emisiones gaseosas puntuales como las antes mencionadas o en forma de gases difusos, muchas veces imperceptibles a la vista, también es común que se generen manifestaciones de vertientes ácidas y calientes (sulfatadas y cloruro-sulfatadas) donde se produce la intersección de la capa freática y la superficie, esta situación en algunos casos menos comunes puede dar lugar a la generación de arroyos ácidos.

2.1.2. Evolución de los Fluidos en los Sistemas Volcánicos y Magmáticos hidrotermales

Cuando un aparato volcánico está en reposo, la mayor parte de la actividad se debe a la circulación de los gases a través del sistema de fracturas, mezclándose con aguas meteóricas o subterráneas originando acuíferos geotérmicos, fumarolas, etcétera. Así, las características químico-físicas de las emisiones de gas y de las aguas termales que observamos en estos ambientes, no son otra cosa que el resultado de una larga serie de interacciones, de tipo sólido-líquido, sólido-gaseoso y líquido-gaseoso, entre los componentes profundos (magmáticos) y superficiales (hidro-atmosféricos). Uno de los principales factores que gobierna los grandes procesos de transformación, desde ambientes profundos hasta someros, metamórficos o metasomáticos, tanto en sistemas

roca dominados como fluidos dominados, es la variable llamada “relación agua/roca o fluido/roca”. Si bien esto fue rigurosamente definido para sistemas cerrados, puede ser aplicado exitosamente en sentido cualitativo considerando los efectos relativos de las fases involucradas, para el mejor entendimiento de la dinámica de los sistemas geológicos (sistemas volcánicos y magmáticos hidrotermales) ver Figura 2 Hedenquist & Lowenstern (1994). De esta manera, el estudio de las manifestaciones de fluidos volcánicos (gases fumarólicos y aguas termales), permite caracterizar el estado del sistema, determinar un patrón de comportamiento geoquímico y dar un aporte invaluable en el seguimiento de los volcanes activos (Giggenbach & Glover, 1992).

Cuando se producen perturbaciones de los sistemas magmáticos hidrotermales, estas se manifiestan generalmente mediante una serie de variaciones en la composición química de los fluidos en ascenso.

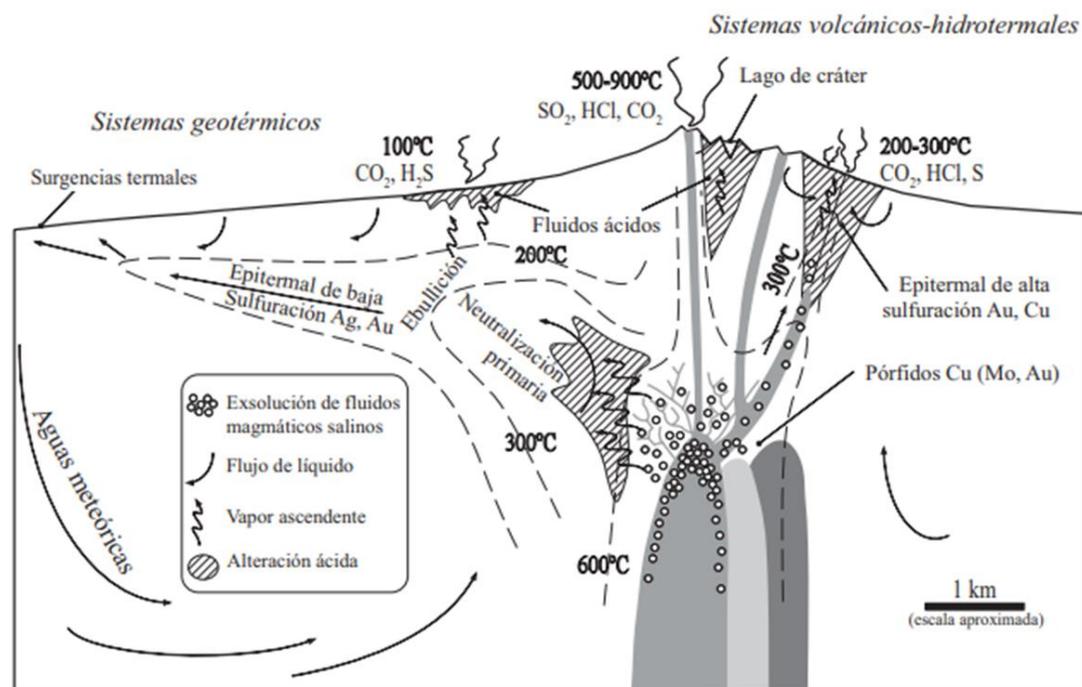


Figura 2. Sección transversal esquemática que muestra intrusiones subvolcánicas poco profundas un estrato volcán asociado y los ambientes deducidos para la formación de pórfidos de Cu y depósitos de mineral de alta y baja sulfuración desde el magma desgasifica d desgasificador hasta las fumarolas térmicas ácidas y los manantiales ,e incorporan el pórfido y/o los yacimientos de alta sulfuración, mientras que los depósitos de baja sulfuración se forman a partir de sistemas geotérmicos caracterizados por aguas



de Ph neutro que pueden descargarse como manantiales termales y géiseres ,como los del parque nacional Yellowstone EE.UU. (Hedenquist & Lowenstern, 1994).

2.1.3. Elementos de un Sistema Geotérmico

Los sistemas geotérmicos se pueden encontrar en regiones con un gradiente geotérmico normal o ligeramente superior al normal, y especialmente en regiones alrededor de los márgenes de la placa donde los gradientes geotérmicos pueden ser significativamente más altos que el valor promedio. En el primer caso, los sistemas se caracterizarán por bajas temperaturas, generalmente no superiores a 100 ° C a profundidades económicas; en el segundo caso, las temperaturas podrían cubrir un amplio rango de bajo a muy alto, e incluso por encima de 400 ° C.

¿Qué es un sistema geotérmico y qué sucede en dicho sistema? Se puede describir esquemáticamente como "convección de agua en la corteza superior de la Tierra, que, en un espacio confinado, transfiere calor de una fuente de calor a un disipador de calor, generalmente la superficie libre Hochstein (1990). Un sistema geotérmico está compuesto por tres elementos principales: Una fuente de calor, un reservorio y un fluido, que es el transportista del calor Dickson & Fanelli (2004). La Figura 3 es una representación simple de un sistema geotérmico ideal.

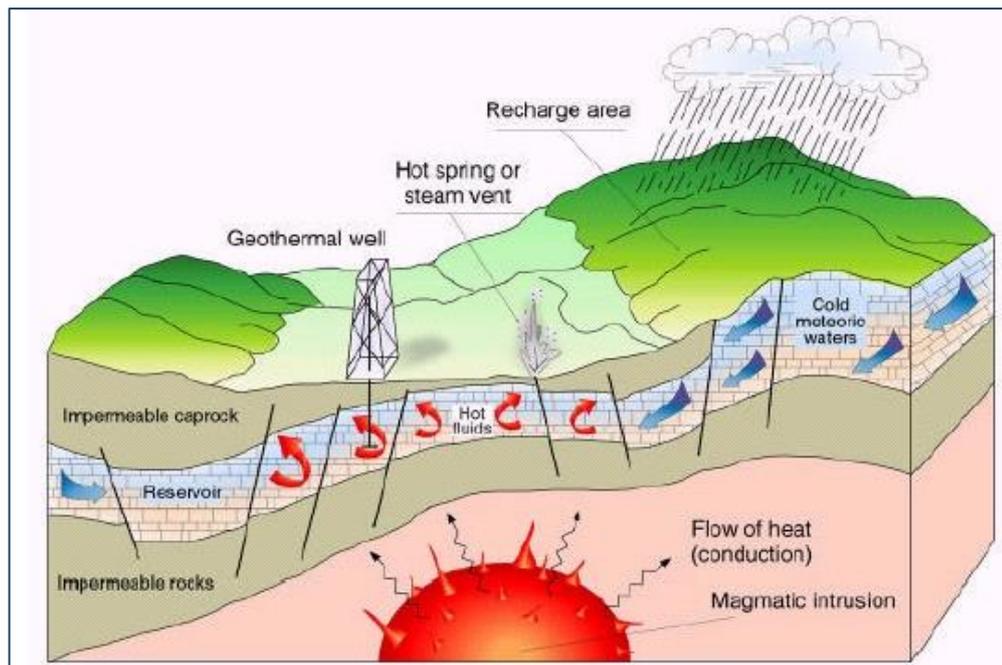


Figura 3. Representación esquemática de un sistema geotérmico ideal (Dickson & Fanelli, 2004).

Cuando el agua tiene contacto con la superficie terrestre, se filtra por esta misma y penetra hacia el subsuelo a través de las fallas y rocas fracturadas. El agua queda atrapada en los acuíferos, por donde va circulando y calentándose, pero no puede salir al exterior en su totalidad, porque está cubierta por una capa de roca impermeable que le impide su paso. Cuando estas condiciones se dan, estamos frente a un potencial geotermal (Figura 4).

Los geiseros y las aguas termales son sólo algunos ejemplos de lo que sucede cuando parte de estas aguas calientes o vapor salen a la superficie. Es posible que parte del vapor se escape generando temperaturas incluso alrededor de los 100°C, convirtiéndolos en una enorme fuente de energía.

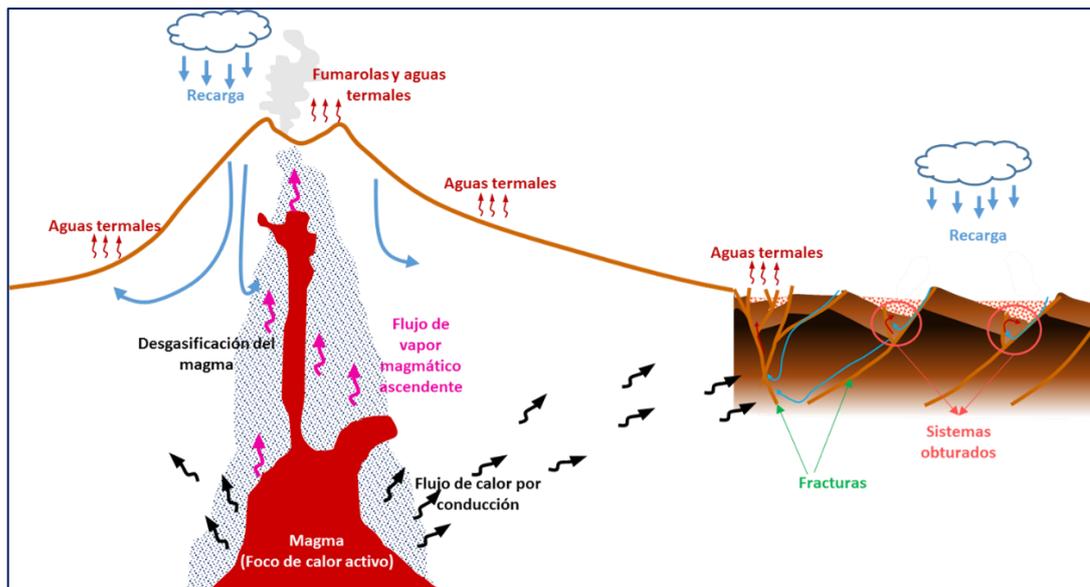


Figura 4. Modelo conceptual de un sistema dinámico con intercambio de masa y energía. Como se aprecia, se tiene un foco (magma) el cual se encarga de transmitir calor por conducción hacia la roca. Cuando se presenta una recarga de agua, en este caso, penetra por las fallas que hay en el subsuelo quedando atrapada entre dos unidades geológicas impermeables; ésta queda circulando, aumentando su temperatura por el calor que se está transmitiendo, aumenta de volumen y, a medida que acumula presión, escapa por las rocas a través de las grietas alcanzando la superficie en estado líquido o gaseoso. (Modificado de la Guía de Exploración Geotérmica, IGA, 2014).

2.1.3.1. Fuente de Calor

En general la fuente de calor en los sistemas geotermiales es una masa de magma a alta temperatura (600-900°C) a profundidades del orden de los 7-15 km. de la superficie terrestre Sierra & Pedro (1998). En Sistemas Geotérmicos existe activa intrusión continua o enfriamiento de grandes plutones dentro de la parte superior de la corteza (10 km de profundidad) que provee energía termal al sistema (Henley & Ellis , 1983) .

2.1.3.2. Reservorio

El reservorio generalmente está cubierto por una cubierta de rocas impermeables (capa sello) y conectado a un área de recarga superficial a través del cual las aguas meteóricas pueden reemplazar o reemplazar parcialmente los fluidos que escapan del depósito por medios naturales (a través de manantiales, por ejemplo) o son extraídos por pozos. La capa sello impide la migración de los fluidos geotérmicos contenidos dentro

del reservorio hacia la superficie.

2.1.3.3. Fluido Geotérmico

El fluido geotérmico es agua, en la mayoría de los casos, agua meteórica, en fase líquida o de vapor, dependiendo de su temperatura y presión. Esta agua a menudo lleva consigo productos químicos y gases como CO₂, H₂S, etc. (Dickson & Fanelli, 2004)

Para efectos ilustrativos, un campo geotérmico puede ser comparado con una olla de presión donde existe una fuente de calor (fuego) que suministra energía a un reservorio (el agua dentro de la olla), el cual se mantiene allí debido a la presencia de una capa sello (tapa a presión) ver Figura 5.

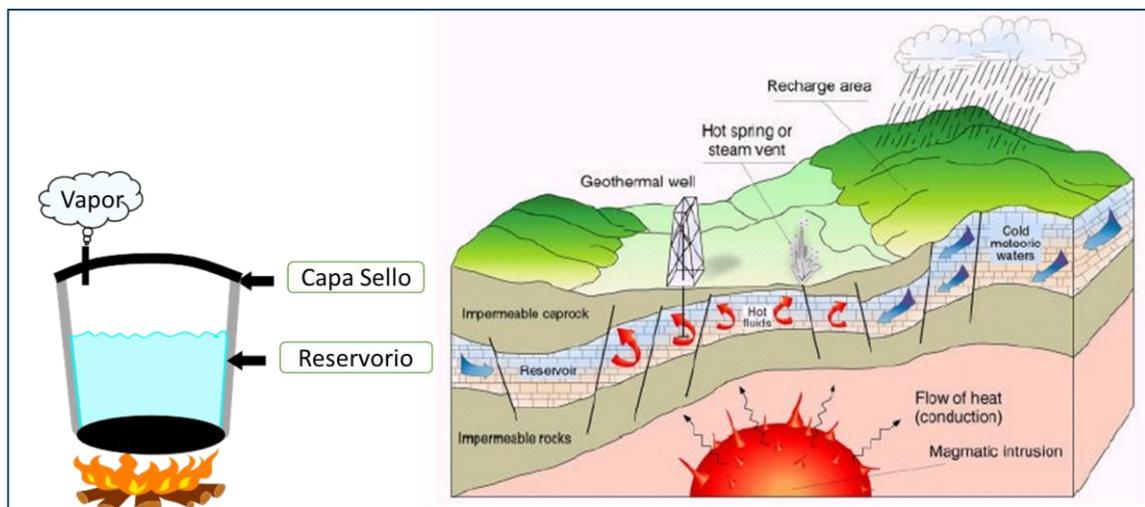


Figura 5. Comparación entre una olla de presión y un modelo de un campo geotérmico (Dickson & Fanelli, 2004).

El mecanismo subyacente de los sistemas geotérmicos está gobernado en general por convección de fluidos. La Figura 6 describe esquemáticamente el mecanismo en el caso de un sistema hidrotérmico de temperatura intermedia. La convección ocurre debido al calentamiento y consecuente expansión térmica de fluidos en un campo de gravedad; El calor, que se suministra en la base del sistema de circulación, es la energía que impulsa el sistema. El fluido calentado de menor densidad tiende a elevarse y a ser reemplazado por fluido más frío de alta densidad, proveniente de los márgenes del sistema.

La convección, por su naturaleza, tiende a aumentar las temperaturas en la parte superior de un sistema a medida que disminuyen las temperaturas en la parte inferior (White, 1973).

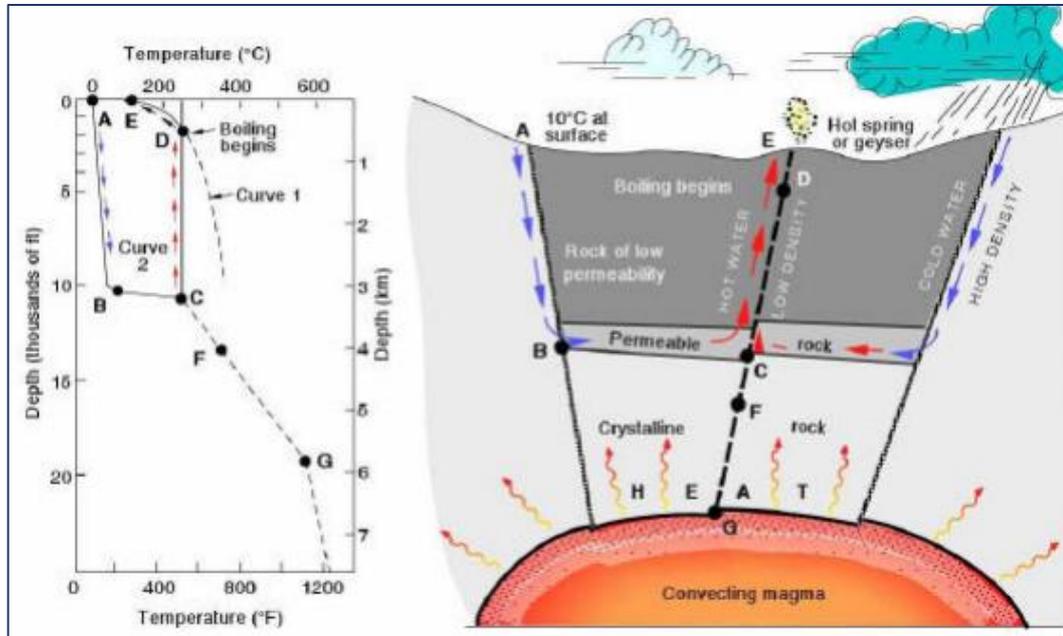


Figura 6. Modelo de un sistema geotérmico. La curva 1 es la curva de referencia para el punto de ebullición del agua pura. La curva 2 muestra el perfil de temperatura a lo largo de una ruta de circulación típica desde la recarga en el punto A hasta la descarga en el punto E. (White, 1973).

El fenómeno que acabamos de describir puede parecer bastante simple, pero la reconstrucción de un buen modelo de un sistema geotérmico real no es fácil de lograr. Requiere habilidad en muchas disciplinas y una vasta experiencia, especialmente cuando se trata de sistemas de altas temperatura. Los sistemas geotérmicos también ocurren en la naturaleza en una variedad de combinaciones de características geológicas, físicas y químicas, dando lugar a varios tipos diferentes de sistemas.

2.1.4. Tipos de Sistemas Geotérmicos

Clasificación de los sistemas geotérmicos según el mecanismo de transferencia de calor:

1. Sistemas geotermiales convectivos: En los cuales la convección es el mecanismo más



importante de transferencia de calor, debido a la circulación de fluido. Se pueden distinguir:

a) Sistemas hidrotermales, generalmente relacionados a intrusiones magmáticas. Estos a su vez se clasifican de acuerdo al tipo de fluido que producen en:

- Campos que producen agua caliente: El agua del reservorio tiene una temperatura entre 60-100°C. Pueden encontrarse en áreas de flujo de calor normal o ligeramente superior al normal. Hay campos de este tipo en Argentina, Uruguay, Hungría, Francia, Islandia, Unión Soviética, Italia.
- Campos que producen vapor húmedo: En estos campos conocidos como de "líquido-dominante", el reservorio contiene agua a una temperatura mayor de 100°C y una pequeña cantidad de vapor. Como ejemplo pueden citarse los campos de Wairakei en Nueva Zelanda, Cerro Prieto en México, Salton Sea en EE.UU., Otake en Japón y Ahuchapán en El Salvador.
- Campos que producen vapor sobrecalentado: Estos campos también denominados de "vapor-dominante", producen vapor seco generalmente sobrecalentado, con una relativa alta cantidad de gases incondensables, como: H₂, CH₄, H₂S, CO₂, N₂, entre los más importantes. Los campos que producen vapor sobrecalentado son: Larderello y Monte Amiata (Italia), Matsukawa (Japón), The Geysers (EE.UU.) y Copahue (Argentina).

b) Sistemas de circulación, en los que las aguas alcanzan alta temperatura debido a la circulación profunda en áreas con flujo de calor normal o mayor.

2. Sistemas geotermales conductivos: El mecanismo principal de transferencia de calor es la conducción. Pueden ser:

a) Acuíferos profundos en lechos sedimentarios donde, si bien la formación es permeable,



la transferencia de calor convectivo es baja debido a bajas temperaturas y espesor pequeño del horizonte permeable.

B) Roca seca caliente. La formación es impermeable y el agua debe introducirse a través de fracturas producidas artificialmente. (Sierra & Pedro, 1998)

2.1.5. Características de los Fluidos Geotérmicos Relacionados a Volcanismo

Estudios de isótopos estables y análisis de gases raros en zonas de descarga geotermal han mostrado que las aguas convectivas en sistemas geotérmicos son en gran parte derivadas de agua meteórica saturada en aire que ha penetrado en la corteza ocupando los sistemas de refrigeración magmáticas. En regiones volcánicas de alto relieve topográfico, flujos laterales extensos de agua caliente pueden ocurrir por encima de los 20 km desde el centro de campo geotérmico, como en El Talio en Chile y Aguachapán en El Salvador (Henley & Ellis , 1983).

Los fluidos geotérmicos por mantenerse en contacto con las rocas en el subsuelo, disuelven cantidad de compuestos de manera que su composición química depende en gran medida del equilibrio roca/fluido. Los compuestos disueltos pueden presentarse en forma catiónica (Na, K, Li, Mg, B, NH₃, Cs, Mn, Fe) aniónica (SO₄, Cl, HCO₃, F, Br), o neutra (SiO₂) (Orche, 2011).

La concentración de sales en general aumenta con la temperatura y varía en rangos de cientos de ppm a 300000 ppm.

El pH de los fluidos geotérmicos varía desde alcalino hasta ácido, como ejemplo de aguas alcalinas son las de Wairakei y Broadlands en Nueva Zelanda con pH de 8.6. Aguas Ácidas son las de los campos de Marsukawa en Japón y las de Salton Sea en California, EE.UU. con pH de 5 y 4.7 respectivamente. Aguas muy ácidas son como las del campo de Tatun en Taiwain cuyo pH es de 1.5 (Henley & Ellis , 1983).

Los gases y elementos volátiles participan en reacciones químicas entre los fluidos



termales y rocas del acuífero Orche (2011). En general la concentración de gases en fases de vapor es aproximadamente de entre el 0.01% a varias decenas de porcentaje siendo los gases más comunes el CO₂ y H₂S, incluyendo también CH₄, N₂, H₂, NH₃ y trazas de gases raros como He, Ne, Ar Kr y Xe Henley & Ellis (1983). Estos gases pueden provenir de:

- Hidrólisis del agua (H₂, O₂)
- Reacciones minerales (CO₂, H₂S, H₂, O₂)
- Descomposición de materia orgánica (CO₂, H₂S, N₂, NH₃, C_xH_xO_x)
- Desintegración Radioactiva (H₂, Ar, Rn)
- De la atmósfera (H₂, O₂, Ar, CO₂, Ne, He, Kr, H₂, Xe)
- Emanaciones magmáticas (H₂S, HCl, HF, CO₂, CH₄, H₃BO₃)

De acuerdo al contenido de sales y tipo dominante de aniones que los acompañan, las aguas de sistemas geotérmicos de alta temperatura pueden dividirse en cuatro grupos (Orche, 2011):

- Aguas Bicarbonatadas: Estos fluidos son ricos en sodio y bicarbonato, que se originan por la condensación de vapor geotérmico en aguas relativamente profundas pobres en O₂ o por disolución de CO₂. Las aguas que presentan bicarbonato sódico se presentan en zonas de condensación de campos de vapor dominante y zonas marginales de campos de agua dominante. Las aguas que contienen bicarbonato cálcico se presentan en manantiales termales formando travertino.
- Aguas ácido sulfatadas: Son fluidos producidos a partir de la ebullición que transfiere CO₂ y H₂S a la fase de vapor. Estos vapores se condensan a medida que alcanzan la superficie o se condensan en agua superficiales más someras, calentándolas y oxidando el H₂S a ácido sulfúrico formando aguas sulfatas ácidas.



Estas se caracterizan por ser pobres en cloro con un pH muy ácido (0-3) y los cationes con sílice provienen de la lixiviación de rocas por donde circulan.

- Aguas ácidas sulfatadas cloruradas: Se forman normalmente por la mezcla de aguas cloruradas y sulfatadas a profundidades variables. También se origina cuando un flujo de gases magmáticos ácidos se introduce en el sistema clorurado sódico neutro. Aguas cloruradas sódicas: Son aguas encontradas a grandes profundidades en yacimientos de agua dominante. Su pH es casi neutro en el acuífero, pero se vuelve ligeramente alcalinas al perder CO₂ al llegar a la superficie. Contiene principalmente de 1000 a 10000 mg/l de cloro y gas CO₂. El origen de estas aguas se le atribuye a la absorción de volátiles magmáticos como HCl, CO₂, SO₂ y H₂S por parte de aguas meteóricas que se percolan profundamente.

Aguas de menor temperatura se dividen en tres grupos (Orche, 2011):

- Bicarbonatadas: Aguas frías poco profundas con salinidades generalmente inferiores a 1g/l, relacionadas a depósitos aluviales, materiales volcánicos y formaciones carbonáticas.
- Sulfatadas: Aguas de temperatura media de profundidad media con salinidades comprendidas entre 0,5 a 3 g/l, relacionadas a rocas carbonatadas y evaporíticas.
- Cloruradas: Aguas de circulación profunda relacionadas con rocas de basamento regional.

2.2. MANIFESTACIONES GEOTÉRMICAS

Determinadas zonas de la litosfera están sometidas a tensiones que generan gran cantidad de calor y presión, produciéndose fracturas y fallas por las cuales pueden ascender desde el manto, magmas, masas de rocas incandescentes, en estado de fusión total o parcial, con pequeñas cantidades de materias volátiles como agua, anhídrido

carbónico, ácidos sulfúrico y clorhídrico, etc.

Si las condiciones tectónicas son favorables, los magmas, por su movilidad, pueden ejercer un empuje hacia arriba y romper la costra superficial de la Tierra, formando volcanes por los que se desparraman lavas, cenizas y gases.

Se estima que, para una determinada cantidad de magma arrojado por un volcán, un volumen diez veces mayor permanece debajo de la superficie, formando cámaras magmáticas que calientan las rocas circundantes.

Si esas rocas son permeables o están fracturadas, y existe circulación de agua subterránea, esta última capta el calor de las rocas, pudiendo ascender hasta la superficie a través de grietas o fallas, dando lugar a la formación de aguas termales, géiseres, fumarolas y volcanes de fango ver Figura 7.



Figura 7. Fumarolas, laguna de aguas termales y volcán de fango. (Geothermal Education Office,2001).

Estos fenómenos tienen características singulares que los diferencian de los afloramientos de aguas comunes. Por estar siempre asociados a las fases póstumas de los procesos magmáticos, además de la alta temperatura que presentan, están acompañados de gases, principalmente carbónicos o sulfurosos, produciendo estos últimos un olor fétido sumamente desagradable. Juntamente con los volcanes, constituyen las manifestaciones superficiales visibles del calor de la Tierra, y son los que tradicionalmente han atraído la investigación y el estudio de los recursos de energía



geotérmica.

- Volcán: Abertura en la corteza terrestre por la cual sale lava, vapor y/o cenizas con fuerza, o se derraman continuamente o a intervalos.
- Aguas termales: Manantial natural del que brota agua más caliente que la temperatura del cuerpo humano. Puede congregarse en lagunas o fluir por arroyos.
- Géiser: Surtidor intermitente de agua líquida mezclada con vapor de agua, a una temperatura entre 70 y 100 °C, con gran cantidad de sales disueltas y en suspensión. Los minerales disueltos en el agua quedan depositados alrededor del géiser a modo de escoria o de sílice amorfa (geiserita). Muchos géiseres en el mundo se han extinguido o vueltos inactivos por causas naturales o por la instalación en sus inmediaciones de plantas de energía geotérmicas, como, por ejemplo, en Wairakei (Nueva Zelanda) y en Nevada (EE.UU.). La mayor concentración de géiseres se encuentra en el Parque Nacional de Yellowstone.
- Fumarolas: Nombre genérico dado a la emisión de gases y vapores de agua a temperaturas muy elevadas, en ocasiones pueden alcanzar 500 °C. Se las denomina, en función de su composición química, carbónicas, sulfurosas, clorhídricas, etc. Las solfataras, además de vapor de agua a 90 – 300 °C, contienen sulfuro de hidrógeno que, en contacto con el aire, se oxida y deposita azufre alrededor de la abertura. Las mofetas son fumarolas más frías, 90 °C, que desprenden grandes cantidades de anhídrido carbónico.

El vapor y la mayoría de los gases magmáticos condensan a profundidades cercanas a la superficie favorecidas por la interacción con aguas meteóricas infiltradas, produciendo aguas ácidas que pueden ser descargadas con alta temperatura para formar lagos cratéricos ácidos en las zonas de cráteres activos, o vertientes calientes ácidas hacia



los flancos de los edificios volcánicos. El pH de estas aguas es usualmente menor a 2 y por lo general producen un importante lixiviado de la roca. Los condensados ácidos se mueven pendiente abajo en forma subsuperficial y se mezclan con aguas subterráneas someras, neutralizándose lentamente mediante la progresiva interacción fluido-roca. Vertientes ácidas de menor temperatura se desplazan pendiente abajo con valores de pH relativamente mayores. Los condensados cerca de la superficie pueden ser canalizados como arroyos ácidos, estos son típicos de sistemas volcánicos-hidrotermales y suelen situarse en los flancos externos aguas debajo de los edificios volcánicos.

Las fumarolas asociadas con sistemas volcánicos-hidrotermales contienen cantidades considerables de gases magmáticos agresivos, como por ejemplo HF, HCl y SO₂. Si el componente magmático es dominante (con SO₂), la temperatura de las fumarolas puede ser mayor a los 130°C, pero donde el principal componente es hidrotermal (con H₂S en lugar de SO₂) por lo general son menores a 130°C.

Estas manifestaciones también incluyen depósitos de minerales sulfatados como alunita, natroalunita, jarosita, yeso y un rango de sulfatos hidratados por lo general efímeros. En la medida que los condensados ácidos progresivamente se van neutralizando por interacción con la roca de caja se puede llegar a formar esmectitas. Sin embargo, el proceso de alteración es predominantemente destructivo, donde la sílice amorfa que se deposita en estos ambientes como sílice residual, es principalmente derivada de las rocas circundantes y permanece en la superficie mientras que el resto de los constituyentes son lixiviados (Hochstein y Browne, 2000). En algunas ocasiones, en los puntos de emisión asociados a las fumarolas se forman acumulaciones de aguas que dan lugar a encharcamientos denominados piletas, pailas u olletas. Estas aguas acumuladas, suelen ser calentadas por la emisión y por ello se emplea el término descriptivo aguas calentadas por vapor (ACV), que se utilizará en este trabajo. Las aguas pueden mostrar un burbujeo

leve a moderado o intenso y con temperaturas cercanas al punto de ebullición, y por esto se las denomina con los términos descriptivos en inglés “bubbling pools” y “boiling pools”, respectivamente. Para los casos en que estos encharcamientos presentan un aspecto fangoso se los denomina “mud pools”.

- Volcanes de fango (mud pots): Erupciones de gases y barro que aparecen donde no hay bastante agua para sostener un géiser o una fuente termal. El vapor y los gases burbujan a través del barro formado por la interacción de los gases con rocas sedimentarias. En Italia se llaman salsas. Son más frecuentes en yacimientos petrolíferos relativamente poco profundos, donde los gases emanados elevan arcillas sumamente hidratadas, llegando a formar charcas o lagunas. (Llopis Trillo & Rodrigo Angulo).

2.3. ORIGEN DE LOS FLUIDOS GEOTÉRMICOS

Las aguas termales pueden formarse a partir de 4 tipos de aguas que son: aguas meteóricas, aguas magmáticas, aguas de formación y aguas fósiles (Fagundo, 1990).

2.3.1. Aguas Meteóricas

En zonas de recarga de un sistema geotérmico, las aguas meteóricas se infiltran hacia la sub-superficie por gravedad, elevando su temperatura a medida que alcanzan mayor profundidad (Figura 8). Estas aguas después de ser calentadas suben y pueden circular por los acuíferos subterráneos y llegar a la superficie a través de fisuras y fracturas abiertas existentes en rocas Pinuaga (2008). Este es el origen más frecuente de las aguas termales en un sistema geotérmico, evidente en la concentración isotópicas de $2H$ y $18O$ en las aguas termales (Marini, 2000).

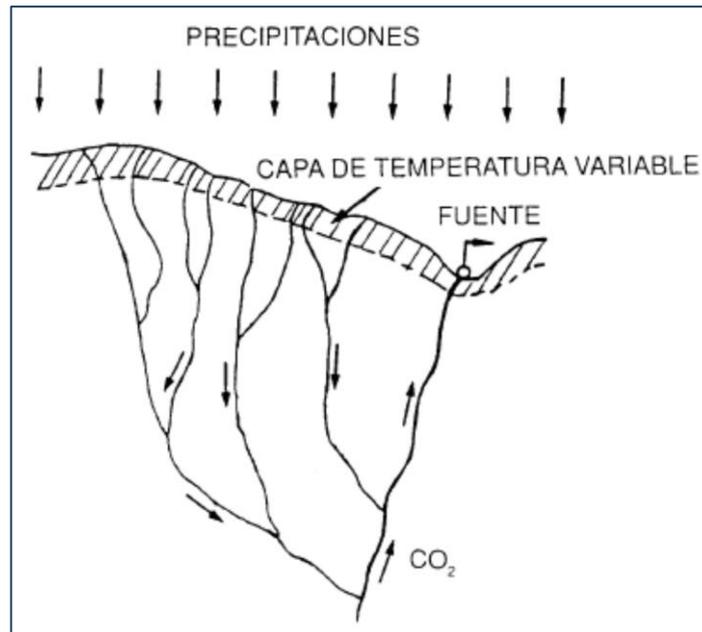


Figura 8. Esquema del origen meteórico de las aguas termales (Pinuaga, 2008).

2.3.2. Aguas Magmáticas

Las aguas de origen magmático podrían generarse durante la cristalización de magmas que liberan volátiles que escapan a la superficie en forma de fumarolas, compuestas esencialmente de vapor de agua junto con elementos como flúor, cloro, carbono, fósforo y boro. Se ha calculado que al fundirse 1 km³ de granito liberaría 26 millones de toneladas de agua lo que quiere decir que un kilogramo de granito produce 10 gramos de agua; de igual manera se ha confirmado que una intrusión magmática con 1000 metros de potencia contendría un 5% en peso de agua y al enfriarse podría producir 23.8 litros de agua por minuto y por kilómetro cuadrado durante un millón de años (Pinuaga, 2008).

2.3.3. Aguas de Formación

Este tipo de aguas juveniles o endógenas proceden de la consolidación de lavas y del vapor de agua de origen volcánico, acompañados generalmente de gases como anhídrido carbónico, nitrógeno, sulfhídrico y fluorhídrico. La composición de estas aguas en sales y la temperatura son relativamente constantes y de carácter hipertermal.

2.3.4. Aguas Fósiles.

Proviene de las reacciones químicas de carácter intenso en el seno de la corteza que liberan agua y de procesos de oclusión de aguas debido a la depositación de sedimentos sobre los fondos marinos. Estas aguas son particularmente ricas en cloruro de sodio, bromo y yodo.

Hay que tomar en cuenta que muchas aguas juveniles profundas proceden de consolidación de lavas y de vapor de agua de origen volcánico, además que existen ciertas reacciones químicas de carácter intenso en profundidad que pueden liberar agua Pinuaga (2008). Lo más común en aguas termales es un origen mixto, por mezcla de aguas meteóricas de infiltración con aguas endógenas de formación y enfriamiento de magmas (Figura 9).

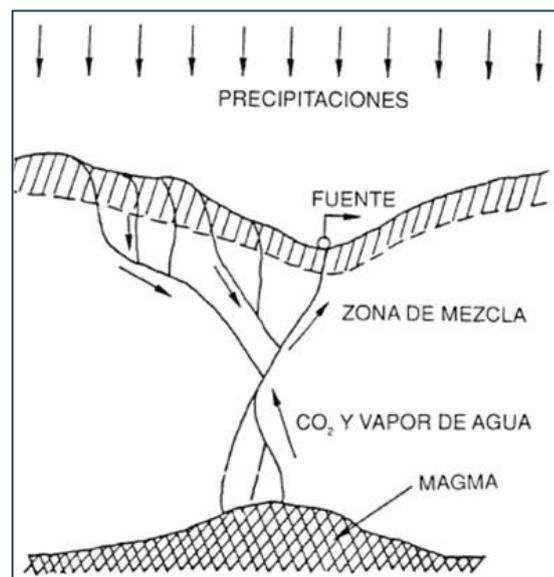


Figura 9. Esquema del origen mixto de las aguas termales (Pinuaga, 2008).

2.4. MECANISMOS DE SURGENCIA DE LOS FLUIDOS GEOTÉRMICOS

Los sistemas geotérmicos presentan fuentes termales en superficie debido a factores hidrológicos y físicos que permiten el ascenso de aguas termales a la superficie. Entre los factores que influyen a la salida de agua termal y su circulación descritos por



Pinuaga (2008), están:

- Gradiente Hidráulico
- Expansión del vapor de agua
- La acción de gases ocluidos y disueltos
- La acción de la temperatura (aguas calientes ascienden).

El gradiente hidráulico afecta a la circulación de aguas subterráneas sean estas termales o no. Este factor explica que zonas de recarga se encuentran en zonas de mayor altitud que zonas donde se encuentran las fuentes de aguas termal.

La expansión del vapor es un factor que entra en acción cuando el agua entra en contacto con rocas a alta temperatura produciéndose vaporización de agua y la disociación del agua con la fijación del oxígeno. Este factor es evidente en géiseres, fumarolas y en la surgencia de fuentes hipertermales.

La acción de gases ocluidos y disueltos actúa en la dinámica y física de los fluidos hidrotermales, cambiando el peso específico del agua y por otro lado la presión de los gases suspende el agua y provoca su ascenso. Al cambiar la densidad del agua, cambia la velocidad del flujo de los caudales de gas y líquido, modificando la carga hidráulica.

La temperatura actúa variando la masa específica del agua y su viscosidad, de manera que, si el gradiente de temperatura supera el límite conocido como gradiente adiabático, el fluido en profundidad se vuelve inestable y tiende a fluir por convección térmica hacia la superficie. A su vez la diferencia de densidad entre agua fría y caliente provoca un fenómeno típico de termosifón, que crece con el caudal. Además, al aumentar la temperatura, la viscosidad del agua disminuye, por lo que el coeficiente de permeabilidad aumenta y eso produce un aumento en la velocidad de circulación del agua. Por lo tanto, estos factores son los que permiten el aparecimiento de fuentes termales.

2.5. PLAY GEOTÉRMICO



También conocido como **play geotérmico**, incluye la agrupación de sistemas **geotérmicos** similares en cuanto a la fuente de calor, permeabilidad de las rocas del yacimiento y el tipo de fluido en relación con un ambiente geológico, lo cual tiene una relación directa con la definición de provincias **geotérmicas**.

Las características de los sistemas geotérmicos individuales son una función de variables específicas tales como la naturaleza y la profundidad de la fuente de calor; el mecanismo de transferencia de calor dominante; permeabilidad y distribución de porosidad; tipo de roca y propiedades petrofísicas; química de fluido y tasa de recarga del fluido de la fuente.

Comúnmente, en el área petrolera, el término play representa los distintos entornos geológicos estratigráficos y estructurales que incluyen todos los componentes necesarios para una acumulación potencialmente económica del petróleo (Sistema petrolero): una roca madre, roca reservorio y trampa. Trasladado a los recursos geotérmicos, un tipo de play geotérmico (Sistema geotérmico) podría definirse como un entorno geológico específico que incluye una fuente de calor, mecanismos de migración del calor, la capacidad / almacenamiento de un fluido térmico, y el potencial para la recuperación económica del calor (International Geothermal Association, 2014).

El objetivo del concepto play geotérmico es agrupar entornos geológicos similares que podrían albergar los recursos geotérmicos explotables para desarrollar estrategias de exploración específicas del sitio que pueden conducir al descubrimiento y estimaciones de tales recursos.

En esta sección se describirán seis tipos de play basados por la manera en la que se transporta el calor: Por convección o conducción dominantes.

2.5.1. Play de Convección Dominante

En los play de tipo convección dominante, el calor es transportado de manera

eficiente desde reservorios profundos hasta los someros o superficiales por movimientos ascendentes del fluido a lo largo de conductores permeables.

Se incluyen todos los yacimientos geotérmicos de "alta temperatura" (superiores a $150\text{ }^{\circ}\text{C}$) con profundidades de aproximadamente 3.000 metros. Estos se encuentran invariablemente adyacentes a márgenes tectónicos o regiones de alta actividad tectónica, alta actividad volcánica, plutonismo joven (menos de tres millones de años), o de regiones con elevado flujo de calor debido al adelgazamiento cortical durante la extensión de la corteza (Figura 10).

Play tipo Magmático.

A) Play activo o de intrusión magmática reciente:

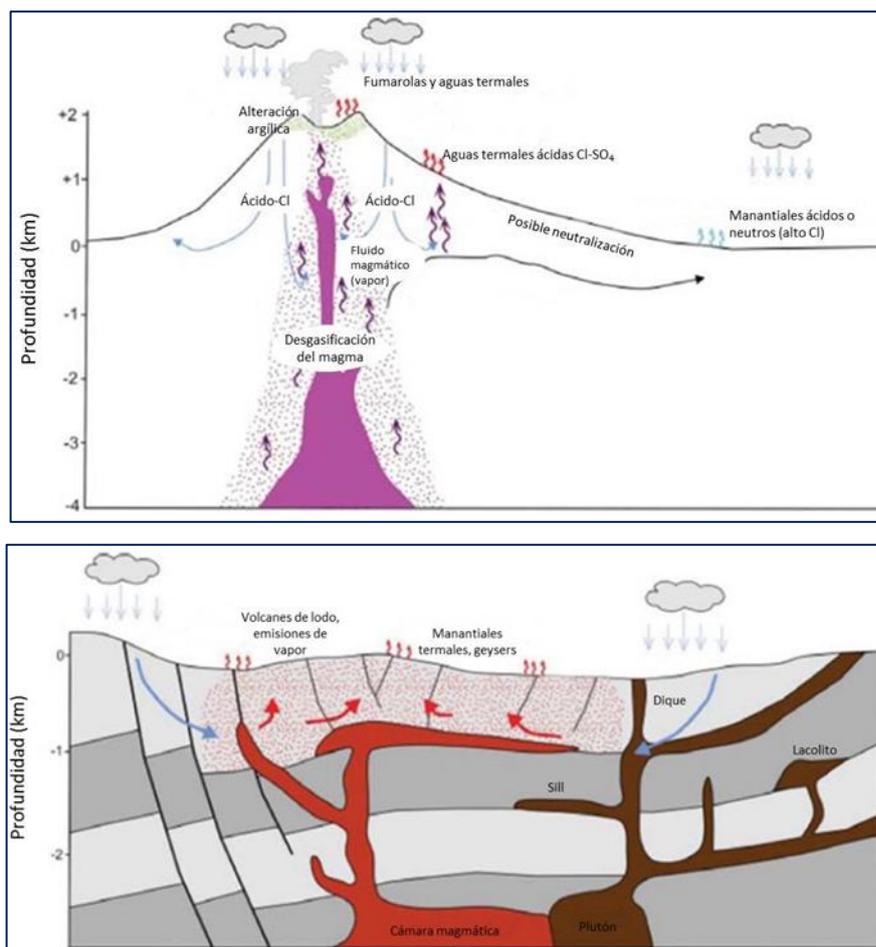


Figura 10. Ejemplos de un play activo o de intrusión magmática reciente (International Geothermal Association, 2014)



Una cámara de magma relativamente poco profunda es la característica dominante en este tipo de play. El magma parental, la recarga de fundido, y la cristalización del magma controlan la química del fluido, el flujo del fluido, y el sistema geotérmico global. Un play magmático con una intrusión magmática activa o reciente se distingue por una fuente de calor poco profunda e intensa en forma de una cámara magmática joven. El play pueden ser identificado en regiones con actividad volcánica basáltica en los márgenes de placas divergentes, volcanismo dominante de composición basáltica a andesítico a lo largo de los arcos de islas, o de andesítico a dacítico vulcanismo reciente en arcos continentales.

B) Play de intrusión magmática extinta:

Un play geotérmico con intrusión magmática no activo o extintas incorpora una fuente de calor en forma de un Plutón que consiste en una roca cristalina enriquecida en elementos generadores de calor o un joven, pero todavía cristalizado en procesos de enfriamiento, el cuerpo ígneo intrusivo asociado a sistemas de fallas normales (Figura 11). Tales tipos de play se localizan diferentes tipos de cuerpos montañosos circundantes que proporcionan altas tasas de recarga de circulación de agua meteórica, la cual se conduce por un sistema hidrotermal teniendo una posible partición de vapor sobre la roca caliente.

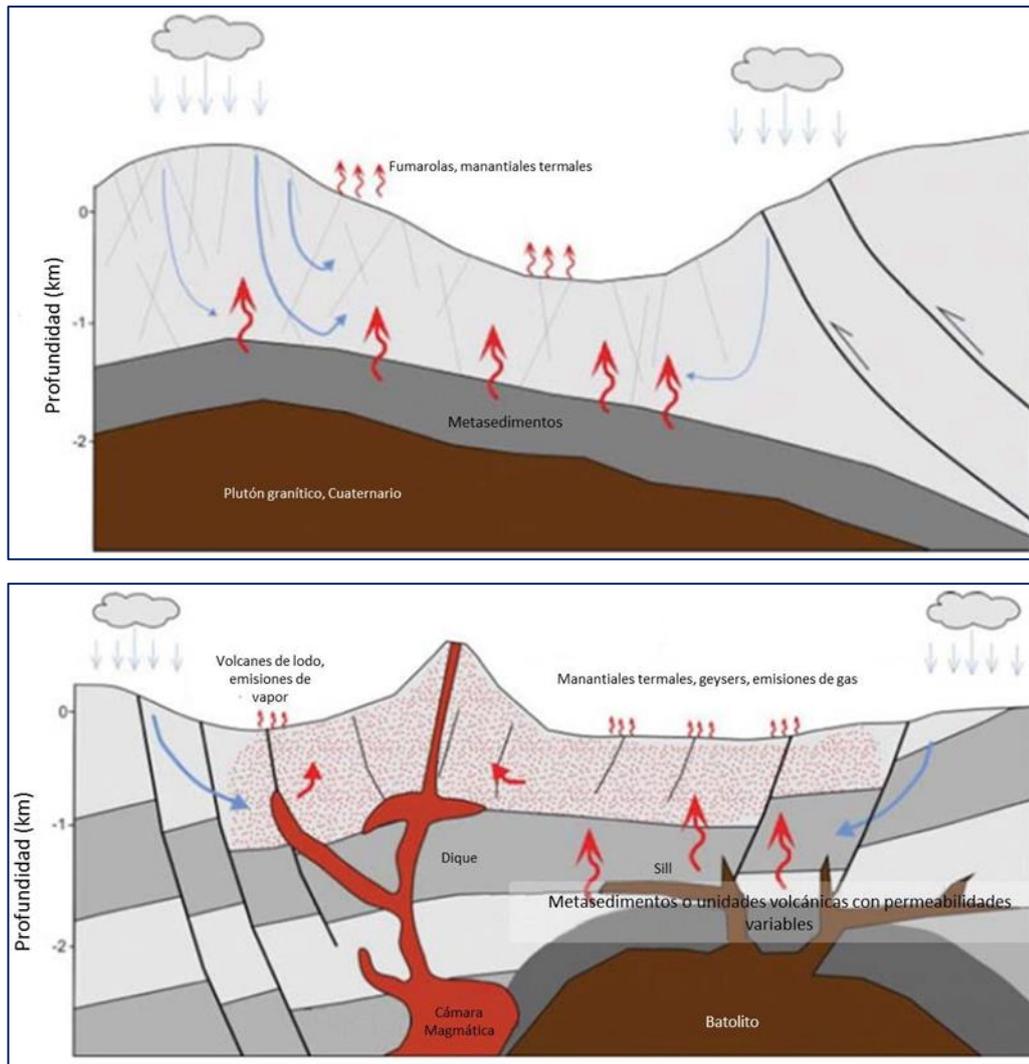


Figura 11. Ejemplos de un play de intrusión magmática extinta (International Geothermal Association, 2014).

2.5.2. Play de Tipo de Dominio Extensional

En un play geotérmico de dominio extensional (Figura 12), regiones del manto se elevan debido a la extensión y adelgazamiento de la corteza. El manto es la principal fuente de calor para los sistemas geotérmicos asociados a este tipo de play. Los sistemas de gradientes térmicos elevados resultantes facilitan el calentamiento de agua meteórica que circula por fallas profundas o formaciones permeables.

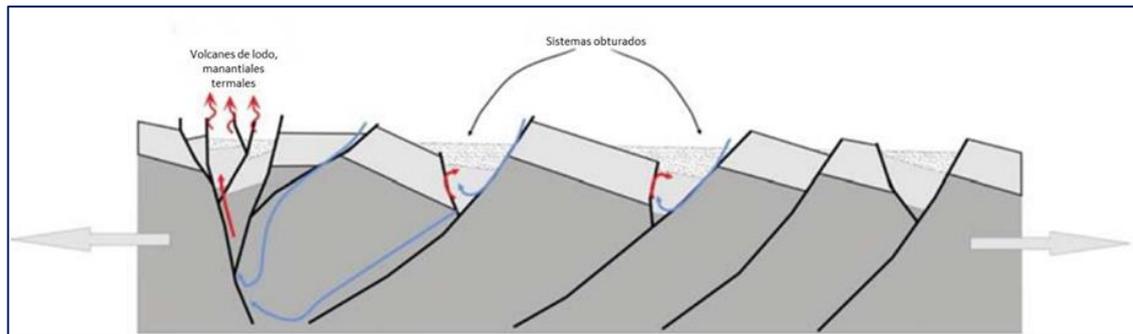


Figura 12. Play de tipo de dominio extensional (International Geothermal Association, 2014).

2.5.3. Play de Conducción Dominante

Este tipo de play se puede subdividir de acuerdo con el porcentaje de porosidad-permeabilidad natural dentro de la roca del potencial yacimiento, y la ausencia o presencia de fluidos de yacimientos naturales.

Los play de conducción geotérmica dominados con reservorios de baja permeabilidad, tales como areniscas, carbonatos, o roca cristalina, sólo pueden ser desarrolladas utilizando tecnología de ingeniería de sistemas geotérmicos.

Cuenca intracratónica.

Un play de cuenca geotérmica intracratónica (Figura 13) incorpora un depósito dentro de una secuencia sedimentaria establecido en un graben de extensión o de subsidencia térmica. Las cuencas intracratónicas que se originan por el adelgazamiento de la litosfera y la subsidencia se suelen fragmentar en varias depresiones o subcuencas. El comportamiento geológico de una cuenca intracratónica por lo general produce un relleno de sedimentos de varios kilómetros de espesor los cuales pueden incluir siliciclásticos fluviales, carbonatos marinos, lodos y evaporitas.

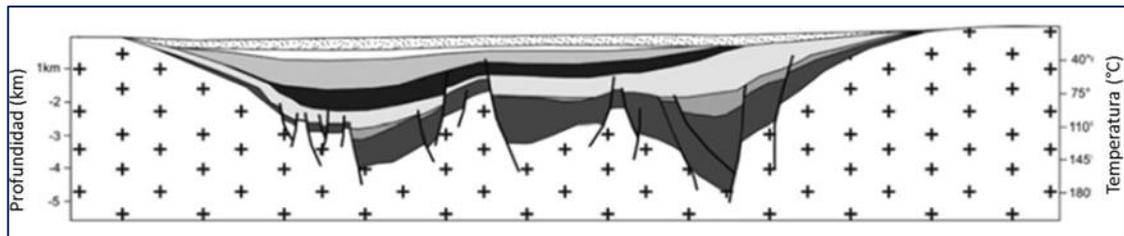


Figura 13. Configuración típica de una cuenca sedimentaria intracratónica con varias depresiones o subcuencas (International Geothermal Association, 2014).

Cinturón Orogénico.

En este play se incorpora un depósito sedimentario dentro de cuenca de antepaís (foreland) o una cadena montañosa. Las secuencias sedimentarias en las cuencas de antepaís son influenciadas por una subsidencia significativa de la corteza hacia el orógeno. El resultado de este proceso es la flexión hacia abajo de la litosfera, formando áreas de extensión local y fallamiento normal (Figura 14).

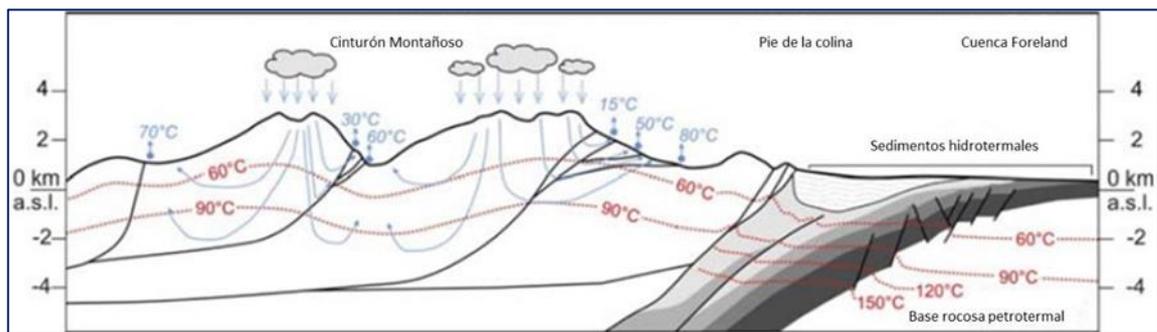


Figura 14. Estructura típica de conducción térmica (isotermas rojas), rutas de flujo del agua subterránea, y temperaturas de descarga (flechas azules) en zonas orogénicas. (International Geothermal Association, 2014).

Basamento.

Las características principales de un play de basamento son una roca cristalina con fallas o fracturas de muy baja porosidad y permeabilidad, con la capacidad de almacenar grandes cantidades de energía térmica. Estos también pueden ser referidos a sistemas de rocas secas como petro-térmicos o calientes (Figura 15).

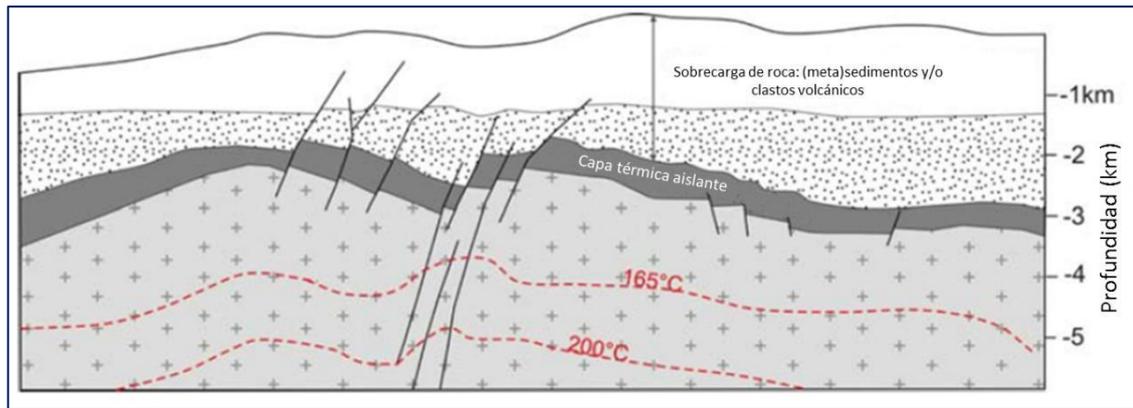


Figura 15. Los controles geológicos sobre la temperatura en un tipo de play de basamento de roca cristalina consiste en la producción de calor roca cubierta por capas aislantes térmicamente como la pizarra y otros sedimentos de sobrecarga. (International Geothermal Association, 2014)

2.6. RELACIÓN AGUA/ROCA Y EL TIEMPO DE RESIDENCIA DE LOS FLUIDOS

A medida que los fluidos de origen magmático (gases, agua, vapor, o una mezcla de ellos) se acercan a la superficie parte de ellos puede comenzar a condensar, y esta situación se ve favorecida si se encuentran con aguas frías infiltradas de origen meteórico. De esta manera las interacciones agua-roca comienzan a tomar relevancia progresivamente, lo cual implica tener en consideración variables como la relación en volumen agua/roca y el tiempo de residencia de los fluidos en el sistema (Henley & Ellis, 1983).

En todo sistema que implique la circulación de fluidos a través de un cuerpo de roca, el fluido va a reaccionar químicamente con la roca y, como en el caso de cualquier reacción química, modificará el sistema hacia condiciones de equilibrio. El grado de proximidad al equilibrio en cada punto del sistema (equilibrio local) dependerá de la velocidad de la reacción y de la velocidad del flujo de fluido a través de la roca. En la mayoría de los casos, las velocidades de reacción aumentan con el ascenso de la temperatura. Como regla general, se puede considerar que las velocidades de reacción van a aumentar al doble o al triple con un aumento de la temperatura de 10° C. Por lo



tanto, un aumento de 100° C producirá un aumento en las velocidades de reacción de 210 a 310, ó 1.024 a 59.049 veces. Por este motivo, se puede observar que en general las rocas están altamente alteradas en los sistemas geotérmicos de alta temperatura ($T > 200^{\circ} \text{C}$), mientras que se observan pequeñas alteraciones en las rocas cercanas a la superficie de la Tierra, si nunca estuvieron expuestas a calentamientos con posterioridad a su formación. Para tal motivo, un fluido acuoso provee el medio más adecuado para la transferencia de temperatura y para que interactúen los componentes involucrados en la reacción. De esta manera, la proporción de agua circulando en relación a la de roca afectada se hace un parámetro a considerar (Arnórsson, 1985).

En numerosos sistemas hidrotermales adyacentes a batolitos en enfriamiento, se observó que se producía un importante intercambio de isótopos de oxígeno Sheppard et al. (1971). A partir de esta observación, mediante balances de isótopos de oxígeno ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) se calcularon las relaciones en volumen agua/rocas necesarias para generar el intercambio isotópico correspondiente Henley & Ellis (1983). Otro parámetro asociado a la relación agua/roca es el tiempo de residencia de los fluidos en el sistema, que da una idea del grado de permeabilidad de la roca y de la contribución relativa al sistema de recargas de mayor y menor recorrido. A diferencia de la relación agua /roca, el tiempo de residencia ha sido evaluado de manera más eficiente en función de isótopos de hidrógeno, tanto tritio (^3H) como deuterio (^2H). Esta información ha sido considerada de gran relevancia para el conocimiento de un sistema, debido a que la mineralogía secundaria, formada como consecuencia de la interacción agua-roca, estaría controlada en mayor medida por la permeabilidad, temperatura y composición del fluido, más que por el tipo de roca original (Browne, 1978).

Sobre la base de evidencias isotópicas, existe una aceptación general de que las aguas que se manifiestan en superficie en áreas geotermales son mayormente, sino



exclusivamente, de origen meteórico Arnórsson (1985). Sobre la base de esta hipótesis, que las aguas geotermales son a los fines prácticos, de origen meteórico, se puede considerar que las interacciones progresivas agua-roca, que tienden hacia el equilibrio, comienzan cuando el agua meteórica se infiltra en el suelo y va ganando calor y acidez en profundidad por contacto con la roca caliente y fluidos de origen profundo. El agua infiltrada, que tiene un bajo contenido de sólidos disueltos y es levemente ácida, está subsaturada con respecto a la mayoría, sino a todos, los minerales comunes. Por esta razón, esta agua, a medida que se infiltra en el suelo y la roca subyacente, va a tender a disolver los minerales presentes en las rocas circundantes. En este proceso aumentará su contenido en sólidos disueltos y a medida que éste aumente, debido a la disolución de las rocas, el agua se irá aproximando a la saturación (equilibrio) con respecto a los minerales de la roca. Estos minerales se van a disolver hasta tanto el agua se haya saturado con respecto a ellos. Sin embargo, si la roca es ígnea o metamórfica de alto grado es probable que el agua alcance la saturación con minerales que no sean los primarios, por ser estos menos solubles, antes de alcanzar la saturación con los minerales primarios de la roca. Los minerales primarios de rocas que se han formado en un ambiente de alta energía (tales como minerales de rocas ígneas y metamórficas de alto grado) serán probablemente más solubles que los minerales hidrotermales que se forman en un ambiente de menor energía. Si los minerales secundarios son menos solubles que los primarios, el agua nunca alcanzará la saturación con estos últimos. La extracción de los constituyentes disueltos, mediante la precipitación de minerales secundarios, asegura que el agua se mantenga subsaturada con respecto a los minerales primarios. Esto conducirá a que el agua continúe disolviendo minerales primarios y a que los minerales secundarios continúen precipitando en su lugar. Si se le da a este proceso tiempo suficiente la mineralogía de la roca puede resultar completamente transformada. En el curso de este proceso algunos materiales

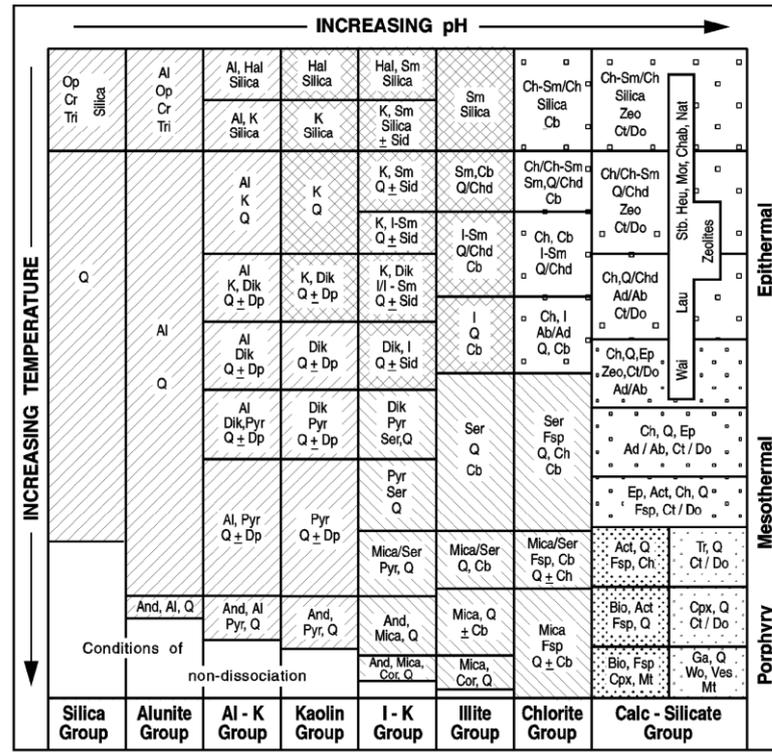


pueden ser agregados a la roca por el agua que ingresa al sistema, mientras que otros pueden ser extraídos por el agua que sale del sistema. Por otro lado, durante el proceso de alteración los elementos traza pueden ser incorporados o substraídos de la roca en cantidades tales que sus concentraciones en la roca alterada difieran mucho de la que presentaban en la roca fresca. Así por ejemplo el azufre (sobre todo en forma de pirita), y el carbono (principalmente en forma de calcita) pueden ser incorporados en grandes cantidades a las rocas alteradas en las zonas de flujo ascendente de los sistemas geotermales, en los cuales se produce ebullición. Por el contrario, la roca puede resultar en gran medida empobrecida en elementos móviles tales como Cl y B (Arnórsson, 1985).

2.7. ALTERACIÓN HIDROTHERMAL RELACIONADA A SISTEMAS GEOTÉRMICOS

En general las asociaciones minerales en zonas de alteración hidrotermal profundas en sistemas geotérmicos relacionados a volcanismo dependen de la temperatura del punto de ebullición de los fluidos geotérmicos y el contenido de gas que estos presenten. En una segunda fase la pérdida de vapor con CO₂ y H₂S y otros gases disueltos controlan el incremento de pH y el desarrollo de asociaciones minerales, particularmente en zonas de flujo ascendente Henley & Ellis (1983). El estudio de sistemas geotermales fósiles tales como pórfidos de cobre o depósitos epitermales pueden ser instructivos en consideración a estructuras termales y asociaciones minerales de alteración hidrotermal en profundidad y superficie de los sistemas geotérmicos actuales (Corbett y Leach 1997).

Corbett & Leach (1997) publicaron un diagrama de clasificación de tipo de alteración para sistemas hidrotermales en que se incluyen los principales tipos clásicos de tipos de alteración, ordenados en función del pH de y de la temperatura (Figura 16).



Mineral Abbreviations :

Ab - albite; Act - actinolite; Ad - adularia; Al - alunite; And - andalusite; Bio - biotite; Cb - carbonate (Ca, Mg, Mn, Fe); Ch - chlorite; Chab - chabazite; Chd - chalcedony; Ch-Sm - chlorite-smectite; Cor - corundum; Cpx - clinopyroxene; Cr - cristobalite; Ct - calcite; Do - dolomite; Dik - dickite; Dp - diasporite; Ep - epidote; Fsp - feldspar; Ga - garnet; Hal - halloysite; Heu - heulandite; I - illite; I-Sm - illite-smectite; K - kaolinite; Lau - laumontite; Mt - magnetite; Mor - mordenite; Nat - natrolite; Op - opaline silica; Pyr - pyrophyllite; Q - quartz; Ser - sericite; Sid - siderite; Sm - smectite; Stb - stilbite; Tr - tremolite; Tri - tridymite; Ves - vesuvianite; Wai - wairakite; Wo - wollastonite; Zeo - zeolite

	Potassic		Propylitic		Outer / Sub Propylitic
	Skarn		Argillic		Advanced Argillic
	Phyllic				

Common Alteration Mineralogy in Hydrothermal Systems

Figura 16. Asociaciones de minerales de alteración comunes en sistemas hidrotermales (Corbett & Leach, 1997)

En resumen, generalizado la gama de temperaturas en las que aparecen minerales de alteración en áreas geotérmicas se muestra en la Figura 17. El diagrama indica cuales pueden ser los minerales que se producen a diferentes temperaturas en la alteración hidrotermal. La presencia o ausencia de un mineral en particular depende de una serie de parámetros cinéticos, como la cantidad de CO₂ y H₂S disueltos en los fluidos que alterna la roca o el pH de la solución (Henley & Ellis, 1983).

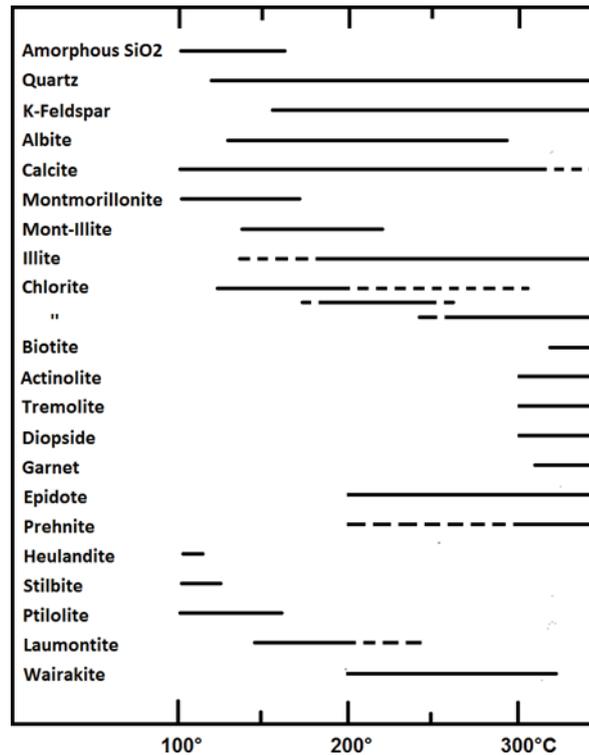


Figura 17. Resumen generalizado de la gama de temperaturas en las que aparecen minerales de alteración. La línea sólida indica la gama de temperatura más comúnmente observadas en campos geotérmicos (Henley & Ellis, 1983).

La susceptibilidad a la alteración es variable en los minerales primarios de las rocas. El más reactivo es el vidrio volcánico, frecuentemente alterado primero a ópalo, smectita, calcita o zeolita y luego a minerales de arcilla. En términos generales se puede establecer un orden relativo de susceptibilidad a la alteración de los minerales, a saber: Olivino > magnetita > hiperstena > hornblenda > biotita = plagioclasa. El cuarzo es resistente a la alteración hidrotermal y no es afectado hasta temperaturas de 300°C, pero hay evidencias de recristalización del cuarzo a mayores temperaturas como en el campo de Cerro Prieto, México (Henley & Ellis, 1983).

2.8. RELACIÓN DE LAS FUENTES TERMALES, FALLAS Y ZONAS DE ALTERACIÓN

Las fuentes termales están relacionadas al concepto de ascensión de fluidos calientes, por lo que deben existir fracturas abiertas relacionadas a un contexto tectónico



y geológico local que favorezca la circulación del agua. Las estructuras geológicas que deben existir son (Pinuaga, 2008):

- Fallas en material frágil para aumentar la permeabilidad.
- Contactos geológicos.
- Diques y Filones eruptivos.
- Diaclasas y fisuras finas.
- Filones metalíferos.

2.9. GEOQUÍMICA DE LAS FUENTES TERMALES

Para identificar el rol que juegan en un análisis geoquímico los diversos constituyentes químicos de fluidos geotermales Giggenbach (1991) propuso una subdivisión, que se basa en la información que éstos pueden entregar:

- Fluidos Conservativos (trazadores): corresponden a constituyentes no reactivos y químicamente inertes. Cuando se adicionan a la fase acuosa, idealmente no se modifican. Las razones de estos componentes se mantienen constantes al ser afectados por dilución, proveyendo así una signatura química que permite trazar el origen de las aguas.
- Fluidos Geoindicadores: especies químicamente reactivas, que responden a cambios en el ambiente de una forma que es conocida, proveyendo información acerca de las condiciones de equilibrio agua-roca en el reservorio geotermal.

Dentro de los fluidos trazadores se encuentran los gases nobles He y Ar, seguido por otros constituyentes comparativamente conservativos como Cl, B, Li, Rb, Cs y N₂. Por otra parte, los fluidos geoindicadores incluyen aquellas especies que forman parte en las interacciones termo dependientes entre minerales aluminosilicatados y los fluidos



geotermales tales como Na, K, Mg, Ca y SiO₂, de la misma forma que el H₂, H₂S, CH₄, y CO₂, involucrados en las reacciones redox dependientes de la presión y temperatura.

El límite entre ambos grupos no es rígido, debido a que algunos elementos al ser sometidos al cambio en las condiciones de presión y temperatura pueden traspasar el límite entre trazadores y geoindicadores, como es el caso del cesio (Cs), que a una temperatura mayor que 250°C es inerte, mientras que a bajas temperaturas es incorporado en ceolitas (Giggenbach W. , 1991)

Las aguas geotermales contienen todos los iones mayores que se encuentran comúnmente en las aguas subterráneas, pero sus concentraciones son por lo general más altas que en aguas subterráneas no termales. De la misma forma la concentración de los elementos traza es mucho más alta que en las aguas no termales debido a la interacción agua-roca (Chandrasekharam & Bundschuh, 2008).

Debido a la compleja interacción agua-roca existente en un sistema geotermal propuso que un sistema con cercana asociación magmática puede ser descrito en términos de dos procesos extremos, que, si bien son hipotéticos, se encuentran claramente definidos. Estos procesos son:

- Dilución inicial de las rocas corticales en aguas ácidas formadas, por ejemplo, a través de la absorción de vapores magmáticos en aguas de circulación profunda. Las aguas formadas en este proceso de alteración “dominado por fluido” contienen en gran parte de los constituyentes más solubles en proporción cercana a la roca original. La roca resultante de este proceso se encuentra fuertemente empobrecida en los componentes más fáciles de lixiviar.
- Equilibrio final de la fase fluida con “la roca” en esta configuración termodinámicamente estable, generada por la recristalización de la roca original, termodinámicamente inestable. La composición química de esta fase de roca



estable, secundaria, se acerca, o es la misma (isoquímica) a la roca original. Este proceso se completa sólo en teoría en reservorios estacionario de edad infinita. Sin embargo, la composición de los fluidos en estos sistemas de alteración “dominados por roca” es, para un amplio rango de rocas aluminosilicatadas, determinado únicamente por la temperatura y salinidad (contenido de cloruros).

La composición de las aguas, gases y rocas en un sistema dinámico de alteración hidrotermal actual, puede esperarse que corresponda a un estado estacionario intermedio entre los miembros extremos de ambos procesos.

2.9.1. Clasificación de las Aguas Termales en Función de su Composición

Las aguas termales adquieren su composición química mediante un proceso complejo, donde intervienen factores de tipo químico-físico, geológico, hidrogeológico, geomorfológico, pedológico, climático, antrópico y otros Fagundo (1990). De esta manera el criterio de clasificación puede ser asumido de diversos puntos de vista, pero la clasificación geoquímica está basada principalmente en el contenido de macroelementos presentes en el agua, tomando el nombre del anión y el catión predominante.

2.9.1.1. Aguas Cloruradas

Es un tipo muy común en los sistemas geotermales. Su origen puede ser muy profundo de aguas fósiles o capas de sal en rocas sedimentarias muy antiguas o formarse de las reacciones entre HCl magmático y los minerales formadores de roca (Giggenbach W. , 1991).

Su tendencia es un pH neutro. Predomina el ion cloruro acompañado de cationes sodio y potasio, también existe calcio que usualmente es bajo pero variable, dependiendo de su origen puede contener sílice, boro, una significativa pero variable cantidad de sulfatos, bicarbonatos y cantidades mínimas de flúor, amoníaco, arsénico, litio, rubidio y gases disueltos como dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno (Pacheco & Viera, 2015).



2.9.1.2. Aguas Sulfatadas

Es un tipo asociado generalmente a sistemas geotermales volcánicos Truesdell, (1991). En casos especiales (no volcánicos) estas aguas están asociadas a interacción de fluidos con rocas que contengan sulfuro nativo o través de litologías que contengan secuencias sulfato-soportes (ej. Evaporitas) Pacheco & Viera (2015). Dentro de los sistemas geotermales volcánicos, los orígenes de las aguas sulfatadas pueden presentarse cuando el vapor por debajo de los 400° sube desde el agua subterránea de alta temperatura y se condensa en las aguas superficiales en donde sulfuro de hidrógeno del vapor es subsecuentemente oxidado a sulfato en la zona vadosa (región del subsuelo por encima del nivel freático). También se originan cuando se produce absorción y condensación de vapor y gases de la pluma ascendente tomando contacto con aguas subterráneas, acuíferos colgados, agua meteórica de infiltración somera, o lagos volcánicos (aguas sulfatadas vapor calentadas Celis (2012). Su tendencia es un pH ácido en superficie por HCl y/o HSO₄⁻, pero a altas temperaturas estas aguas son casi neutras, ya que la acidez está dada por el HSO₄⁻ que se disocia bajo esas condiciones Arnórsson (2007). En estos ambientes predomina el ion sulfato acompañado de vapor separado y gases no condensables como dióxido de carbono, metano, amoníaco, hidrógeno, sulfuro de hidrógeno, nitrógeno. Debido a su naturaleza generalmente superficial, su significado geoquímico usualmente indica origen superficial.

2.9.1.3. Aguas Bicarbonatadas

Este tipo de aguas puede aparecer tanto en los sistemas geotermales con actividad volcánica y en zonas sísmicamente activas sin volcanismo Arnórsson (2007). Su origen en sistemas geotermales volcánicos se debe cuando el CO₂ es el principal gas contenido en el vapor donde son originadas, ya sea por la disolución del dióxido de carbono o por la condensación de vapor geotérmico en aguas subterráneas libre de oxígeno



relativamente profunda (aguas bicarbonatadas vapor calentadas) Pacheco & Viera (2015). Su origen no volcánico procede de la penetración de las aguas en niveles de rocas sedimentarias con una alta proporción de calcáreas. Tienen una mineralización y alcalinidad más baja que las anteriores Pinagua (2010). Su tendencia es un pH un poco ácido, debido a la disociación de H_2CO_3 , que, a pesar de ser un ácido débil, convierte los feldspatos y arcillas, generando soluciones acuosas neutrales, las cuales son ricas típicamente en sodio y bicarbonato, particularmente a temperatura media-alta Pacheco & Viera (2015). Predomina el ion bicarbonato acompañado de cationes sodio y potasio relacionado con fenómenos volcánicos y catión calcio relacionado a procesos geotermiales en rocas sedimentarias (Pinagua, 2010).

2.9.1.4. Otros Tipos de Aguas Termales

Además de la clasificación geoquímica basada en el contenido de macroelementos presentes, existen otros tipos de clasificaciones para aguas termales tomando en cuenta elementos específicos o procesos que expliquen su origen como: salmueras (de origen volcánico y sedimentario), aguas ferruginosas, aguas radiactivas, aguas sulfuradas y aguas carbogaseosas (Pinagua, 2010).

2.9.2. Química de las Aguas Termominerales

Las aguas termominerales llamadas mineros medicinales, son las mejores para un tratamiento medicinal, desde el punto de vista médico se distinguen de otras 18 aguas por sus acciones fisiológicas, como por sus propiedades físicas, físico - químicas y químicas Armijo (1968). Por esta razón, la evaluación química es la base para la clasificación de estas aguas, reconociendo a los iones predominantes en su composición e iones que tienen un marcado valor terapéutico. Las características vigentes de las aguas minero medicinales, se fijaron en el Congreso Internacional de Crenología Médica en Nauheim, Alemania (1912): “Agua minero medicinal corresponde a las aguas que contienen más de

1 g de materias fijas disueltas en 1000 g de agua, además de un contenido de gas carbónico y de ciertas materias raras encontradas en ella. Finalmente, estas aguas deben tener una temperatura permanentemente mayor que el promedio anual de la temperatura del lugar de la fuente” Prazak (1949). Según el contenido mineral y en base a la definición mencionada, estas aguas medicinales se dividen en dos grupos:

- Aguas medicinales mineralizadas, contienen 1 g o más de materias fijas disueltas por litro.
- Aguas medicinales oligomineralizadas o aguas medicinales mineralizadas simples, que contienen menos de 1 g de materias fijas disueltas y que se distinguen por su contenido de componentes raros fármacos dinámicamente eficaces o por su temperatura elevada.

La tendencia actual de clasificación de estas aguas, consiste en considerar sólo a los componentes mayoritarios, expresados en porcentajes de miliequivalentes iónicos mayores a un 20 % (1, 5), lo cual es más apropiado y puede proporcionar 19 datos de gran valor para deducir consecuencias farmacodinámicas y terapéuticas.

2.9.3. Representación de Datos Hidroquímicos

La representación gráfica de los datos hidroquímicos constituye una herramienta de trabajo muy eficiente en la interpretación de las propiedades de un agua, así como para hacer comparaciones o correlaciones. También permite ver con facilidad el comportamiento y evolución de un agua en un territorio determinado y a través del tiempo.

2.9.3.1. Diagrama de Piper

Los diagramas triangulares de Hill y Piper permiten representar un gran número de muestras en un sólo gráfico. En éstos, los triángulos de aniones y cationes ocupan los

ángulos inferiores izquierdo y derecho con sus bases alineadas. La parte central del diagrama posee forma de rombo y sobre éste se proyectan los puntos de cada uno de los triángulos por medio de una recta paralela al borde superior del rombo. La intersección de estas dos rectas representa la composición del agua con respecto a una determinada agrupación de aniones y cationes.

Para interpretar el diagrama con más detalle, debe considerarse que para su construcción es necesario que los iones estén reducidos a porcentaje de miliequivalentes por litro (meq/l). A cada vértice de un triángulo le corresponde el 100% de un catión o un anión (EcuRed, s.f.) . Ver Figura 18.

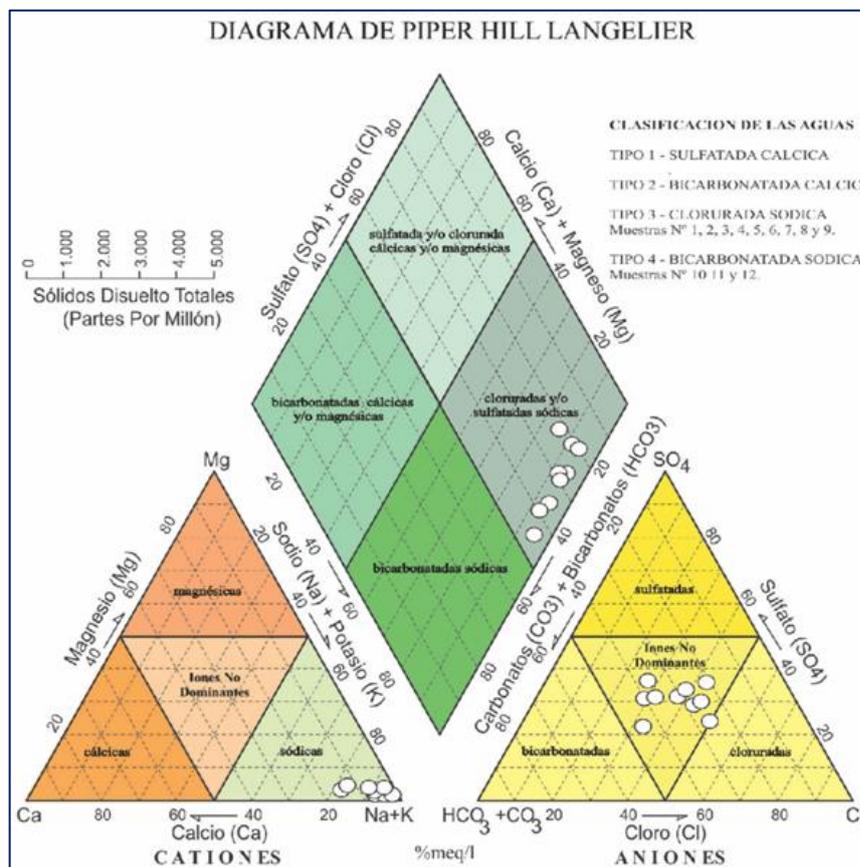


Figura 18. Diagrama de Piper Hill Langelier (EcuRed, s.f.).

2.9.3.2. Diagrama de Schoeller

En los Diagramas de Schoeller o de Columnas Verticales se representa el valor en miliequivalentes por litro (meq/l) de distintos aniones, cationes o una suma de ellos,

utilizando una escala logarítmica, y uniendo los puntos mediante una secuencia de líneas. Este tipo de diagrama de columnas se conoce también como diagramas de Schoeller – Berkaloff.

Si bien la escala logarítmica no es apropiada para observar pequeñas diferencias en la concentración de cada ion entre distintas muestras de agua, sí es útil para representar en un mismo diagrama aguas de baja y de alta salinidad, y observar la relación entre iones asociada con la inclinación de las líneas.

2.9.3.3. Diagramas de Stiff

En los Diagramas de Stiff o Poligonales se representan en escala logarítmica la concentración de aniones (hacia la derecha) y cationes (hacia la izquierda) en semirrectas paralelas, uniendo los extremos generando un polígono. Sobre cada semirrecta se toma un solo ion.

La forma de las figuras resultantes da idea del tipo de agua, se presta a comparaciones, y resulta fácilmente demostrativa al insertarlas en mapas hidroquímicos. El valor de concentración se expresa en miliequivalentes por litro (meq/l). (*EcuRed, s.f.*). Ver Figura 19.

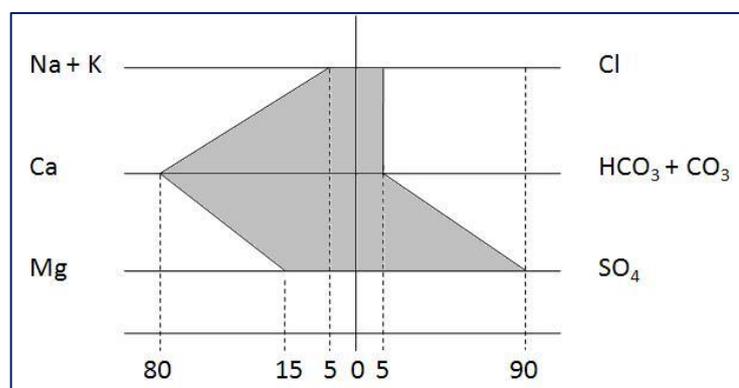


Figura 19. Diagrama de Stiff (*EcuRed, s.f.*)



2.10. AGUAS TERMALES

2.10.1. Historia de Aguas Minero Medicinales en el Perú

El uso de las aguas minero medicinales se conocía desde las épocas pre-inca e incaica. Los pobladores conocían de sus bondades medicinales, por ello, los incas construían tambos en lugares próximos a las fuentes termales, las que aprovechaban en sus viajes como un tratamiento termal con fines medicinales e higiénicos. Como evidencias tenemos los famosos Baños del Inca en Cajamarca, el baño de Tambo Machay y el baño del inca en la ciudadela de Macchu Picchu en Cusco, entre otros. 27. En 1796 el sabio alemán Teodoro Haenke realizó los primeros estudios sobre las termas de Yura, Jesús y Socosani en el Departamento de Arequipa. En 1827 Rivero de Ustaríz determinó los usos de estas aguas con fines curativos. En 1882 el sabio italiano Antonio Raymondi, publicó estudios sobre las aguas minerales del Perú, para cuyo fin recorrió casi todo el territorio nacional. Entre los años de 1900 a 1943 es destacable los trabajos en estas aguas de los doctores Edmundo Escomel, Ramón Cárcamo y Luis Angel Maldonado. En 1950 el gobierno contrató los servicios del Dr. Ladislao J. Prazak, médico cronólogo, estudió el problema del termalismo en el Perú Prazak (1949). En los años de 1971 a 1973 el Ing. Rómulo Zapata Valle publica dos obras tituladas Aguas Minerales del Perú, primera y segunda parte, en donde se encuentran los resultados de los análisis de las aguas minerales del país, clasificándolas en 24 grupos en función a sus iones predominantes Zapata (1973). En 1975 Francisco Loayza Peralta hace un breve análisis de la situación cronológica del país y un inventario del recurso minero medicinal en su publicación Panorama Hidrotermal del Perú.

2.10.2. Tipos de Aguas Termales

En el Perú se tiene en consideración las siguientes clasificaciones:

De acuerdo a su origen geológico:



- a. Magmáticas. - nacen de filones metálicos o eruptivos, cuya temperatura es superior a 50 °C, los elementos encontrados son arsénico, boro, bromo, cobre, fósforo y nitrógeno.
- b. Telúricas. - son aquellas que nacen en cualquier lugar, cuya temperatura es inferior a 50 °C, poseen menor grado de mineralización, los elementos encontrados son bicarbonatos, cloruros, sales de cal, entre otros.

De acuerdo a su temperatura:

- a. Aguas Hipertermales: más de 45 °C
- b. Aguas Meso termales: de 35 a 45 °C
- c. Aguas Hipotermas: de 21 a 35 °C
- d. Aguas frías: menos de 20 °C

De acuerdo a su presión osmótica:

- a. Hipotónicas (osmolidad menor de 0,55)
- b. Isotónicas (osmolidad igual a 0,55)
- c. Hipertónicas (osmolidad mayor de 0,55)

La clasificación considerada universal y la que resulta más aceptada es la propuesta por Castany (1971) quien los clasifica en:

- a. Frías: menos de 20 °C
- b. Hipotermas: entre 20 y 35 °C
- c. Mesotermal: entre 35 y 50 °C
- d. Hipertermal: entre 50 y 100 °C

Con relación al pH, en Bulgaria se clasifican las aguas termales en:



- Aguas con fuerte reacción ácida: $\text{pH} < 3.5$
- Aguas con moderada reacción ácida: $\text{pH} 3.5 - 5.5$
- Aguas con ligera reacción ácida: $\text{pH} 5.5 - 6.8$
- Aguas con reacción neutra: $\text{pH} 6.8 - 7.2$
- Aguas con reacción alcalina: $\text{pH} 7.2 - 8.5$
- Aguas con reacción alcalina moderada: $\text{pH} 8.5 - 9.5$
- Aguas con fuerte reacción alcalina: $\text{pH} > 9.5$

2.11. CONTAMINACIÓN AMBIENTAL

Contaminación se define como la presencia en el ambiente de cualquier agente químico, físico o biológico o de una combinación de varios agentes, en lugares, formas y concentraciones tales que sean o puedan ser nocivos para la salud, seguridad o bienestar de la población, o perjudiciales para la vida animal o vegetal. Asimismo, la contaminación es uno de los problemas ambientales más importantes que afectan a nuestro mundo y surge cuando se produce un desequilibrio, como resultado de la adición de cualquier sustancia al medio ambiente, en cantidad tal, que cause efectos adversos en el hombre, en los animales, vegetales o materiales expuestos a dosis que sobrepasen los niveles aceptables en la naturaleza.

2.11.1. Tipos de contaminación ambiental

2.11.1.1. Contaminación del agua

La contaminación acuática es la incorporación de materias extrañas, como microorganismos, productos químicos, residuos industriales, metales pesados, aguas residuales, petróleo, basuras y demás que deterioran la calidad del agua y en ocasiones

alteran sus propiedades físicas y la hacen inútil para usos productivos (Badillo, 1985).

2.11.1.2. Contaminación del suelo

- Las causas de este tipo de contaminación más frecuentes, se deben a la presencia de compuestos químicos procesados y que se producen por la ruptura de tanques de almacenamiento subterráneos filtración de desechos líquidos industriales o domésticos.
- Tecnología agrícola nociva.
- Eliminación inadecuada de basuras y desechos industriales.

2.11.1.3. Contaminación atmosférica

Este tipo de contaminación se debe específicamente a la presencia dentro del aire, de sustancias tóxicas como gases nocivos o partículas sólidas que produzcan riesgos y daños graves a personas, animales, vegetales o bienes de cualquier naturaleza o generen olores desagradables (Badillo, 1985).

2.12. METALES PESADOS

Los metales pesados son un grupo de elementos químicos que presentan una densidad relativamente alta y cierta toxicidad para el ser humano.

Muchos de los metales que tienen una densidad alta no son especialmente tóxicos y algunos son elementos esenciales en el ser humano, independientemente de que a determinadas concentraciones puedan ser tóxicos en alguna de sus formas. Sin embargo, hay una serie de elementos que en alguna de sus formas pueden representar un serio problema medioambiental y es común referirse a ellos con el término genérico de "metales pesados".

La peligrosidad de los metales pesados es mayor al no ser química ni biológicamente degradables. Una vez emitidos, principalmente debido a la actividad



industrial y minera, pueden permanecer en el ambiente durante cientos de años, contaminando el suelo y acumulándose en las plantas y los tejidos orgánicos. Además, su concentración en los seres vivos aumenta a lo largo de la cadena alimentaria.

Los metales pesados tóxicos más conocidos son el mercurio, el plomo y el cadmio. (AESAN, 2015)

¿Por qué los metales pesados son tan peligrosos?

Los metales pesados catalizan reacciones de oxidación, estimulando por tanto la producción de radicales libres. Impiden la absorción de minerales (por ejemplo, zinc y magnesio), y elementos traza, necesarios para las reacciones enzimáticas, causando así innumerables bloqueos metabólicos.

Pueden cambiar la estructura de las proteínas y, por supuesto, de los anticuerpos de nuestro sistema inmunológico. Las estructuras lipídicas que están presentes en todas las células pueden modificarse, por lo que la entrada y salida de nutrientes puede verse afectada.

No confundir con los minerales traza como el Boro, Cromo, Cobalto, Cobre, Germanio, Yodo, Hierro, Manganeso, Selenio, Silicio, Vanadio y Zinc que se necesitan en el organismo en cantidades diminutas.

En general, la exposición a metales pesados a lo largo del tiempo está relacionada con varios tipos de cáncer, problemas en el desarrollo de fetos y niños, artritis, enfermedades cardiovasculares, dolencias renales, etc. (Axon up, s.f.)

Vías de Entrada y Origen de los Metales Pesados en los Sistemas Acuáticos

Los metales tienen tres vías principales de entrada en el medio acuático, Figura 20:

a) La vía atmosférica, se trata de la sedimentación de partículas emitidas a la atmósfera por procesos naturales o antropogénicos (principalmente combustión de combustibles

fósiles y procesos de fundición de metales).

b) La vía terrestre, producto de filtraciones de vertidos, de la escorrentía superficial de terrenos contaminados (minas, utilización de lodos como abono, lixiviación de residuos sólidos, precipitación atmosférica, etc.) y otras causas naturales.

c) La vía directa, son los vertidos directos de aguas residuales industriales y urbanas a los cauces fluviales.

En los sistemas acuáticos continentales (ríos, lagos, embalses, etc.), los metales pesados están presentes como resultado de la acción de procesos naturales y antropogénicos. Así, se distingue entre un origen natural de metales pesados y otro antropogénico, si bien en la práctica la distinción entre una contaminación de origen industrial, doméstico o natural y la producida por actividades mineras resulta difícil de discernir.

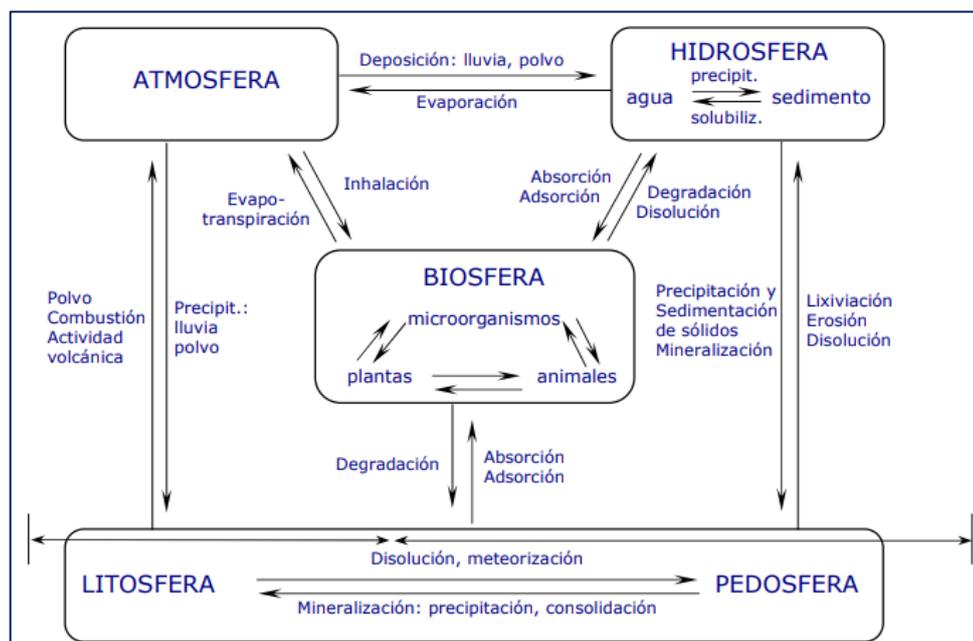


Figura 20. Ciclo geoquímico general de los metales pesados.

2.13. CALIDAD DEL AGUA

La calidad del agua es una medida de la condición del agua en relación con los requisitos de una o más especies y/o a cualquier necesidad o propósito humano. Esta



condición se mide generalmente con las características químicas, físicas y biológicas del agua y se evalúa de acuerdo a su propósito. Los criterios se basan en niveles específicos de contaminantes que harían dañina el agua si se usa para beber, la natación, la agricultura, producción de pescado o para usos industriales, etc. Asimismo, define los estándares de calidad del agua como los estándares ambientales para los cuerpos de agua adoptados por el estado y aprobados por la EPA. Los requerimientos de la calidad del agua varían de acuerdo con el uso que se le vaya a dar, por ejemplo, para agricultura, pesca, propagación de vida silvestre, usos recreativos o industriales específicos o generación de energía. Algunas características del agua adecuadas para un fin pueden no serlo para otro. Es importante mencionar que no se deben confundir los requerimientos de la calidad del agua con los estándares de la calidad del agua. Los primeros están basados en la experiencia de uso y los segundos son cantidades establecidas por instituciones gubernamentales que regulan al respecto (Arellano, 2002).

2.14. PARÁMETROS FÍSICO QUÍMICOS

Los parámetros físico-químicos dan una información extensa de la naturaleza de las especies químicas del agua y sus propiedades físicas, sin aportar información de su influencia en la vida acuática, los métodos biológicos aportan esta información, pero no señalan nada acerca de los contaminantes o los contaminantes responsables.

A continuación, veremos algunas de las características físico-químicas del agua.

2.14.1. Salinidad

La salinidad del agua es el contenido total de sales. Así la cantidad de cloruro sódico es una parte de esta salinidad y la dureza del agua (sales de magnesio y calcio) es otra parte de la salinidad del agua.

Las sales más frecuentes en el agua son las de calcio, magnesio y sodio. En aguas no salobres, el 90 % del contenido de sales en el agua, son por presencia de calcio y



magnesio.

2.14.2. Temperatura

Es uno de los parámetros físicos más importantes en el agua, pues por lo general influye en el desarrollo de la vida acuática como también sobre las reacciones químicas y velocidades de reacción. La temperatura no es un indicador de la calidad del agua, pero influye en el comportamiento de otros indicadores de calidad del recurso hídrico, como el pH, déficit de oxígeno, conductividad eléctrica, y otras variables fisicoquímicas.

La importancia de la temperatura se basa en que el oxígeno es menos soluble en agua caliente que en agua fría. Las temperaturas elevadas son indicadores de actividad biológica, es decir, proliferación de microorganismos, plantas acuáticas y hongos. La temperatura óptima de un agua potable esta entre 4 °C a 15 °C (Spellman , J., 2004).

2.14.3. Ph (potencial de hidrogeniones)

El pH es una medida de la acidez o basicidad de una solución. El pH es la concentración de iones o cationes hidrógeno [H⁺] presentes en determinada sustancia. La sigla significa "potencial de hidrógeno".

Por otro lado, el pH se mide entre 0 a 14 en solución acuosa, siendo acidas las soluciones con pH menores de 7 y básicamente las mayores de 7. El pH igual a 7 indica la neutralidad de una sustancia. Las aguas naturales pueden tener pH acido debido al SO₂ y CO₂ disueltos en la atmosfera, CO₃ de los suelos calizos, porque provienen de los seres vivos o por el ácido sulfúrico procedente de algunos minerales. Las aguas contaminadas con zonas de descargas industriales pueden tener un pH muy acido.

El pH es un factor muy importante en los sistemas químicos y biológicos de las aguas naturales. El valor del pH compatible con la vida piscícola está comprendido entre 5 y 9. Sin embargo, para la mayoría de las especies acuáticas, la zona de pH favorable se sitúa entre 6.0 y 7.2. Fuera de este rango no es posible la vida como consecuencia de la



desnaturalización de las proteínas.

2.14.4. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica de una solución es una medida de la capacidad de la misma para transportar la corriente eléctrica y permite conocer la concentración de especies iónicas presentes en el agua. Como la contribución de cada especie iónica a la conductividad es diferente, su medida da un valor que no está relacionado de manera sencilla con el número total de iones en solución. Depende también de la temperatura. Está relacionada con el residuo fijo por la expresión:

$$\text{Conductividad } (\mu\text{S/cm}) \times f = \text{residuo fijo (mg/L)}$$

El valor de f varía entre 0.55 y 0.9.

En soluciones acuosas el valor de la conductividad es directamente proporcional a la concentración de sólidos disueltos. Por lo tanto, cuanto mayor sea dicha concentración mayor será la conductividad, como puede observarse en los valores apuntados a continuación:

- Agua pura: 0,055 $\mu\text{S/cm}$.
- Agua destilada: 0,5 $\mu\text{S/cm}$.
- Agua de montaña: 1,0 $\mu\text{S/cm}$.
- Agua de uso doméstico: 500-800 $\mu\text{S/cm}$. 39
- Agua de mar: 50.000-60.000 $\mu\text{S/cm}$.

2.14.5. Dureza

La dureza del agua corresponde a la suma de calcio y magnesio, a los que se añaden los iones hierro, aluminio, manganeso, etc.

La dureza del agua está formada por las sales de calcio y de magnesio. La dureza procedente de las sales de calcio se llama dureza cálcica y la dureza procedente de las



sales de magnesio se llama dureza magnésica.

La dureza carbonatada se denomina dureza temporal y la dureza no carbonatada dureza permanente. Se llama dureza temporal porque cuando el agua hierve a 100° desaparece por descomposición de los bicarbonatos y precipitación en forma de carbonatos, la permanente no sufre este proceso.

2.14.6. Sólidos disueltos totales (TDS)

El agua puede contener tanto partículas en suspensión (residuo no filtrable) como compuestos solubilizados o disueltos (residuo filtrable), definiéndose la suma de ambos como Sólidos totales Aznar Jiménez (2000). La alta concentración de sólidos totales origina una baja calidad del agua y problemas de balance del agua para algunos organismos individuales. Las principales fuentes de las que proceden los sólidos totales vienen a ser la erosión de los suelos consecuencia de la deforestación, que genera la pérdida de cobertura vegetal, elevando la carga de sedimentos especialmente de carácter inorgánico, y el aporte de las aguas residuales procedentes de las ciudades.

Los sólidos sedimentables son los causantes de la turbidez debido a que producen dispersión de la luz que atraviesa la muestra de agua Aznar Jiménez (2000). Los sólidos disueltos pueden afectar adversamente la calidad de un cuerpo de agua o un efluente de varias formas. Aguas para el consumo humano, con un alto contenido de sólidos disueltos, son por lo general de mal agrado para el paladar y pueden inducir una reacción fisiológica adversa en el consumidor (Kiely, 1999).

2.14.7. Oxígeno disuelto (DO)

La concentración de oxígeno aumenta a medida que disminuye la temperatura del agua y a medida que aumenta la turbulencia y la mezcla del agua. Así una corriente rápida, poco profunda y turbulenta tiene mayores niveles de OD que un río lento y profundo.

La presencia de oxígeno es una señal positiva de vida acuática, mientras que su



ausencia indica una fuerte contaminación, por lo que cualquier tipo de perturbación que reduzca los niveles de OD tendrá un efecto dramático en el funcionamiento de las comunidades y los ecosistemas (Kiely, 1999).

La concentración de OD, depende de:

- La temperatura del agua.
- La presión barométrica (altitud).
- Presencia o ausencia de plantas fotosintetizadoras (micrófitas y macrófitas).
- La cantidad de materia orgánica que se halla en descomposición.
- Del grado de penetración de la luz; la que está en función de la profundidad y
- turbidez. (Kiely. 1999).

2.14.8. Resistencia eléctrica (Ωcm)

Es una medida de la capacidad de una solución acuosa para transmitir una corriente eléctrica y es igual al recíproco de la resistividad de la solución. Dicha capacidad depende de la presencia de iones; de su concentración, movilidad y valencia, y de la temperatura ambiental. Las soluciones de la mayoría de los compuestos inorgánicos (ej. aniones de cloruro, nitrato, sulfato y fosfato) son relativamente buenos conductores.

2.15. ELEMENTOS QUÍMICOS QUE INFLUYEN EN LA UTILIZACIÓN DE LAS AGUAS

Todas las aguas naturales poseen diversas cantidades de sales, gases y/o algunos compuestos orgánicos, siendo éstos los que determinan sus características físicas, químicas y sus propiedades medicinales. Teniendo en cuenta que las apreciaciones referentes a las propiedades medicinales competen a la hidrología médica, sólo mencionaremos algunos conceptos generales.

Algunas de las propiedades medicinales de las aguas termales y minerales se



indican a continuación:

- Las aguas bicarbonatadas-sulfatadas sódicas pueden ser utilizadas para el tratamiento del reuma, afecciones traumatológicas, de la piel, del aparato respiratorio y del sistema nervioso, como bebida para las afecciones del hígado y del estómago; y las bicarbonatadas-sulfatadas cálcicas como diuréticas.
- Las aguas cloruradas, que son estimulantes para la cicatrización y defensas orgánicas en afecciones óseas, ganglionares y cutáneas, para los tratamientos en los procesos reumáticos crónicos, afecciones ginecológicas y del aparato circulatorio.
- Las aguas ferruginosas para el tratamiento de anemias con hiposiderosis, en estados asténicos, convalecencias y en trastornos de la infancia, debiendo para ello ingerirse al pie del manantial, ya que, en contacto con el oxígeno del aire, el ion ferroso pasa a férrico, el cual precipita en forma de oxi-hidróxido férrico, siendo imposible asimilarlo. En el caso de los oligoelementos, algunos pueden actuar favorablemente en la salud humana. Como por ejemplo el litio (Li) que es aconsejable para el tratamiento en el caso de formación de cálculos renales de ácido úrico; el yodo (I) para evitar el bocio y desarrollar el sistema nervioso central; el zinc (Zn) que interviene en el proceso curativo de las heridas, en el crecimiento y en el sistema inmunológico.

Al margen de las nociones antes mencionadas, debemos tener presente que existen asimismo límites máximos permisibles de la composición química de las aguas para uso doméstico, los cuales también son utilizados para las aguas termales y minerales, establecidos tanto por normas nacionales como las internacionales. En el presente estudio se tuvo en cuenta los parámetros establecidos por la OMS para la calidad de las aguas de



consumo humano y la Ley General de Aguas del Perú (LGA), que establecen los valores límites para las aguas de zonas recreativas de contacto primario (baños y similares) de acuerdo al D.S. N° 261-69 AP, Art. 81, clase IV, para los baños. Asimismo, se recurrió a parámetros de otras naciones latinoamericanas y europeas, con la finalidad de comparar y establecer relaciones sobre algunos elementos no contemplados en dichas normas.

De acuerdo a la composición hidroquímica de las diferentes fuentes termales, en el área de estudio se establecieron tres categorías de aguas.

- Apta, aquellas aguas que no tienen restricción para su utilización, ya sea para bebida o para baños, por reportar contenidos hidroquímicos dentro de los límites establecidos por la OMS o por la LGA del Perú.
- No recomendable, aquellas aguas que reportan elementos químicos que afectan las propiedades de su sabor, en el caso de bebidas; y la posibilidad de afectar dermatológicamente a las personas que tienen contraindicaciones, en caso de su utilización en baños termales.

No apta, aquellas aguas que reportan valores de elementos tóxicos nocivos para la salud humana que sobrepasan los límites establecidos por la OMS para consumo humano, tales como plomo (Pb), mercurio (Hg), arsénico (As), etc. Este último elemento (arsénico), por ejemplo, es un elemento cancerígeno que afecta a las personas en el caso de ser ingerido de manera constante.

Se debe tener en cuenta que las aguas clasificadas como no recomendables no necesariamente son prohibidas para su utilización, puesto que sólo serán perjudiciales en distintas magnitudes para aquellas personas que tengan contraindicaciones de los elementos que sobrepasan los límites establecidos por las distintas normas. Lo cual quiere decir que las personas ajenas a estas contraindicaciones podrán utilizarlas sin perjuicio alguno. Es el caso, por ejemplo, de algunas fuentes Termominerales que son utilizadas



actualmente con fines “medicinales” sin haber tenido un análisis hidroquímico previo, tan sólo aludiendo a experiencias de personas que bebiéndolas de alguna manera han obtenido beneficios. Por otro lado, se ha constatado que estas mismas aguas han causado alteraciones orgánicas a otras personas. Este hecho se observa en casi todas las fuentes de nuestro territorio.

2.16. PARÁMETROS QUÍMICOS QUE INFLUYEN EN LA UTILIZACIÓN DE LAS AGUAS

De acuerdo a las normas nacionales e internacionales, existen parámetros reguladores en la composición química de las aguas para uso doméstico, los cuales también son utilizados para las aguas termales y minerales. En el Perú, la Ley General de Aguas establece los valores límites para las aguas de zonas recreativas de contacto primario (baños y similares) de acuerdo al D.S. No 261-69 AP, Art. 81, clase IV En el presente estudio se tuvo en cuenta los parámetros establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para la calidad de las aguas de consumo humano y la Ley General de Aguas del Perú para los baños. También se recurrió a parámetros de otras naciones latinoamericanas y europeas, con la finalidad de comparar y establecer relaciones sobre algunos elementos no contemplados en dichas normas. En el análisis de agua de las fuentes termales se observó que en alguno de ellos existen elementos perjudiciales para la salud humana. Así, por ejemplo, se encontraron algunas fuentes con altos valores de As, elemento cancerígeno, de U que es un elemento perjudicial para las personas que sufren de psoriasis, de Ba dañino para la salud humana y otros elementos como Cl, Fe, Mn, S04 que afectan el sabor de las aguas.

Tabla 1. Valores límites máximos permisibles de los parámetros químicos establecidos, tanto para el consumo humano como para baños termales.

Parámetros químicos	Límite máximo permisible	
	Para beber (OMS)	Para baños (LGA)
	1995 mg/l	1969 mg/l
Hierro	0.3	-
Manganeso	0.1	-
Aluminio	0.2	1
Cobre	1	3
Litio	-	5
Plomo	0.01	0
Arsénico	0.01* (0.05)	1
Bario	0.7	0.5
Cadmio	0.003	-
Mercurio	0.001	-
Fluoruros	1.5	-
Sulfatos	250	-
Cloruros	250	-
Nitratos	50	-

* Este valor fue introducido en el año 1995; pero en la mayoría de países a nivel mundial, sobre todo en países latinoamericanos incluyendo el Perú, se siguen utilizando el valor límite de 0.05 mg/l formulado en el año 1971.

2.16.1. Arsénico (As)

El arsénico es un elemento contaminante común en aguas subterráneas que afecta la salud humana adversamente a niveles tan bajos como 10 ug/L, está presente en el medio ambiente, tanto en formas inorgánicas y orgánicas. El As inorgánico se considera más tóxica y se encuentra en aguas subterráneas y superficiales. Diversos autores atribuyen al As como un elemento no esencial en la biota, su presencia origina riesgos en muchos entornos sobre todo en la salud humana, enfermedades como cánceres internos, cardiovasculares, neurológicos, incluyendo la piel se han atribuido a la exposición crónica del arsénico; adicionalmente el uso de aguas subterráneas con alto contenido de arsénico en la agricultura tiene resultados en la bioacumulación de As y elevados niveles de arsénico han sido reportados en los vegetales y en el arroz. En el agua el As se presenta en dos estados de oxidación: As(V), As(III); el arsenito es más peligroso que el arsenato (Organización Mundial de la Salud, 2019).

Arsénico en el medio ambiente

El arsénico aparece en la naturaleza como arsénico nativo y también como arseniato, sulfuro, óxido, sulfato, sulfosal, arseniuro y arsenito. Entre los minerales más



comunes se encuentra la pirita arsénica $Fe(SAs)_2$ que puede contener más del 10% de arsénico, la arsenopirita ($FeAsS$), el rejalgar (AsS), el oropimente (As_2S_3), la cobaltita ($CoAsS$), la niquelita ($NiAs$) y la escorodita ($FeAsO_4 \cdot 2H_2O$). Respecto a los sulfoarseniuros, probablemente la fuente más importante de arsénico en zonas mineralizadas sea la pirita. Por su parte, el rejalgar (As_4S_4) y el oropimente (As_2S_3), que pueden aparecer asociados a depósitos de oro y metales de base, son las formas reducidas de arsénico más frecuentes. El arsénico es un componente también de algunos sulfuros complejos, como la enargita (Cu_3As_4) y la tenantita $(Cu,Fe)_{12}As_4S_{13}$. En cualquier caso, la fuente primaria más importante de arsénico son los sulfuros.

Fuentes de Arsénico en el medio ambiente:

- Emisiones volcánicas y aguas termales.
- Se disuelven en aguas subterráneas a partir de la interacción con la roca (movilización de fuentes ígneas y sedimentarias, disolución oxidativa de minerales de sulfuro con contenido de ácido).
- Residuos mineros, efluentes de minas a pH medio y estanques de relaves.
- Desechos de fundición de metales industriales.
- Combustión de combustibles fósiles en centrales eléctricas.
- Arsénicos y gases emitidos durante la fabricación del cemento.
- Trióxido de arsénico en la fabricación de vidrio.

La vía principal por la cual se elimina el arsénico es a través de la orina. Estudios han demostrado que aproximadamente el 33-38% de una dosis de arsénico ingerida se elimina de la orina en 48 horas y del 45-58% en 4-5 días. La eliminación de $As(V)$ ingerido es ligeramente más rápida que para $As(III)$. El arsénico afecta a prácticamente



todos los aparatos y sistemas del cuerpo, puesto que interfiere con reacciones enzimáticas de amplia distribución. Los efectos más claros de la exposición al arsénico se observan en la piel. Algunos estudios identifican otros lugares como resultado de exposiciones similares al arsénico a las que producen lesiones cutáneas. Las bases de datos sobre estas lesiones son más sólidas que para otras partes del cuerpo. Algunos de los efectos fisiológicos de la exposición al arsénico son:

- Hiperpigmentación cutánea en parches, queratosis focal pequeña, y otras lesiones dérmicas que aparecen posteriormente a una exposición alta y crónica al arsénico.
- El arsénico puede provocar cáncer en pulmón y piel, e inclusive puede causar otros tipos de cánceres. (IARC, 2004).

Efectos gastro-intestinales

Los efectos gastrointestinales (GI) del arsénico generalmente son resultado directo de la ingesta de este elemento. Sin embargo, otras rutas de exposición diferentes pueden producir también efectos GI. Se observan menos comúnmente después de la inhalación o de la absorción por vía dérmica.

Efectos hepáticos

La toxicidad aguda al arsénico puede asociarse a una necrosis hepática y a niveles elevados de las enzimas hepáticas.

Efectos renales

El arsénico puede tener efectos negativos en los riñones, se ha reportado insuficiencia renal crónica por necrosis cortical. Hay una fuerza de asociación limitada entre la exposición crónica al arsénico y el cáncer renal (IARC, 2004).

2.16.2. Plomo (pb)

El plomo es un metal tóxico presente de forma natural en la corteza terrestre. Su uso generalizado ha dado lugar en muchas partes del mundo a una importante



contaminación del medio ambiente, un nivel considerable de exposición humana y graves problemas de salud pública.

- El plomo es una sustancia tóxica que se va acumulando en el organismo afectando a diversos sistemas del organismo, con efectos especialmente dañinos en los niños de corta edad, se distribuye por el organismo hasta alcanzar el cerebro, el hígado, los riñones y los huesos y se deposita en dientes y huesos, donde se va acumulando con el paso del tiempo. Para evaluar el grado de exposición humana, se suele medir la concentración de plomo en sangre.

Entre las principales fuentes de contaminación ambiental destacan la explotación minera, la metalurgia, las actividades de fabricación y reciclaje y, en algunos países, el uso persistente de pinturas y gasolinas con plomo. Más de tres cuartas partes del consumo mundial de plomo corresponden a la fabricación de baterías de plomo-ácido para vehículos de motor. Sin embargo, este metal también se utiliza en muchos otros productos, como pigmentos, pinturas, material de soldadura, vidrieras, vajillas de cristal, municiones, esmaltes cerámicos, artículos de joyería y juguetes, así como en algunos productos cosméticos y medicamentos tradicionales. También puede contener plomo el agua potable canalizada a través de tuberías de plomo o con soldadura a base de este metal. En la actualidad, buena parte del plomo comercializado en los mercados mundiales se obtiene por medio del reciclaje.

Los niños de corta edad son especialmente vulnerables a los efectos tóxicos del plomo, que puede tener consecuencias graves y permanentes en su salud, afectando en particular al desarrollo del cerebro y del sistema nervioso. El plomo también causa daños duraderos en los adultos, por ejemplo, aumentando el riesgo de hipertensión arterial y de lesiones renales. En las embarazadas, la exposición a concentraciones elevadas de plomo puede ser causa de aborto natural, muerte fetal, parto prematuro y bajo peso al nacer, y



provocar malformaciones leves en el feto.

Fuentes y vías de exposición

Las personas pueden verse expuestas al plomo en su puesto de trabajo o en su entorno, principalmente a través de:

- La inhalación de partículas de plomo generadas por la combustión de materiales que contienen este metal (por ejemplo, durante actividades de fundición, reciclaje en condiciones no seguras o decapado de pintura con plomo, o al utilizar gasolina con plomo);
- La ingestión de polvo, agua o alimentos contaminados (por ejemplo, agua canalizada a través de tuberías de plomo o alimentos envasados en recipientes con esmalte de plomo o soldados con este metal).

La exposición al plomo también puede causar anemia, hipertensión, disfunción renal, inmunotoxicidad y toxicidad reproductiva. Se cree que los efectos neurológicos y conductuales asociados al plomo son irreversibles.

No existe un nivel de concentración de plomo en sangre que pueda considerarse exento de riesgo. Incluso una concentración sanguínea de 5 $\mu\text{g}/\text{dl}$ puede afectar a la inteligencia de los niños y causar problemas de comportamiento y dificultades de aprendizaje. Cuanto mayor es el nivel de exposición, más aumentan la diversidad y la gravedad de los síntomas y efectos asociados. (Organización Mundial de la Salud, 2019)

2.16.3. Cadmio(cd)

El cadmio es designado como clase B1 cancerígeno sobre la base en estudios de animales en la cual el metal fue administrado vía inhalación o intramuscular o inyección subcutánea. Debido a su toxicidad se encuentra sujeto a una de las legislaciones más severas en términos ambientales y de salud humana; en la vida acuática, puede incorporarse a los peces por dos rutas: ingestión e introducción en las agallas



acumulándose en el hígado, riñones y tracto gastrointestinal. En el hombre sus efectos pueden ser agudos o crónicos. Los alimentos que más contribuyen a la ingesta de cadmio son los vegetales en conjunto, seguidos por los pescados.

El cadmio es muy tóxico y se le han atribuido algunos casos de intoxicación con alimentos, se encuentra en concentraciones por debajo de 0.01ppm, en aguas y se introducen por descargas de desechos industriales y por lo general se encuentran en aguas superficiales.

2.16.4. Antimonio (Sb)

¿Cómo puede perjudicar mi salud el antimonio?

La exposición a altos niveles de antimonio puede producir una variedad de efectos perjudiciales para la salud.

Respirar altos niveles de antimonio por largo tiempo puede irritar los ojos y los pulmones, y puede causar trastornos del corazón y de los pulmones, dolor de estómago, diarrea, vómitos y úlceras estomacales.

En estudios de exposición breve, los animales que respiraron niveles muy altos de antimonio fallecieron. Los animales que respiraron altos niveles sufrieron daño a los pulmones, el corazón, el hígado y los riñones. Los animales que respiraron niveles muy bajos de antimonio por largo tiempo sufrieron irritación a los ojos, caída del pelo, daño al pulmón y trastornos al corazón. También se observaron efectos sobre la fertilidad en ratas que respiraron niveles muy altos de antimonio por unos meses.

Ingerir grandes cantidades de antimonio puede causar vómitos, sin embargo, no se sabe que otros efectos pueden ocurrir al ingerir antimonio. Los estudios de larga duración en animales han demostrado lesiones del hígado y alteraciones en la sangre. El antimonio puede irritar la piel si no se remueve prontamente.

El antimonio puede tener efectos beneficiosos cuando se usa por razones médicas.



Se ha usado en medicina para tratar gente infectada con parásitos.

¿Qué le sucede al antimonio cuando entra al medio ambiente?

- El antimonio es liberado al medio ambiente desde fuentes naturales e industriales.
- Puede permanecer en el aire adherido a partículas muy pequeñas por muchos días.
- La mayoría del antimonio en el aire se deposita en el suelo, en donde se adhiere firmemente a partículas que contienen hierro, manganeso o aluminio.

¿Cómo puede ocurrir la exposición al antimonio?

- Debido a que el antimonio ocurre naturalmente en el medio ambiente, la población general está expuesta diariamente a bajos niveles de esta sustancia principalmente en los alimentos, el agua potable y el aire.
- Se puede encontrar antimonio en el aire cerca de industrias que lo procesan o lo liberan, tales como fundiciones, plantas donde se quema carbón, y donde se incinera basura.
- En áreas contaminadas que contienen altos niveles de antimonio, puede encontrarse en el aire, el agua y el suelo.
- Trabajadores en industrias que procesan o usan minerales de antimonio pueden estar expuestos a niveles de antimonio más altos. (ATSDR, 1992)

2.17. NORMATIVIDAD LEGAL VIGENTE

2.17.1. Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM

El presente Decreto supremo establece los niveles de concentración de los elementos, sustancias, parámetros físicos y químicos y biológicos, presentes en el agua en su condición de cuerpo receptor y componente básico de los ecosistemas acuáticos que no represente riesgo significativo para la salud de las personas ni para el ambiente.



Asimismo, la norma compila las disposiciones aprobadas mediante el Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM, el Decreto Supremo N° 023-2009-MINAM y el Decreto Supremo N° 015-2015-MINAM, que aprueban los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua, quedando sujetos a lo establecido en el presente Decreto Supremo y el Anexo que forma parte integrante del mismo. Esta compilación normativa modifica y elimina algunos valores, parámetros, categorías y subcategorías de los ECA, y mantiene otros, que fueron aprobados por los referidos Decretos Supremos.

2.17.2. Categorías de los Estándares de Calidad Ambiental para Agua

Para la aplicación de los ECA para Agua se debe considerar las siguientes precisiones sobre sus categorías:

Categoría 1: Poblacional y recreacional

a) Subcategoría A: Aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable

Entiéndase como aquellas aguas que, previo tratamiento, son destinadas para el abastecimiento de agua para consumo humano:

A1. Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección

Entiéndase como aquellas aguas que, por sus características de calidad, reúnen las condiciones para ser destinadas al abastecimiento de agua para consumo humano con simple desinfección, de conformidad con la normativa vigente.

A2. Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional

Entiéndase como aquellas aguas destinadas al abastecimiento de agua para consumo humano, sometidas a un tratamiento convencional, mediante dos o más de los



siguientes procesos: Coagulación, floculación, decantación, sedimentación, y/o filtración o procesos equivalentes; incluyendo su desinfección, de conformidad con la normativa vigente.

A3. Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado

Entiéndase como aquellas aguas destinadas al abastecimiento de agua para consumo humano, sometidas a un tratamiento convencional que incluye procesos físicos y químicos avanzados como precloración, micro filtración, ultra filtración, nanofiltración, carbón activado, ósmosis inversa o procesos equivalentes establecidos por el sector competente.

b) Subcategoría B: Aguas superficiales destinadas para recreación

Entiéndase como aquellas aguas destinadas al uso recreativo que se ubican en zonas marino costeras o continentales. La amplitud de las zonas marino costeras es variable y comprende la franja del mar entre el límite de la tierra hasta los 500 m de la línea paralela de baja marea. La amplitud de las zonas continentales es definida por la autoridad competente:

B1. Contacto primario

Entiéndase como aquellas aguas destinadas al uso recreativo de contacto primario por la Autoridad de Salud, para el desarrollo de actividades como la natación, el esquí acuático, el buceo libre, el surf, el canotaje, la navegación en tabla a vela, la moto acuática, la pesca submarina o similares.

B2. Contacto secundario



Entiéndase como aquellas aguas destinadas al uso recreativo de contacto secundario por la Autoridad de Salud, para el desarrollo de deportes acuáticos con botes, lanchas o similares.

Categoría 2: Extracción, cultivo y otras actividades marino costeras y continentales

a) Subcategoría C1: Extracción y cultivo de moluscos, equinodermos y tunicados en aguas marino costeras

Entiéndase como aquellas aguas cuyo uso está destinado a la extracción o cultivo de moluscos (Ej.: ostras, almejas, choros, navajas, machas, conchas de abanico, palabritas, mejillones, caracol, lapa, entre otros), equinodermos (Ej.: erizos y estrella de mar) y tunicados.

b) Subcategoría C2: Extracción y cultivo de otras especies hidrobiológicas en aguas marino costeras.

Entiéndase como aquellas aguas destinadas a la extracción o cultivo de otras especies hidrobiológicas para el consumo humano directo e indirecto. Esta subcategoría comprende a los peces y las algas comestibles.

c) Subcategoría C3: Actividades marino portuarias, industriales o de saneamiento en aguas marino costeras

Entiéndase como aquellas aguas aledañas a las infraestructuras marino portuarias, actividades industriales o servicios de saneamiento como los emisarios submarinos.

d) Subcategoría C4: Extracción y cultivo de especies hidrobiológicas en lagos o lagunas



Entiéndase como aquellas aguas cuyo uso está destinado a la extracción o cultivo de especies hidrobiológicas para consumo humano.

Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales

a) Subcategoría D1: Riego de vegetales

Entiéndase como aquellas aguas utilizadas para el riego de los cultivos vegetales, las cuales, dependiendo de factores como el tipo de riego empleado en los cultivos, la clase de consumo utilizado (crudo o cocido) y los posibles procesos industriales o de transformación a los que puedan ser sometidos los productos agrícolas:

Agua para riego no restringido

Entiéndase como aquellas aguas cuya calidad permite su utilización en el riego de: cultivos alimenticios que se consumen crudos (Ej.: hortalizas, plantas frutales de tallo bajo o similares); cultivos de árboles o arbustos frutales con sistema de riego por aspersión, donde el fruto o partes comestibles entran en contacto directo con el agua de riego, aun cuando estos sean de tallo alto; parques públicos, campos deportivos, áreas verdes y plantas ornamentales; o cualquier otro tipo de cultivo.

Agua para riego restringido

Entiéndase como aquellas aguas cuya calidad permite su utilización en el riego de: cultivos alimenticios que se consumen cocidos (Ej.: habas); cultivos de tallo alto en los que el agua de riego no entra en contacto con el fruto (Ej.: árboles frutales); cultivos a ser procesados, envasados y/o industrializados (Ej.: trigo, arroz, avena y quinua); cultivos industriales no comestibles (Ej.: algodón), y; cultivos forestales, forrajes, pastos o similares (Ej.: maíz forrajero y alfalfa).

b) Subcategoría D2: Bebida de animales

Entiéndase como aquellas aguas utilizadas para bebida de animales mayores como ganado vacuno, equino o camélido, y para animales menores como ganado porcino, ovino, caprino, cuyes, aves y conejos.

Tabla 2. Subcategoría B: Aguas superficiales destinadas para recreación.

Parámetros	Unidad de medida	B1	B2
		Contacto primario	Contacto secundario
FÍSICOS- QUÍMICOS			
Aceites y Grasas	mg/L	Ausencia de película visible	**
Cianuro Libre	mg/L	0,022	0,022
Cianuro Wad	mg/L	0,08	**
Color	Color verdadero Escala Pt/Co	Sin cambio normal	Sin cambio normal
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	mg/L	5	10
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	30	50
Detergentes (SAAM)	mg/L	0,5	Ausencia de espuma persistente
Materiales Flotantes de Origen Antropogénico		Ausencia de material flotante	Ausencia de material flotante
Nitratos (NO ₃ -N) +	mg/L	10	**
Nitritos (NO ₂ -N)	mg/L	1	**
Olor	Factor de dilución a 25° C	Aceptable	**
Oxígeno Disuelto (valor mínimo)	mg/L	≥ 5	≥ 4
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	6,0 a 9,0	**
Sulfuros	mg/L	0,05	**
Turbiedad	UNT	100	**
INORGÁNICOS			
Aluminio	mg/L	0,2	**
Antimonio	mg/L	0,006	**
Arsénico	mg/L	0,01	**
Bario	mg/L	0,7	**
Berilio	mg/L	0,04	**
Boro	mg/L	0,5	**
Cadmio	mg/L	0,01	**

Cobre	mg/L	2	**
Cromo Total	mg/L	0,05	**
Cromo VI	mg/L	0,05	**
Hierro	mg/L	0,3	**
Manganeso	mg/L	0,1	**
Mercurio	mg/L	0,001	**
Níquel	mg/L	0,02	**
Plata	mg/L	0,01	0,05
Plomo	mg/L	0,01	**
Selenio	mg/L	0,01	**
Uranio	mg/L	0,02	0,02
Vanadio	mg/L	0,1	0,1
Zinc	mg/L	3	**
MICROBIOLÓGICOS Y PARASITOLÓGICO			
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 ml	200	1 000
Escherichia coli	NMP/100 ml	Ausencia	Ausencia
Formas Parasitarias	Nº Organismo/L	0	**
Giardia duodenalis	Nº Organismo/L	Ausencia	Ausencia
Enterococos intestinales	NMP/100 ml	200	**
Salmonella spp	Presencia/100 ml	0	0
Vibrio cholerae	Presencia/100 ml	Ausencia	Ausencia

Nota 2:

UNT: Unidad Nefelométrica de Turbiedad.

NMP/100 ml: Número más probable en 100 ml.

El símbolo ** dentro de la tabla significa que el parámetro no aplica para esta Subcategoría.

Los valores de los parámetros se encuentran en concentraciones totales, salvo que se indique lo contrario.

Fuente: Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM

Tabla 3. Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales

Parámetros	Unidad de medida	D1: Riego de vegetales		D2: Bebida de animales
		Agua para riego no restringido (c)	Agua para riego restringido	Bebida de animales
FÍSICOS- QUÍMICOS				
Aceites y Grasas	mg/L	5		10
Bicarbonatos	mg/L	518		**
Cianuro Wad	mg/L	0,1		0,1
Cloruros	mg/L	500		**
Color (b)	Color verdadero Escala Pt/ Co	100 (a)		100 (a)
Conductividad	(μ S/cm)	2 500		5 000
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	mg/L	15		15
Demanda Química de	mg/L	40		40



Oxígeno (DQO)			
Detergentes (SAAM)	mg/L	0,2	0,5
Fenoles	mg/L	0,002	0,01
Fluoruros	mg/L	1	**
Nitratos (NO ₃ -N) + Nitritos (NO ₂ -N)	mg/L	100	100
Nitritos (NO ₂ -N)	mg/L	10	10
Oxígeno Disuelto (valor mínimo)	mg/L	≥ 4	≥ 5
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	6,5 – 8,5	6,5 – 8,4
Sulfatos	mg/L	1 000	1 000
Temperatura	°C	Δ 3	Δ 3
INORGÁNICOS			
Aluminio	mg/L	5	5
Arsénico	mg/L	0,1	0,2
Bario	mg/L	0,7	**
Berilio	mg/L	0,1	0,1
Boro	mg/L	1	5
Cadmio	mg/L	0,01	0,05
Cobre	mg/L	0,2	0,5
Cobalto	mg/L	0,05	1
Cromo Total	mg/L	0,1	1
Hierro	mg/L	5	**
Litio	mg/L	2,5	2,5
Magnesio	mg/L	**	250
Manganeso	mg/L	0,2	0,2
Mercurio	mg/L	0,001	0,01
Níquel	mg/L	0,2	1
Plomo	mg/L	0,05	0,05
Selenio	mg/L	0,02	0,05
Zinc	mg/L	2	24
ORGÁNICO			
Bifenilos Policlorados			
Bifenilos Policlorados (PCB)	µg/L	0,04	0,045
PLAGUICIDAS			
Paratión	µg/L	35	35
Organoclorados			
Aldrín	µg/L	0,004	0,7
Clordano	µg/L	0,006	7
Dicloro Difenil Tricloroetano (DDT)	µg/L	0,001	30
Dildrín	µg/L	0,5	0,5
Endosulfán	µg/L	0,01	0,01
Endrin	µg/L	0,004	0,2
Heptacloro y Heptacloro	µg/L	0,01	0,03



Epóxido				
Lindano	µg/L	4	4	4
Carbamato				
Aldicarb	µg/L	1	11	11
MICROBIOLÓGICOS Y PARASITOLÓGICO				
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 ml	1 000	2 000	1 000
Escherichia coli	NMP/100 ml	1 000	**	**
Huevos de Helminthos	Huevo/L	1	1	**

- Para aguas claras. Sin cambio anormal (paraaguas que presentan coloración natural).
- Después de filtración simple.
- Para el riego de parques públicos, campos deportivos, áreas verdes y plantas ornamentales, sólo aplican los parámetros microbiológicos y parasitológicos del tipo de riego no restringido.

Δ 3: significa variación de 3 grados Celsius respecto al promedio mensual multianual del área evaluada.

Nota 4:

El símbolo ** dentro de la tabla significa que el parámetro no aplica para esta Subcategoría.

Los valores de los parámetros se encuentran en

Fuente: Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM

2.18. APROVECHAMIENTO DE LAS AGUAS TERMALES

2.18.1. Como Uso Turístico

En el aspecto turístico, gran parte del área de estudio, se tiene la presencia de impresionantes paisajes naturales, montañas, nevados, lagunas y ríos; los cuales son atractivos para deportes de caminatas (trekking), montañismo.

Si a esto agregamos la existencia de fuentes termales con excelentes temperaturas, caudales y ubicación cercana a lugares estratégicos para el descanso y refortalecimiento de la salud, entonces, es recomendable la explotación de estos recursos como centros balnearios termales turísticos; siendo necesario para ello dotarlos de infraestructura apropiada y mejorar las vías de acceso.

Sin embargo, para su desarrollo como baño termal también hay que considerar la composición química de las aguas.

2.18.2. Como Uso de Bebidas

En lo que respecta a la producción de bebidas, en el sector de estudio existen pocas



fuentes con agua apta para ser embotellada y comercializada como tal. Tomando en cuenta los valores límites para bebidas, establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y un caudal suficiente.

El agua mineral natural debe contener al menos 1000 mg/l de sales disueltas. Las normas establecidas por la OMS en 1969, para el agua mineral natural, consigna que “deben considerarse como tales, aquellas bacteriológicamente incontaminadas, procedentes de una fuente subterránea, con un mínimo de un gramo de mineralización por litro o 250 mg de anhídrido carbónico por litro, y con propiedades favorables para la salud, según criterios admitidos por el Comité Organizador de la FAO/OMS”

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIALES Y EQUIPOS

Para el presente proyecto de investigación de utilizaron los siguientes equipos y materiales, tanto en campo y gabinete que a continuación se detallan:

Tabla 4. Equipos y Materiales Para el Desarrollo del Proyecto.

RECURSOS	DESCRIPCIÓN
Infraestructura	Laboratorios
	Tambo
Equipos	GPS Garmin
	Brújula Brunton
	Cámara fotográfica
	ICP-OES
Materiales	Frascos de polietileno esterilizado de 1 L de capacidad
	Balde plástico de 5 a 10 litros
	Guantes de Nitrilo o Neopreno
	Depósito térmico (cooler)
	Termómetro
	Bolsa para muestra de roca
	Picota de geólogo
	Lupa de 20X acromática
	Lápiz de dureza
	Wincha métrica
	Bolsa para muestra de roca
	Equipo de protección personal (EPP)
Bolígrafo o marcador de tinta indeleble	
Morral	

Fuente: Elaboración Propia.

3.2. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

La organización del trabajo de investigación está definida en 3 etapas, las cuales se detallan a continuación.



3.2.1. Precampo

- Recopilación de información previa: Se busco información bibliográfica (Tesis de diferentes universidades del Perú, Artículos de investigación, boletines del INGEMMET, boletines del SGP, revistas mineras etc.), acerca de los temas relacionados a la investigación y estudios anteriores realizados dentro o alrededor del área de estudio.
- Preparación de imágenes satelitales del lugar de estudio: Para ello se elaboró un mapa de ubicación, mapas base (usando como fuente las cartas nacionales) y planos topográficos, se hizo uso de softwares como ArcGIS 10.5, Global Mapper y Google Earth.
- Reconocimiento preliminar del área de estudio: Se hizo el reconocimiento de las vías de acceso, se vio el tema logístico, etc.

3.2.2. Campo

El cartografiado se realizó en mapas a escala 1:50 000, con instrumentos como GPS, brújula, picota y lupa, con el objetivo de identificar y describir miembros litológicos. Las descripciones de los afloramientos cuentan con ubicación GPS y fotografías.

Primero, se realizó el mapeo geológico de dicha área de estudio a una escala 1:50 000, se recolectaron muestras de forma aleatoria en afloramientos presentes, procurando que los mismos sean los más representativos, para lo mismo se hizo uso de materiales ya antes mencionados.

Segundo, se procedió a la recolección de muestras de agua, tomándose muestras tanto de las fuentes termales como de los cuerpos receptores de los mismos. Se siguió el protocolo de muestreo para que los datos sean los más representativos.



Instructivo para la toma de muestras

Es necesario cumplir con los estándares de calidad para sus resultados, por lo tanto, tener en cuenta las siguientes instrucciones.

Consideraciones técnicas específicas:

Se requiere un balde para la recolección de la muestra, para asegurar la homogeneidad e identidad única de la muestra para todos los parámetros solicitados y debe contar con tapa (5 o 10L de capacidad), balde y su tapa debe ser debidamente lavado y enjuagado (para que no queden restos de detergente; preferencia debe ser nuevo).

Una vez en el punto de muestreo, el operador responsable, se calza los guantes: de Nitrilo o Neopreno (nuevos) (evitar los guantes de látex descartables, ya que el talco de los mismos pueda contaminar la muestra) y procede a recolectar muestra en cantidad suficiente.

Luego, recolectar muestra a contracorriente, si fuera posible a 30 cm por debajo de la superficie y a la mitad del cuerpo del agua, evitando las zonas de turbulencia (llenar el balde si es posible) y evitando remover fondos de lodos o solidos de las paredes del cuerpo de agua (en él río) y para las fuentes termales se realizará la toma de muestras en el centro de las pequeñas lagunas (fuentes hidrotermales) a 10 cm de profundidad para evitar el ingreso de oxígeno. Posteriormente se procederá a introducirlos en los frascos etiquetados para los ensayos específicos en el siguiente orden:

Cadena de custodia

Es el proceso de control y vigilancia del muestreo, incluyendo los métodos de toma de la muestra, preservación, codificación, transporte y su correspondiente análisis. Esta es esencial para asegurar la representatividad e integridad de la muestra desde su toma de las muestras hasta el reporte de resultados por parte del laboratorio.



- Etiquetas: Es la identificación de las muestras, debe pegarse a los frascos antes del muestreo y debe contener la siguiente información:
- Código: Número de Identificación de la muestra.
- Fecha: Fecha en la cual se realiza la toma de la muestra.
- Hora: Hora de la toma de la muestra.
- Lugar: Es la ubicación general del sitio de toma. (Coordenadas UTM).
- Tipo de muestra: Agua de manantial, termal, de río, de laguna, de piscina, etc.
- Punto de Toma: Lugar donde se toma la muestra.
- Parámetro medido In Situ: Temperatura, Conductividad, Caudal y pH.
- Responsable: Nombre del recolector.
- Solicitante: Nombre de la Empresa o persona que solita la toma de las muestras.
- Teléfono: Teléfono del usuario
- Dirección: Dirección del Usuario.

En los puntos de muestreo a la vez se hizo la toma de la temperatura de las fuentes termales, así como también de los cuerpos receptores.

3.2.3. Postcampo

3.2.3.1.Laboratorio:

Las muestras de agua fueron analizadas en los laboratorios del sur (LAS)

localizado en Arequipa, se realizarón los siguientes análisis:

- ICP-OES para As
- ICP-OES para Hg



- ICP-OES para Cr, Sr, Ti, Mo, Na, Ni, P, Sb, Se, SiO₂, V, K, Li, Fe, Cu, Ca, Be, Ag, Zn, Cd, B, Al, Mg, Mn, Sn, Tl, Co, Ba, Pb.

Para el caso de la evaluación de los parámetros físicos y químicos se analizarán en el laboratorio de aguas y suelos perteneciente al INIA, el cual está localizado en Salcedo – Puno. Los parámetros físicos y químicos que se determinarán son:

- Ph, temperatura, conductividad eléctrica, dureza, nitratos, cloruros, sulfatos, Na, K, Mg, Ca, sales totales, bicarbonatos, carbonatos, alcalinidad, solidos totales disueltos.

3.2.3.2.Gabinete:

Se almacenó toda la información procedente de datos geológicos y de laboratorio en una base de datos: En Excel para realizar posteriores tratamientos, así mismo se hizo una validación de los datos, posterior a ello se sistematizó la información referente a las descripciones de campo y las fotografías.

3.2.3.3.GIS e ilustracion vectorial

Con los datos ya organizados se construyeron los mapas, secciones geológicas y columna estratigráfica en ArcGIS. Así mismo, se construyeron los diagramas tales como Piper, Riverside en Diagrammes.

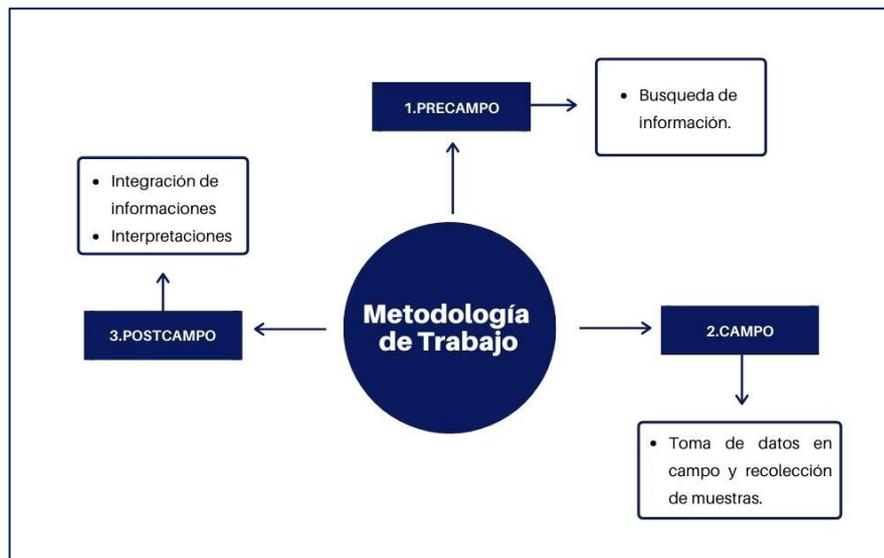


Figura 21. Esquema de la metodología de trabajo.

3.3. SOFTWARES UTILIZADOS

Los programas utilizados para el procesamiento de información fueron:

- **ArcGIS Desktop:** Es un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica. Se utilizó para elaboración de mapas y secciones principalmente.
- **Adobe Illustrator:** Es un editor de gráficos vectoriales, se utilizó para la construcción de la columna estratigráfica.
- **SAS Planet:** Es un programa gratuito (freeware con licencia GNU) diseñado para ver y descargar imágenes de satélite de alta resolución y mapas convencionales de servidores como: Google Earth, Google Maps, Bing Maps, Nokia, Here, Yahoo, Yandex, OpenStreetMap, ESRI, etc.
- **Global Mapper:** Es una aplicación de sistema de información geográfica (SIG) potente y asequible que combina una gama completa de soluciones de software para el procesamiento de datos espaciales y proporciona acceso a una serie de formatos utilizados en el mundo del CAD, SIG y la ingeniería. Se utilizó para obtener las curvas de nivel.



- **Diagrammes:** Es un software de uso libre, creado por la Universidad de Avignon, es liviano y fácil de usar. Permite realizar gráficos de Piper, Schoeller-Berkalov, Stiff, Binarios, Riverside/Wilcox, Korjinski, simulación de ph, cálculos estadísticos y modela usando algoritmo Phreeq. Permite además exportar lo gráficos realizados a un archivo jpg, bmp, fem y de tipo vectorial.

CAPÍTULO IV

CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.1. UBICACIÓN

4.1.1. Ubicación Política

El Campo Geotermal de Pinaya (CGP) está ubicada en el altiplano de los Andes a 3.5km del centro poblado menor de Pinaya, distrito de Santa Lucia, provincia de Lampa en el Departamento de Puno, a una altitud de 4,400 m.s.n.m. El CGP se emplaza sobre una amplia explanada y en las laderas de la cordillera de Sillapaca, en la margen oriental del valle al norte de la Laguna Lagunillas. (ver Mapa N°01)

Tabla 5. Ubicación Política del área de estudio.

Región	Puno
Provincia	Lampa
Distrito	Santa Lucia
Centro poblado	Pinaya

Fuente: MTC y Elaboración propia

4.1.2. Ubicación Geográfica

Tabla 6. Ubicación Geográfica del área de estudio.

DETALLE	VALORES
Coordenadas centrales del área de estudio	E: 8280000
	N: 302000
Zona geográfica	19L
Altitud promedio	4400 m.s.n.m.
DATUM	WGS 84

Fuente: Elaboración propia

4.2. ACCESIBILIDAD

Se puede acceder desde la carretera asfaltada Puno-Arequipa. La superficie está cubierta de tierra suave, la mayor parte del área hay solamente presencia de zonas de pastizales y bofedales.

Tabla 7. Accesibilidad al área de estudio

N°	RUTA	ACCESO	DISTANCIA (Km)	TIEMPO PROMEDIO (h)	CONDICIÓN DE VÍA
1	Lima - Juliaca	Aéreo	841.56	1:30	-----
2	Juliaca -Santa Lucia	Terrestre	60	1:00	Asfaltado
3	Santa Lucia- Desvio	Terrestre	21	25 minutos	Asfaltado
4	Desvio - C.P.Pinaya	Terrestre	20	35 minutos	Afirmado

Fuente: DIRCETUR PUNO y Elaboración propia

4.3. ASPECTOS CLIMÁTICOS

Debido a su topografía el clima es variado, sin embargo, durante toda la época del año el clima es frío y semiseco.

4.3.1. Temperatura

Las temperaturas más bajas ocurren entre abril-octubre (conocido también como la época de heladas) con temperaturas entre los -7 hasta los 12 C°, información obtenida de la estación meteorológica del tambo de Pinaya.

4.3.2. Precipitación

En los meses de enero – marzo son las épocas de mayor precipitación (150 mm) durante este periodo se tiene la presencia de lluvias, nevadas, granizadas con despliegue de rayos. Lo que dificulta la realización del trabajo de campo, así como también la accesibilidad, información obtenida de la página del SENAMHI.

4.3.3. Humedad

La variación estacional y espacial es similar a la precipitación, por lo que registra los Valores más altos durante el verano. También se verifica que la variación estacional

de humedad relativa en todo el bloque de las estaciones es uniforme, no obstante, los meses de enero, febrero y marzo la humedad va con un promedio de 64% y los meses de mayo, junio, julio y agosto es de 45%, información obtenida de la página del SENAMHI.

4.3.4. Vientos

La velocidad, frecuencia y dirección de los vientos son variadas, resultado del flujo atmosférico en el ámbito altiplánico seco; la velocidad promedio es de 3,3 m/s.

El período de mayor frecuencia de vientos en términos generales son los meses de agosto, setiembre y octubre, información obtenida de la página del SENAMHI

4.4. FAUNA Y FLORA

4.4.1. Fauna.

AVES

- **Huallata (*Chloephaga melanoptera*):** Es una especie de ave anseriforme de la familia Anatidae natural de las montañas de los Andes, en Sudamérica. Presenta un cuello grueso, es de color blanco y negro, el pico y las patas son rojizos.



Figura 22. Se muestra a una pareja de huallatas.

- **Perdiz :** Son aves no migratorias de la familia Phasianidae, es muy parecida a un pollo, habita en los cerros principalmente. Suelen verse en tríos o grupos familiares (los machos cuidan a los juveniles).

- **Águila:** Pertenecen a la familia Accipitridae, subfamilia Buteoninae. Como todas las aves de presa, las águilas poseen un pico grande, poderoso y puntiagudo para desprender la carne de su presa también tienen unas garras poderosas.

MAMÍFEROS

- **Vicuña (*Vicugna Vicugna*):** Es una especie de mamífero de la familia de los camélidos y del grupo de los camélidos sudamericanos que vive principalmente en las zonas altas de Pinaya, su color es de color marrón rojizo en el lomo, blanco en la zona central y las patas.
- **Alpaca (*Vicugna Pacos*):** Una especie doméstica de mamífero artiodáctilo de la familia Camelidae. Los pobladores de Pinaya principalmente se dedican a la ganadería, siendo así una población alpaquera, como símbolo de eso es que en su plaza central tienen la estatua de una alpaca.



Figura 23. Se visualiza a una gran cantidad de alpacas que se alimentan en los bofedales.

- **Vizcacha (*Lagidium viscacia*):** Es una especie de roedor histricomorfo de la familia Chinchillidae que habita en Sudamérica, tiene un pelaje grueso y suave, excepto en la cola, donde es duro. Su parte superior es amarilla o gris y la punta de la cola es negra. En general la vizcacha se asemeja a los conejos. Tiene

orejas largas cubiertas de pelo, bordeadas con un flequillo de pelaje blanco. Todas las patas tienen cuatro dedos. La alimentación de la vizcacha es en base al ichu.

- **Conejo salvaje (*Oryctolagus cuniculus*):** Es una especie de mamífero lagomorfo de la familia Leporidae, y el único miembro actual del género *Oryctolagus*. Se caracteriza por tener un cuerpo cubierto de un pelaje espeso y lanudo, de color pardo pálido a gris, cabeza ovalada y ojos grandes, viven en madrigueras.

4.4.2. Flora

Pajonal: Son áreas altoandinas con presencia de plantas de la familia Poaceae en abundancia, siendo la más representativa el ichu, Jaraba ichu. También, se 84 pueden encontrar plantas del tipo herbáceas dicotiledóneas de la familia Asteraceae, Melastomataceae y Rosaceae. El continuo de esta vegetación puede ser interrumpido, de vez en cuando, por algunas plantas arbustivas.



Figura 24. Vista de pajonales en toda la llanura.

Bofedales: Son áreas conformadas por especies vegetales en forma de cojines compactos, se los puede encontrar en humedales altoandinos y la especie más característica en esta zona es *Distichia muscoides*.



Figura 25. Bofedales y en la parte derecha de la misma se observa a las aguas termales de Aguas Calientes.

Pinco Pinco: Es un arbusto muy ramificado, erguido o decumbente, es una planta dioica, crece a manera de matas, de arbusto o pequeños bejucos de hasta 2 m de altura, perenne.



Figura 26. Pinco Pinco

Yareta: Es un arbusto nativo de las regiones altiplánicas, conocido por su apariencia similar al musgo. Se observa muy bien en las zonas altas (colinas altas) se caracterizan por cubrir las rocas.



Figura 27. Yareta

4.5. ASPECTO SOCIAL

Pinaya es considerado como un Centro Poblado importante, los pobladores se dedican en su mayoría al criado de ganado, algunos se dedican a la extracción de Au de manera artesanal de las minas y en ocasiones trabajan en proyectos de exploración. En Pinaya, existe un tambo el cual es el centro de reunión entre las comunidades y autoridades para actividades que competen al desarrollo del centro poblado de Pinaya. En Jarpaña, solo existe una pequeña escuela, y pequeñas estancias donde los habitantes usan para el criado de ganado y de truchas, en este sector no existe energía eléctrica.



Figura 28. Mina ubicada en el lugar denominado Antaña, al fondo de observa la Cordillera del Sillapaca.



Figura 29. Vista del lugar denominado como Antaña, en la parte izquierda se observa el campamento que los pobladores que se dedican a la extracción de Au han construido.



Figura 30. Vista de Au, que los pobladores obtienen.



Figura 31. Vista del tambo de Pinaya.



4.6. GEOLOGÍA REGIONAL

4.6.1. Formación Arcurquina (Kis-ar)

Se caracteriza por presentar estratos gruesos, calizas micríticas intercalados con limoarcillitas marrón rojizas en la base y en los niveles superiores con areniscas gris verdosas, se identifican fósiles amonites y equinoides asignándole una edad Albiano a Cenomaniano, los espesores varían entre 200 a 540 m Sánchez et al. (2003). Generalmente sobreyace a la Formación Murco, sin embargo, cerca de Condorama afloran bloques de caliza en formas caóticas cubiertas por matriz limolítica lutítica rojiza similar a la Formación Ayabacas. Por el ensamble de fósiles se le asigna una edad Aptiana (125 a 113 Ma). En el área de estudio se le asigna con este nombre a las secuencias de calizas grises caóticas ubicadas al oeste de Atecata. Presentan características como los nódulos de chert encontradas en Tocra y Palomani oeste de Pinaya. El espesor varía entre 100 a 150 m.

4.6.2. Grupo Puno (P-pu)

Corresponden a afloramientos ubicados a lo largo del sistema de fallas Lagunillas, consisten de lutitas rojas intercaladas con areniscas gruesas, conglomerados polimícticos (clastos de calizas, cuarcitas, areniscas rojas en matriz areniscosa) y hasta tobas Sánchez et al. (2003). También se identifican a las secuencias de conglomerados como Formación Anta, ocurridas luego del régimen de compresión entre los 43 a 40 Ma (evento compresivo Inca I). Los espesores varían entre 500 a 600m y presenta una edad tentativa entre Eoceno - Oligoceno.

En el área de estudio, las capas se encuentran plegadas y los buzamientos son de alto ángulo, se identifican 2 unidades litológicas importantes al oeste de Pinaya. A la base, predominan secuencias areniscosas verdes y rojas, en menor proporción, conglomerados en matriz rojiza, el espesor que aflora varía entre 75 a 100 m. En los niveles superiores se

emplazan de forma concordante secuencias de conglomerados heterogéneos y areniscas arcósicas con matriz gris calcárea (Figura 33). La intercalación entre los conglomerados y las areniscas arcósicas varía lateralmente de norte a sur. Estas secuencias se encuentran cortadas por rocas intrusivas, tales como granodioritas. Dentro de las secuencias de conglomerados se han identificado bloques de caliza con características similares a la Formación Arcurquina envueltas en matriz rojiza.



Figura 32. Vista EW se aprecia la intercalación de areniscas y conglomerados correspondientes al Grupo Puno.



Figura 33. Vista EW donde se visualiza el espesor de los estratos de areniscas (arcosas) y conglomerados polimícticos.



Figura 34. Vista SW-NE se observa presencia de vetillas de calcita que cruzan los estratos de arcosa como los estratos de los conglomerados polimícticos.



Figura 35. Vista NW – SE secuencias de areniscas verdes y rojas intercaladas con conglomerados en matriz rojiza, las capas de los conglomerados tienen una matriz calcárea.

Conglomerado

Muestra: MPZ-001

Descripción petrológica: La muestra es de color pardo rojizo, es una roca sedimentaria clástica, es polimíctica, posee fragmentos de Caliza, Andesitas, Areniscas; la matriz es

arenisca y el cemento es calcita, los clastos miden aprox. 3 cm de And, Arenisca y



Figura 36. Muestra de mano de conglomerado E: 293 858 N: 8 279 436

Arcosa

Muestra: MPZ-002

Descripción petrológica: Tiene un color pardo rojizo, es una roca sedimentaria arenácea posee en su composición 30 % de cuarzo, 40 % de feldespato, 20 % fragmento de roca y 10 % de matriz, también cuenta con la presencia de vetillas de calcita.



Figura 37. Muestra de mano de arcosa E:293 558 N:8 278 721

4.6.3. Grupo Tacaza (PN-ta)

Consiste en una gruesa acumulación volcánica en las proximidades de la Mina Tacaza, sobreyace en discordancia angular al Grupo Puno e infrayace al Grupo Palca, también podría existir solapamiento cronoestratigráfico Palacios et al. (1991), con el Grupo Sillapaca. En Lagunillas, el espesor de lavas andesíticas consiste hasta en 400 m, entre lavas y tobas con bloques. El espesor puede variar entre 250 a 1200 m, ocurridas durante el Oligoceno a Mioceno Superior. La litología corresponde a traquiandesitas (Cereceda et al., 2010).

En el área de estudio, al norte de Atecata se identifican a la base secuencias de tobas líticas y lavas andesíticas en su mayoría, presentan ligero magnetismo en los niveles superiores. Al norte de Pinaya, las lavas andesíticas porfiríticas han sido datadas en 29.5 Ma Fornari et al. (2002). En las manifestaciones termales de Pinaya, afloran lavas afaníticas rojizas silicificadas, lavas andesíticas porfiríticas con oquedades y moderado magnetismo. En el sector de Jarpaña, las lavas son traquiandesitas porfiríticas con fenocristales de plagioclasa muy desarrollados, distintas al sector de Pinaya. En Pinaya, el espesor es 300 m y en Jarpaña de 400 m.

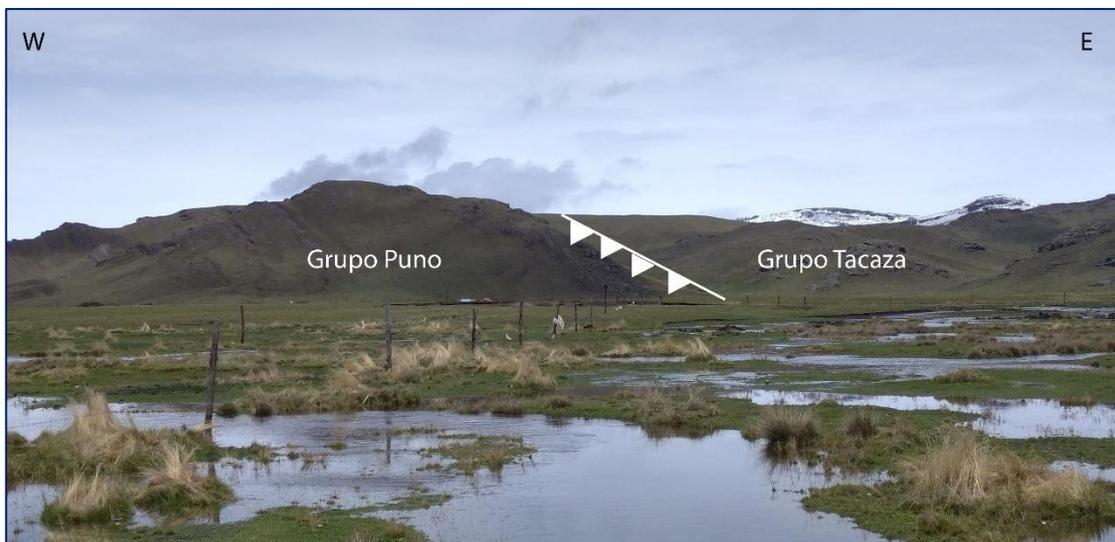


Figura 38. Vista WE (Vista al norte de Pinaya) se muestra a la falla inversa que divide al grupo Puno y al Grupo Tacaza, buzamiento de capas de conglomerados intercalados con areniscas $N155^{\circ}/78^{\circ}W$.

Las capas subhorizontales corresponden al Grupo Tacaza, y las capas de ángulo abrupto corresponden al Grupo Puno, ambas unidades se encuentran en contacto por una falla inversa.



Figura 39. Vista WE se observa la otra falla inversa que divide de igual manera al Grupo Tacaza y al Grupo Puno.



Figura 40. Vista SE NW del cerro Santiane en donde se observa dos contactos que dividen al Grupo Tacaza, Grupo Palca y al Grupo Sillapaca.

Andesita Silicificada

Muestra: MPZ-003

Descripción petrológica: La muestra tiene un color rojizo, es una roca volcánica afanítica con una composición mineralógica de 4 % de Q, 30 % de Fk, 60 % de Pl y 6% de otros.

Es una roca muy alterada (silicificada) es de un color rojizo de muy buena dureza.



Figura 41. Muestra de mano de andesita silicificada E:297 762 N:8 278 131

Andesita

Muestra: MPZ-004

Descripción petrológica: Es de color gris, roca volcánica afanítica, posee una composición mineralógica de 4 % de Q, 40 % de Fk, 50 % de Pl y 6% de otros, presenta intemperismo.



Figura 42. Muestra de mano de andesita E:290 889 N:8 278 145

Andesítica Porfirítica

Muestra: MPZ-005

Descripción petrológica: De color gris oscuro, es una roca ígnea porfirítica posee una composición mineralógica de 4 % de Q, 40 % de Fk, 50 % de Pl y 6% de otros, posee cristales muy bien desarrollados.



Figura 43. Muestra de mano de roca andesita porfirítica E: 294 982 N: 8 279 486

4.6.4. Grupo Palca (Nm-pa)

Definido por Palacios et al. (1993) este autor define tres facies piroclásticas; tobas soldadas, tobas vitroclásticas y tobas estratificadas. La clasificación litológica fue cartografiada por el INGEMMET notándose una variabilidad en sus minerales secundarios en forma local.

Palacios et al. (1993) define una unidad de tobas soldadas en el flanco norte del Cerro Chincojaca, aquí las unidades de erupción o unidades de enfriamiento reflejan la morfología escarpada del cerro, el color varía de marrón amarillento a marrón grisáceo y la apariencia es distintivamente vidriosa. La unidad de tobas vitroclásticas (no soldadas) aflora mejor en el Poblado de Palca, habiéndose sido identificado en la esquina noreste y noroeste de los cuadrángulos de Ocuvi y Juliaca. Otros afloramientos aislados se observan en el lado oeste del cuadrángulo de Ocuvi y al sur oeste de Paratia en el cuadrángulo de Lagunillas Palacios et al. (1993). Esta unidad se interdigita con facies soldadas; su litología son tobas de color rosado grisáceo a rosado amarillento y pueden ser friables o consolidadas (endurecidas), en los afloramientos estas facies se caracterizan por una estratificación hasta de 30 cm. de espesor erosionando a menudo en cavidades que a menudo exceden los 15 cm. de diámetro, en superficie fresca indican haber sido originalmente por una variedad de pumita friable, los fragmentos líticos son usualmente de andesita vítrica a afídica cuyos diámetros son hasta de 10 cm. Las tobas estratificadas se distribuyen limitadamente en el valle del Río Palca al E del mismo pueblo (Cerro

Tumaruma). Se diferencia por la presencia de estratificación de 4 a 10 cm. mostrando gradación normal, conteniendo además lapillis líticos que decrecen en tamaño hacia la parte superior, a través de capas individuales. El tope de cada unidad está compuesto por láminas finas de ceniza. Se observan también intercalaciones sedimentarias en el área del Rio Borracho, aquí la secuencia sedimentaria es gruesa y contiene rocas calcáreas micríticas carbonáceas y con remanentes de plantas pobremente preservadas, en fractura fresca muestra fuerte olor bituminoso, Palacios et al. (1993). Las calizas se intercalan con limolitas areniscosas, mostrando ondulas de corriente y fragmentos de plantas. Al sur del Cerro Pucara en el cuadrángulo de Ocuvi, la secuencia consiste en tobas lapillíticas y lutitas con cristales, intercaladas con areniscas yesíferas y limolitas finamente laminadas.



Figura 44. Vista del SW al NE del cerro Ichocollo, se observa el contacto que existe entre el grupo Palca y el Grupo Tacaza.

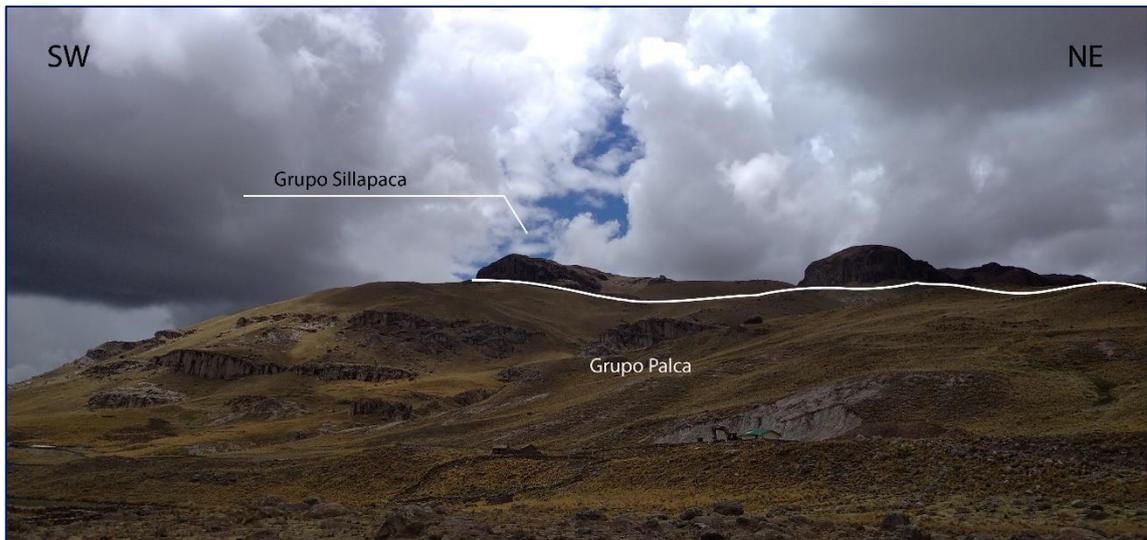


Figura 45. Vista del SW al NE del cerro Sillapaca donde se visualiza el contacto entre el Grupo Sillapaca y el Grupo Tacaza.

4.6.5. Grupo Maure (Nm-ma)

Se les denomina así, a las secuencias lacustrinas post Grupo Tacaza, los espesores pueden variar entre 550 a 600 m. Corresponden a cuencas sin orogénicas desarrolladas durante el Mioceno inferior a medio, como las ocurridas en Tincopalca, Orduña y Quillisani (Aguilar, 2012).

En cuanto a la litología principalmente se tiene depósitos volcanoclásticos intercalados con tobas.

En el área de estudio, adicionalmente se han encontrado a los alrededores del cerro Turputa, afectadas por la alteración hidrotermal, en el cerro Turputa estas rocas se encuentran con alteración hidrotermal argílica avanzada y silicificación.

4.6.6. Grupo Sillapaca (Nm-si)

Asignación dada por las lavas ubicadas en la Cordillera Sillapaca, según reportan en la Carta Geológica Nacional son lavas dacíticas en su mayoría, se estima su edad entre Mioceno Inferior 22-18 Ma, presenta un espesor aproximado de 500 m (Palacios et al., 1991).

En el área de estudio afloran secuencias de lavas andesíticas porfiríticas cuya

dirección de flujo indican que provendrían de la hacienda Callatia, cerro Turputa y Cordillera Sillapaca. En Callatia, las lavas andesíticas con bandas rojizas se encuentran afectadas por alteración hidrotermal argílica y silicificación, del mismo modo sucede en los niveles basales al sur del cerro Turputa donde las rocas volcánicas identificadas como lavas andesíticas grises porfiríticas se encuentran silicificadas y con alteración argílica, sobreyacen lavas intercaladas con autobrechas homogéneas. En la Cordillera Sillapaca, las lavas son andesita, textura porfirítica, la matriz varía de gris a negro vítreo. (Figura 50). La loma de Pinaya, está compuesta por lava andesítica y dacítica con laminaciones blancas y rojizas. El espesor varía entre 100 a 300 m. La edad cronológica en la Cordillera Sillapaca varía entre 13-14 Ma (Klinck et al. 1986).

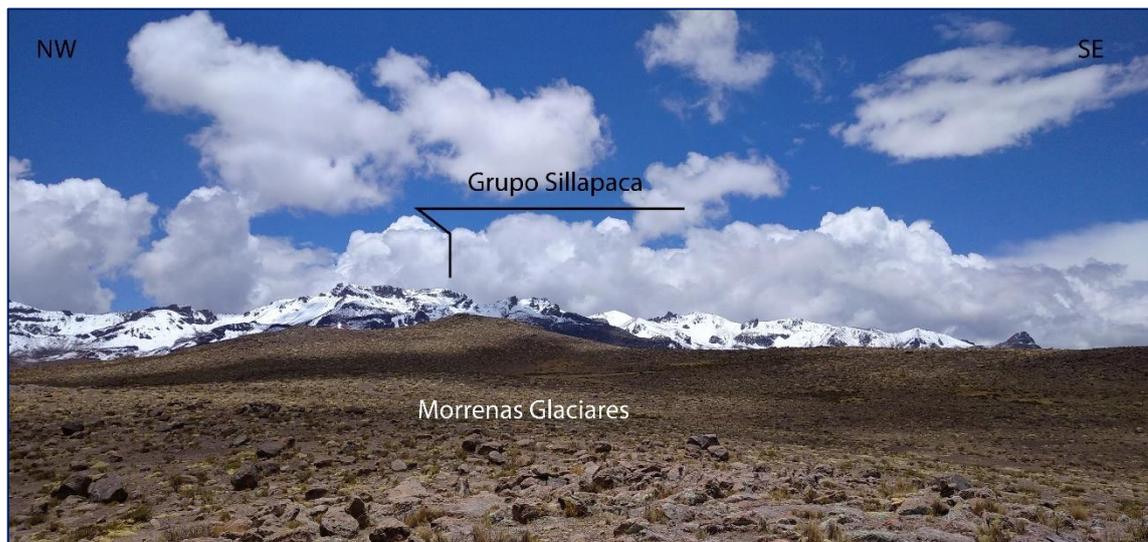


Figura 46. Vista del NW al SE de la cordillera del Sillapaca (Grupo Sillapaca), así mismo se observa los depósitos cuaternarios glaciares.



Figura 47. Vista del SE al NW del cerro Santiane se observa el contacto entre el Grupo Palca y el Grupo Sillapaca.



Figura 48. Vista SE al NW del cerro Tacleoco se observa el diaclasamiento conocido como disyunción columnar correspondiente al grupo Sillapaca compuesta por lavas.

Andesita porfirítica

Muestra: MPZ-006

Descripción petrológica: De color gris plomizo, es una roca volcánica porfirítica posee una composición mineralógica de 3% de Q, 40 % de Fk, 55 % de Pl y 2 % de otros.



Figura 49. Muestra de mano de andesita porfírica E:297 712 N:8 278 296

4.6.7. Depósitos Cuaternarios

Las unidades anteriores son cubiertas por depósitos de edad Cuaternaria, en su mayoría predominan depósitos glaciares en formas de morrenas ubicadas en las laderas de los cerros y laderas. Los espesores varían entre 30 – 50m. En menor área se encuentran depósitos aluviales ubicados a lo largo de ríos de primer y segundo orden. Los espesores pueden variar entre 2 a 3m. En medio de la extensión de los depósitos aluviales se ubican los depósitos de bofedales con espesores no mayor a 2m.

En las laderas con pendiente pronunciada se ubican los depósitos coluviales con espesor no mayor a 5m.



Figura 50. Vista SW NE donde se visualiza el C.P. Pinaya y los depósitos cuaternarios glaciares, los bloques de rocas fueron arrastrados por los glaciares (el tamaño de los bloques es 1 m a 5 m aproximadamente)

4.6.8. Rocas intrusivas y subvolcánicas

Rocas intrusivas porfiríticas se han registrado en el margen oeste de la altiplanicie de Pinaya y en el cerro Turputa, Jarpaña. Rocas subvolcánicas se registran en el flanco oeste de la Cordillera Sillapaca. Al norte del C.P de Pinaya, aflora roca intrusiva porfirítica granodiorita (Figura 54), al sur, roca intrusiva tonalita, ambas cortan secuencias de calizas y conglomerados. En el cerro Turputa, la roca hipoabisal pórfido diorítico corta secuencias de lavas andesíticas. Al sureste de Pinaya, se registran afloramientos de roca subvolcánica dacítica, ubicadas en el flanco oeste de la Cordillera Sillapaca.

Andesita

Muestra: MPZ-006

Descripción petrológica: Es de color gris oscuro, es una roca ígnea volcánica de textura porfirítica con una composición mineralógica de 5% de Q, 25 % de Fk, 65 % de Pl y 5 % de otros. La muestra fue obtenida detrás del C.P. Pinaya, en el domo, posee presencia de óxidos de Fe y Mn, los cristales de la roca han sido alterados, llegando a tener un color blanquecino, producto de la destrucción de las plagioclasas.



Figura 51. Muestra de mano de andesita E:294 225 N:8 275 460

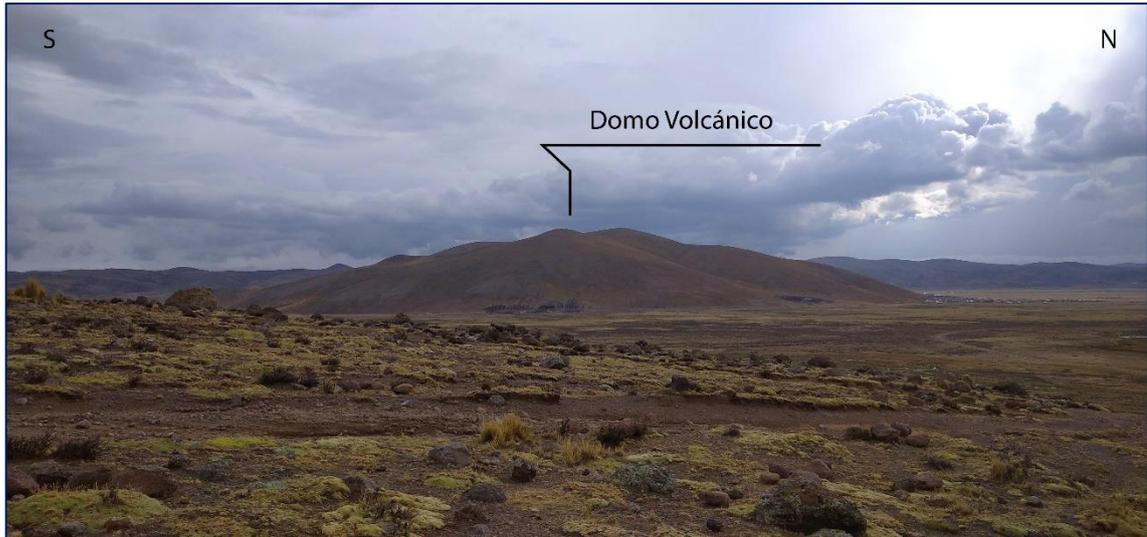


Figura 52. Vista SN del domo volcánico.



Figura 53. Vista SW NE se observa al Grupo Tacaza y la intrusión de un cuerpo ígneo (granodiorita rosa).



Figura 54. Vista de la granodiorita rosa in situ, la cual presenta un diaclasamiento paralelo principal y diaclasamientos que los cortan.

Granodiorita

Muestra: MPZ-007

Descripción petrológica: Muestra de color rojizo, es una roca intrusiva con los granos bien desarrollados, con una composición mineralógica de 55% de Q, 35 % de Fk, 5 % de Pl y 5 % de otros, en el afloramiento posee una pseudo estratificación, rodeado de líquenes y corta secuencias del Grupo Puno.



Figura 55. Muestra de mano de granodiorita E:294 315 N:8 279 450

4.7. ESTRATIGRAFIA

En el área de estudio se han identificado las siguientes unidades litoestratigráficas (Figura 57), el intrusivo es de composición granodiorítica.

COLUMNA ESTRATIGRÁFICA

SISTEMA	COLUMNA	UNIDAD	DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA
NEÓGENO		Gpo. Sillapaca 100 - 300	Lava andesítica basáltica
		Gpo. Maure 100	Secuencias Volcanoclásticas con intercalaciones de tobas
		Gpo. Palca 350	Toba Cristalolítica
		Gpo. Tacaza 300	Lavas Andesíticas
PALEÓGENO		Gpo. Puno 500 - 600	Conglomerados con bloques de caliza Intercalación de areniscas arcóscicas y conglomerados
CRETÁCICO		Fm. Arcurquina 200	Calizas micríticas intercaladas con limoarcillitas

Figura 56. Columna estratigráfica del área de estudio a escala regional

4.8. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.

4.8.1. Sistema de Fallas

El área de estudio se encuentra controlada por el sistema de falla regional Lagunillas NO-SE y el sistema de fallas de la Cordillera del Sillapaca, ambas se encuentran delimitando la planicie fluvio-glaciaria y la Cordillera Sillapaca. La falla Lagunillas con un trazo de mayor prolongación también se le denomina como Cusco-Lagunillas-Mañazo Cerpa et al. (2012) durante el Mesozoico actúa como fallas normales delimitando los altos Cusco – Puno, comportándose como fallas normales y de rumbo (Transtensión), durante el Cenozoico actúa como fallas de rumbo e inversa (Transpresión) controlando cuencas continentales e intermontaña, entre los 43 y 42 Ma existen esfuerzos



compresivos NE-SO, a los 29 y 28 Ma se identifican compresiones alternantes E-O con movimientos sinestrales, originando las cuencas Oligomiocénicas. Entre los 24 y 22 Ma existen movimientos sinestrales e inversos, originando discordancia angular entre los conglomerados del Grupo Puno y lavas del Grupo Tacaza. Entre los 12 y 9 Ma existe compresión en dirección E-O y movimientos sinestrales, durante el cuaternario se identifican como fallas en echelón. Las fallas tienen origen profundo y controlan el magmatismo desde el Oligoceno. En el área de estudio también se reconoce una falla inversa al norte de Pinaya, la cual pone en contacto a las lavas del Grupo Tacaza y conglomerados del Grupo Puno (Alccamarine). Respecto al sistema de fallas de la Cordillera Sillapaca de acuerdo al mapa neotectónico (GEOCATMIN) se le identifica como una falla inferida.

Deformación

Los anticlinales y sinclinales ubicados en el Grupo Puno presentan capas de alto ángulo, los ejes tienen dirección NO-SE, estas deformaciones son probablemente originadas por el paso y reactivación del sistema de fallas regionales Lagunillas.

Del mismo modo en Orduña y río Quilliciane las tobas del Grupo Palca y secuencias volcanoclásticas del Grupo Maure se encuentran deformadas esto debido a fallas locales originadas a partir de fallas regionales.

4.9. GEOMORFOLOGÍA

4.9.1. Sistema Montañoso

A. Montañas

Gran elevación natural del terreno, constituida por una agrupación o cadena de cerros. Cuando la cadena montañosa tiene una gran extensión se le denomina cordillera. Por ejemplo, la Cordillera de Sillapaca.



Figura 57. Vista NS donde se observa a la cordillera del Sillapaca y colinas altas que lo acompañan.

B. Colinas

Colina Alta (M-Ca)



Figura 58. Vista SW al NE se observa a las aguas termales denominada “Jarpaña” rodeado de colinas altas y medias.

Colina Media (M-Cm)



Figura 59. Vista WE se observa un cauce fluvial rodeado de colinas medias.

Colina Baja (M-Cb)

Las colinas bajas se encuentran principalmente en las llanuras. Se presentan como pequeños sobresaltos.

C. Pie De Monte (M-Pi)

Es una porción inclinada de la superficie de la tierra, localizada al pie de los paisajes más elevados.

4.9.2. Sistema Fluvial

A. Bofedales (F-Bo)

Bofedal es un humedal de altura y se considera una pradera nativa poco extensa con permanente humedad. Los vegetales o plantas que habitan el bofedal reciben el nombre de vegetales hidrofíticos.

Los bofedales se forman en donde las planicies almacenan aguas provenientes de precipitaciones pluviales.

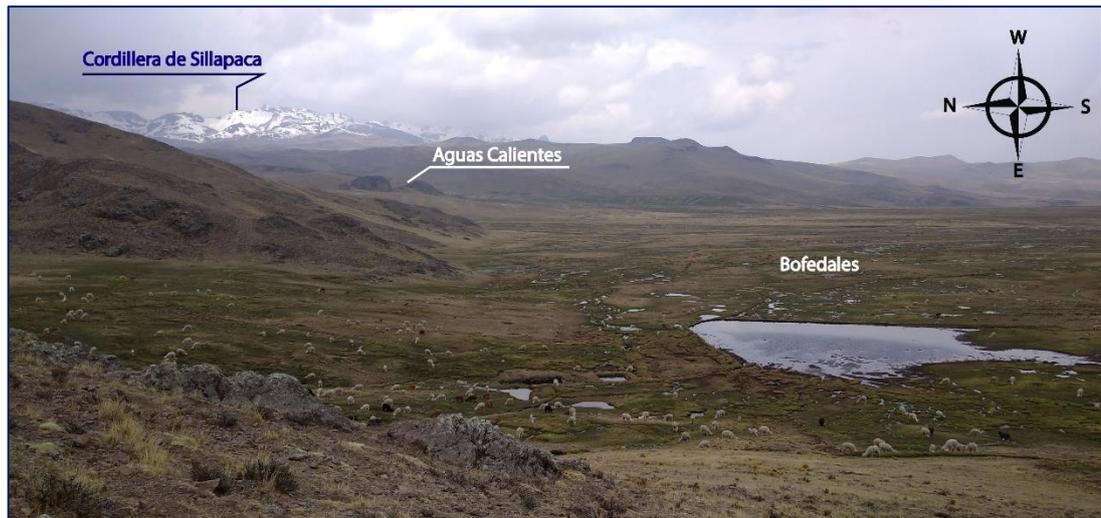


Figura 60. Vista NS se observa a la cordillera del Sillapaca, así mismo se observa a las aguas termales denominadas “Aguas Calientes” y en la llanura se observa los bofedales.

B. Ríos (F-Ri)

Un cauce fluvial es una corriente natural de agua que fluye con continuidad.

Los ríos desarrollan varias etapas de erosión conformando los procesos y agentes geomorfológicos externos los que han actuado sobre las rocas.

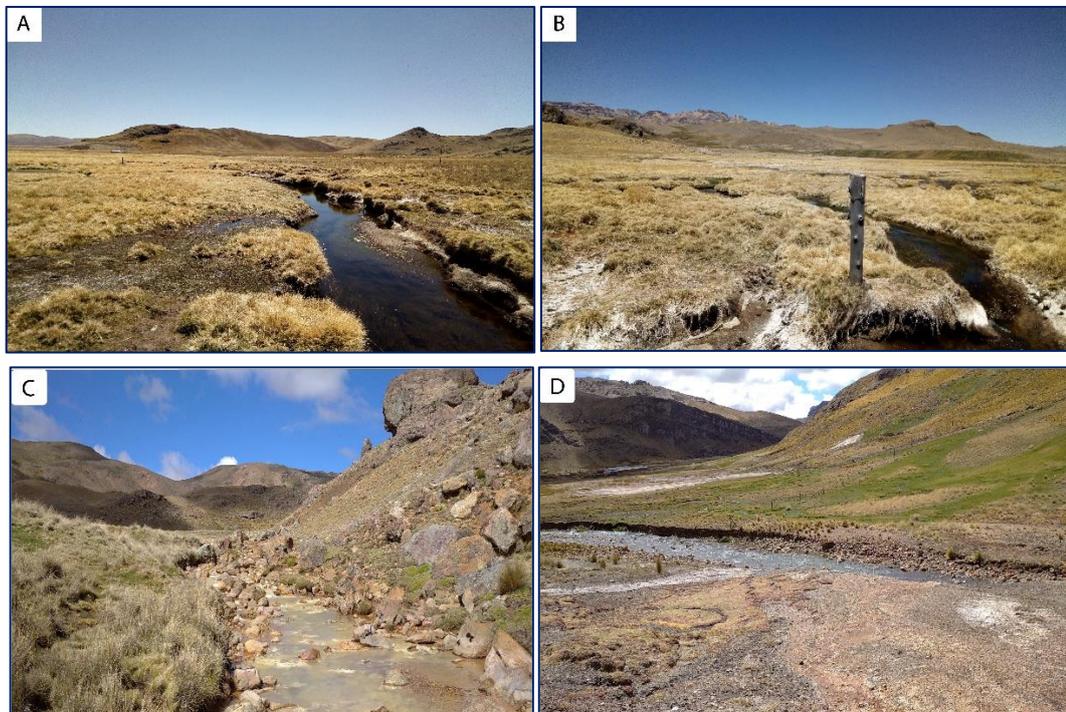


Figura 61. (A) Vista del río Taquipunco donde desembocan las aguas provenientes de las aguas termales (aguas calientes) (B) Vista desde otra perspectiva del río Taquipunco (C) Vista del río Pacaje correspondiente a Jaraña (D) Vista del río Jallpamayo correspondiente a Jarpaña, así mismo se observa el sínter de las aguas termales.

C. Terraza Aluvial (F- Te)



Figura 62. Vista WE se observa a la terraza aluvial.

D. Llanura Aluvial (F-LLa)

Una llanura aluvial, llanura de inundación, o valle de inundación, es la parte orográfica que contiene un cauce y que puede ser inundada ante una eventual crecida de las aguas de éste. La zona de estudio presenta en diferentes zonas, llanuras aluviales.



Figura 63. Vista WE se observa a una Llanura aluvial, con terrazas aluviales rodeados de colinas altas.

E. Valle “V” (F-VaV)

Casi en su totalidad, dentro de la zona de estudio los valles son de tipo V,

valles estrechos y con pendientes superiores a 70%, con masas clásticas aluviónicas de bloques y cantos angulosas.

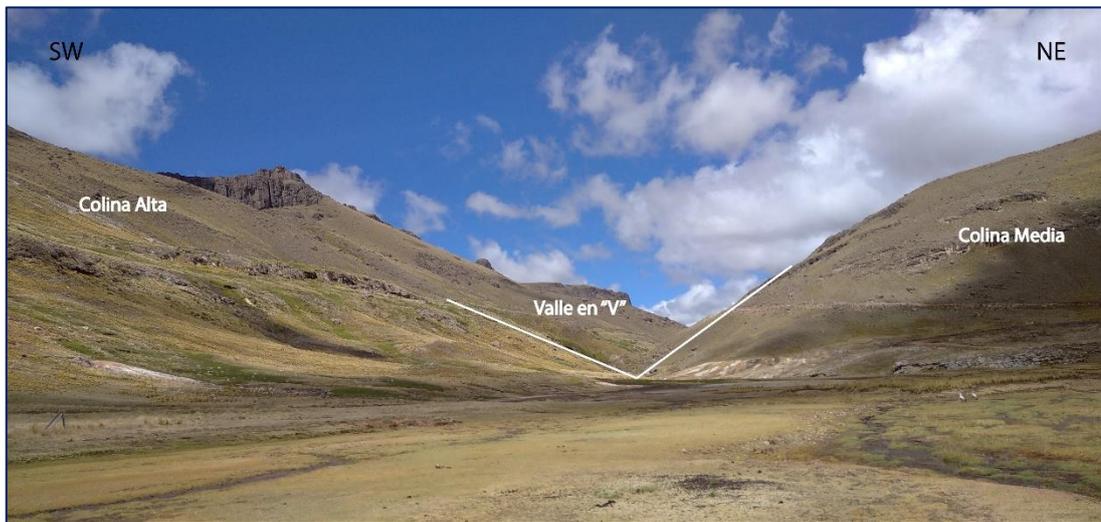


Figura 64. Valle "V" rodeado de colinas altas y colinas medias.



Figura 65. Valle "V" acompañado de colinas medias.

4.9.3. Sistema Glaciar

A. Valle "U" (G-VaU)

El valle en forma de U es característico de la erosión glacial. El paso de masas gigantes de una glaciación marca el paisaje con huellas imponentes. Su poder abrasivo desgarró las paredes de bloques de roca. Estos son triturados y llevados corriente abajo. Estas son las morenas. Esta unidad se puede apreciar en la zona de trabajo en

la quebrada de Llucupampa, Ucuntaya, entre otras.

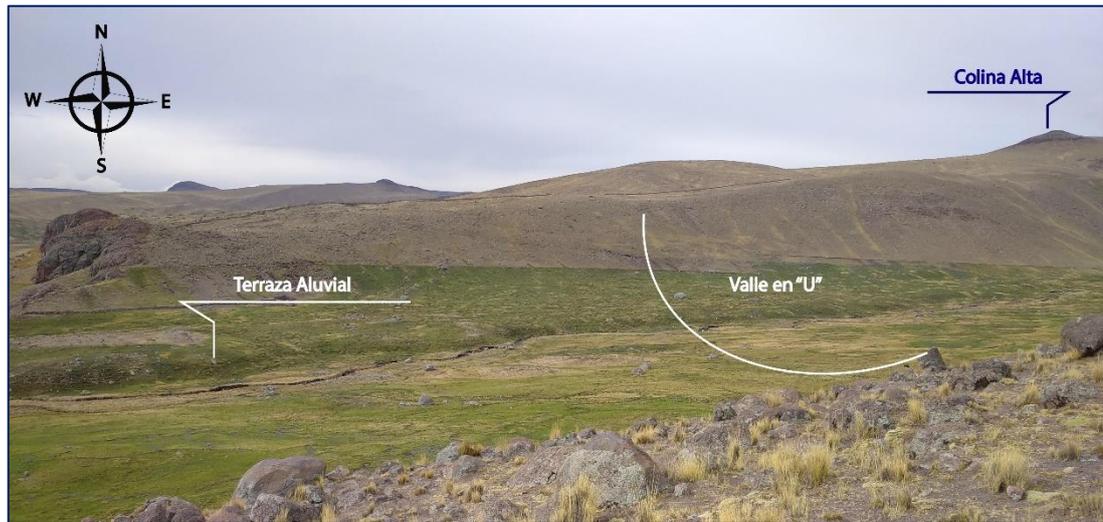


Figura 66. Valle en "U" ubicado a cercanías de las aguas termales de Aguas Calientes.



Figura 67. Valle en "U" ubicado en Jaraña.

B. Morrenas (G-Mo)

Fragmentos de roca que han sido transportado o depositados por el hielo.

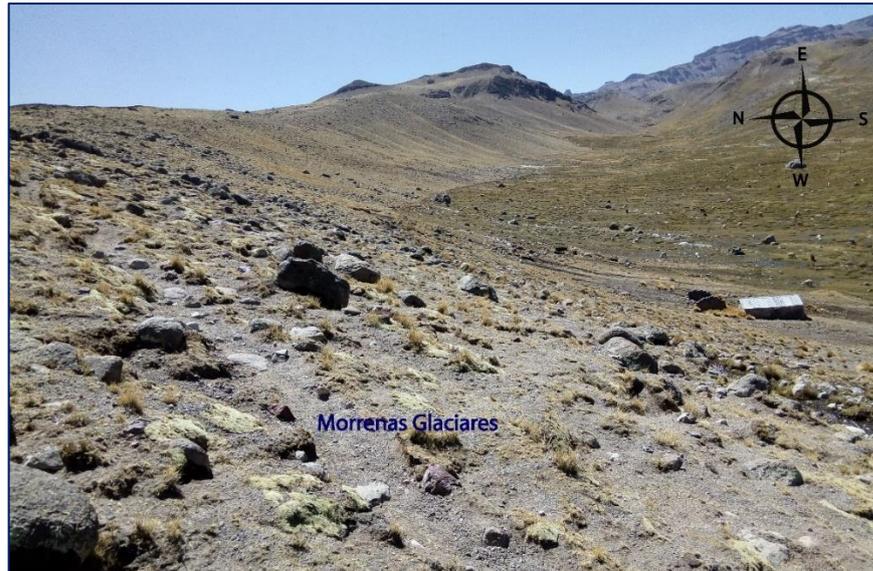


Figura 68. Morrenas glaciares, los cuales ocupan grandes extensiones de terreno.

4.9.4. Sistema Volcánico

A. Caldera Volcánica (V-CaVo)

Las calderas volcánicas son grandes depresiones centrales, formadas por las explosiones que destruyen la parte central del edificio volcánico y acaban con su colapso. Estas grandes depresiones tienen forma elipsoidal o circular y están rodeadas total o parcialmente por un fuerte escarpe.

B. Domo Volcánico (V-DoVo)

Es el que se forma por la erosión de los estratos sedimentarios que cubren un lacolito o batolito, descubriendo las rocas ígneas que los forman.



Figura 69. Domo Volcánico ubicado a espaldas del C.P. Pinaya.

4.9.5. Sistema Antrópico

La geodinámica externa e interna en la zona dio el modelado de la superficie terrestre quedando diferentes unidades geomorfológicas las cuales están constituidas por las construcciones y/o modificaciones efectuadas en la superficie o subterráneo tales como:

A. Viviendas (An-Vi)

Indudablemente las construcciones de viviendas contribuyen en la modificación del relieve terrestre. La mayor concentración de viviendas está ubicada en el Centro Poblado de Pinaya, dentro del área de estudio se pudo observar pocas viviendas muy aparte de los ya mencionados.

B. Zona Urbana (An-Zu)

Conjunto de viviendas agrupados en una población, en este caso en particular se tiene la presencia del centro Poblado de Pinaya.



Figura 70. Zona urbana del C.P. Pinaya y al fondo se observa una colina media conformado por una intercalación de estratos de areniscas y conglomerados.

C. Cantera (An-can)

Es el lugar de donde se extrae rocas para ser usadas en construcción, etc. En el caso de la zona de estudio se realiza la extracción de toba volcánica, la cual es utilizada para la reparación de carreteras.



Figura 71. Cantera de toba, que se usan para la reparación de las carreteras.

Tabla 8. Unidades Geomorfológicas.

SISTEMA	UNIDAD	SUBUNIDADES	SIMBOLOGIA	DESCRIPCIÓN
MONTAÑOSO	MONTAÑAS		M-Mo	Se considera así a los relieves con una gran elevación superior a los 300 m.
		C. Alta	M-Ca	Se considera así a los relieves altura no superior a los 300 m, de cimas redondeadas.
		C. Media	M-Cm	Se considera así a los relieves que no superan los 80 m. de altitud, con cimas onduladas.
		C. Baja	M-Cb	Conformado por relieves que no superan los 40 m. de altitud, constituido por cima abruptas, se localizan de manera dispersa-
	COLINAS	PIE DE MONTE	M-Pi	Esta geoforma se encuentra en la parte inferior de las montañas.
FLUVIAL	BOFEDALES		F-Bo	Emplazadas en zonas de baja pendiente, no muy extensas, con presencia de plantas hidrofíticas, permanentemente se encuentra húmedo.
	RIOS		F-Ri	Son las corrientes que conducen agua solamente en periodos de lluvia cada año. Constituido por ríos de 1°, 2° y 3° orden con un sistema de drenaje meandriforme.
	TERRAZA FLUVIAL		F-Te	Son formaciones escalonadas compuestos de material fino – medio. Ubicado en el borde del río.
	LLANURA ALUVIAL		F-LLa	Caracterizado por la presencia de pendientes bajas, conformado por depósitos cuaternarios.
	VALLE “V”		F-VaV	El valle en forma de V es típico de uno que ha sido erosionado por el flujo de agua. La erosión es más pronunciada cuando el flujo es de agua pesada (con carga sedimentaria).

GLACIAR	VALLE U	G-VaU	Los valles glaciares se caracterizan por presentar un perfil transversal en "U", este rasgo principal permite diferenciar este tipo de canales por los que se desliza o deslizó una lengua de hielo. Fragmentos de roca que han sido transportado o depositado por el hielo.
	MORRENAS	G-Mo	
VOLCÁNICO	CALDERA VOLCANICA	V-CaVo	Es una gran depresión, distinta de un cráter, causada por diferentes factores, pueden ser el hundimiento de una cámara magmática o por deslizamiento. Es el que se forma por la erosión de los estratos sedimentarios que cubren un lacolito o batolito, descubriendo las rocas ígneas que los forman.
	DOMO VOLCÁNICO	V-DoVo	
ANTRÓPICO	VIVIENDAS	An-Vi	Construidas por los habitantes de la zona. Compuesto por la existencia de desarrollo e infraestructuras de ordenamiento territorial. Lugar de donde se extrae arenas y rocas.
	ZONA URBANA	An-Zu	
	CANTERA	An-can	

Fuente: Elaboración Propia

4.10. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LAS FORMACIONES GEOLÓGICAS

Según la carta geológica actualizada de Ocuvi y Lagunillas y los trabajos realizados en campo. Las rocas más antiguas del área de estudio corresponden a la Formación Hualhuani conformada por areniscas blancas de grano medio a grueso, seguido por la Formación Ayavacas, la cual consta de calizas micríticas y bioclásticas con vetillas de calcita bien fracturadas. Esta formación aflora en la localidad de Atecata, presenta, plegamientos, fallas geológicas y fajas de deformación en las rocas, los cuales nos permiten clasificar a esta secuencia como materiales permeables con condiciones de



ser acuíferos fisurados sedimentarios, asimismo de acuerdo a los análisis realizados en los precipitados que dejan las fuentes termales se observan gran cantidad de material carbonatado lo cual estaría indicando que el fluido geotérmico podría estar lixiviando a las calizas de la Formación Ayavacas en profundidad, lo cual permite también interpretar que podría ser el reservorio sedimentario geotérmico (acuífero profundo).

Se observan también secuencias de tobas líticas, lavas y volcanoclásticos del Oligoceno-Mioceno, que pertenecen al Grupo Tacaza; los cuales muestran un contraste bien marcado en su comportamiento hidrogeológico. Las tobas líticas son por lo general impermeables, las secuencias de lava y volcanoclásticos son acuíferos volcánicos de moderada productividad, de donde se tiene una serie de surgencias o manantiales. El comportamiento hidrogeológico de las tobas líticas es bastante variable, cuando la porosidad es alta puede llegar hasta los 50% de porosidad. Sin embargo, en el sector de Torohuani, norte de Jarpaña, las tobas líticas presentan matriz muy fina con un buen porcentaje de cenizas volcánicas, caracterizando como material impermeable a esta unidad, sin embargo, las lavas se encuentran bien fracturadas, tienen un comportamiento permeable.

Las tobas líticas cristalinas del Grupo Palca y lavas andesíticas del Grupo Sillapaca correspondientes a los centros volcánicos de Turputa, Atecata y Sillapaca del Oligoceno y Mioceno, tienen permeabilidad secundaria adquirida por el enfriamiento de las lavas durante su emplazamiento, estos favorecen la infiltración de aguas de lluvia y circulación a través de las fracturas por lo cual se caracteriza como acuíferos volcánicos fisurados. Las tobas líticas y cristalinas del Grupo Palca, presentan en sectores muy buena porosidad y permeabilidad permitiendo llegar a superficie las surgencias de las aguas subterráneas (fuentes frías), pero en otros sectores se comportan como materiales poco permeables que confinan a los acuíferos tipo lávicos.



Los depósitos de conglomerados correspondientes al nivel superior del Grupo Puno presentan poca permeabilidad y se le ha caracterizado como acuitardos sedimentarios. Los depósitos aluviales, fluviales y coluviales son porosos, no consolidados, tienen matriz limo arenosa de baja permeabilidad y son favorables para la formación de acuíferos superficiales, y zonas de infiltración como zonas de recarga.

Geodinámica externa

- Erosión diferencial: Este tipo de erosión se desarrolla por la presencia de litologías muy diferentes en superficie. Producto de este tipo de erosión es que se observan crestos de cuerpos mineralizados, es decir vetas con presencia de minerales de cuarzo, jaspe y calcedonia, las cuales son muy resistentes a la erosión, mientras que la roca encajonante ha sufrido un mayor desgaste debido a las precipitaciones pluviales, cambio de temperatura, congelamiento, entre otros factores.
- Erosión laminar: Es el producto del transporte del material clástico paralelamente a la superficie del terreno, debido a las precipitaciones pluviales. Es observada muy claramente en las laderas de las colinas el transporte de material detrítico, con presencia de óxidos, con una apariencia de color rojiza a amarillenta.
- Erosión fluvial: Es producido por las corrientes de agua. Los valles que se observan son juveniles y maduros en forma de “V”.
- Erosión Antrópica: El hombre también forma parte de la variación del relieve terrestre, por ejemplo, la construcción de la carretera, viviendas, etc.

4.11. CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS GEOTÉRMICAS

4.11.1. Caracterización de Aguas Calientes

Aguas Calientes (65-83 °C) se localiza a 3.5 km al N-E de la comunidad de Pinaya a 4390 msnm. Las manifestaciones termales en esta zona presentan temperaturas entre 60 a 83 °C, en comparación a otros sistemas hidrotermales de la zona son las que presenta

mayor temperatura, el Ph oscila entre 6 a 7 y presentan valores de conductividad eléctrica entre los 14.8 y 16.23 mS/cm respectivamente. Las manifestaciones emergen en un área de 0.11 km², donde las aguas fluyen alcanzando su punto ebullición (Figura 68).



Figura 72. Vista al fondo de manifestaciones termales y su evaporación, las rocas a su alrededor corresponden a lavas afaníticas rojas del Grupo Tacaza.



Figura 73. Manifestaciones geotermales en la zona de Pinaya.

Las manifestaciones termales Aguas Calientes -Pinaya se ubican en la altiplanicie compuesta por depósitos glaciares, en el cambio de pendiente afloran lavas de matriz roja afanítica, ligeramente silicificada, cortadas por diques andesíticos y brechas monomícticas. Las lavas andesíticas se encuentran cubiertas por depósitos glaciares como morrenas. La precipitación de sínter no es abundante, sin embargo, existen coloraciones

rojizas y verdes.

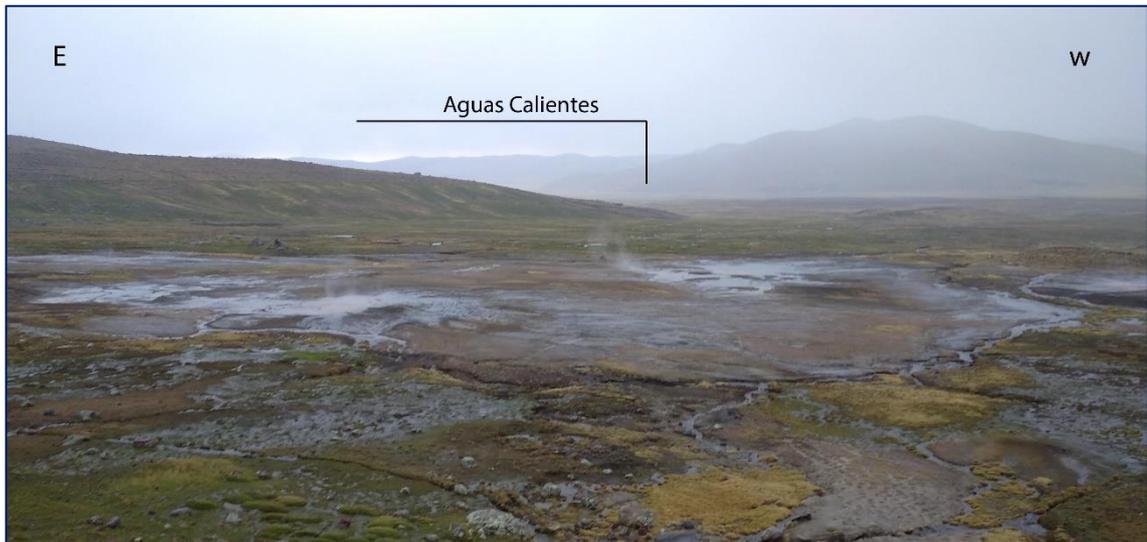


Figura 74. Vista al fondo de manifestaciones termales y su evaporación.



Figura 75. Las manifestaciones termales presentan una orientación NW.

Estructuras

En el área de estudio se tuvo la presencia de una falla muy bien definida, el plano de falla se encuentra perfectamente conservado, no está afectado por la meteorización y erosión debido a que el plano esta silicificado, presenta estrías muy bien definidas, se trata de una falla normal siniestral.



Figura 76. Plano de falla con estrías, en lavas afaníticas rojizas, se evidencia el comportamiento predominante de Rb 101 Bz 29°, con un peach de 55° ubicado en Aguas Calientes (8278222, 297643) cota 4393.

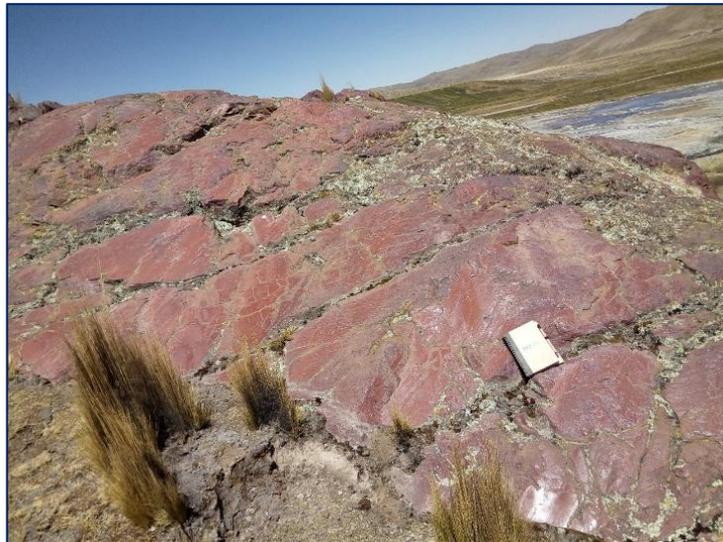


Figura 77. Plano de la falla con una cinemática siniestral, normal.

Sínter

En esta área afloran solamente sínter reciente, se han identificado minerales como yeso y calcita.



Figura 78. Sínter reciente de Aguas Calientes

Sínter

Muestra: MPZ-008

Descripción petrológica: La muestra es de color pardo rojizo, es una roca sedimentaria química, posee una textura clástica, está compuesta por calcita y yeso principalmente.

Muestra obtenida de aguas calientes.



Figura 79. Muestra de mano de sínter E:297693 N:8278096

Sínter

Muestra: MPZ-009

Descripción petrológica: La muestra tiene un color blanco grisáceo, es una roca sedimentaria química, está compuesta por calcita y yeso principalmente. Muestra obtenida de aguas calientes.



Figura 80. Muestra de mano de sinter blanquecino E:297508 N:8278140

Pinaya I: Es la más pequeña fuente termal (geiser) en donde los visitantes suelen utilizarlo para la cocción de los huevos, que después consumen. Generalmente los colocan en bolsas y posteriormente los introducen a la fuente termal para su cocción y posterior consumo. Esta actividad es bastante común, suelen dejar restos de ello en el suelo, así mismo siempre se encuentra restos de bolsas a su alrededor. La temperatura de esta fuente termal es de 82 C°.

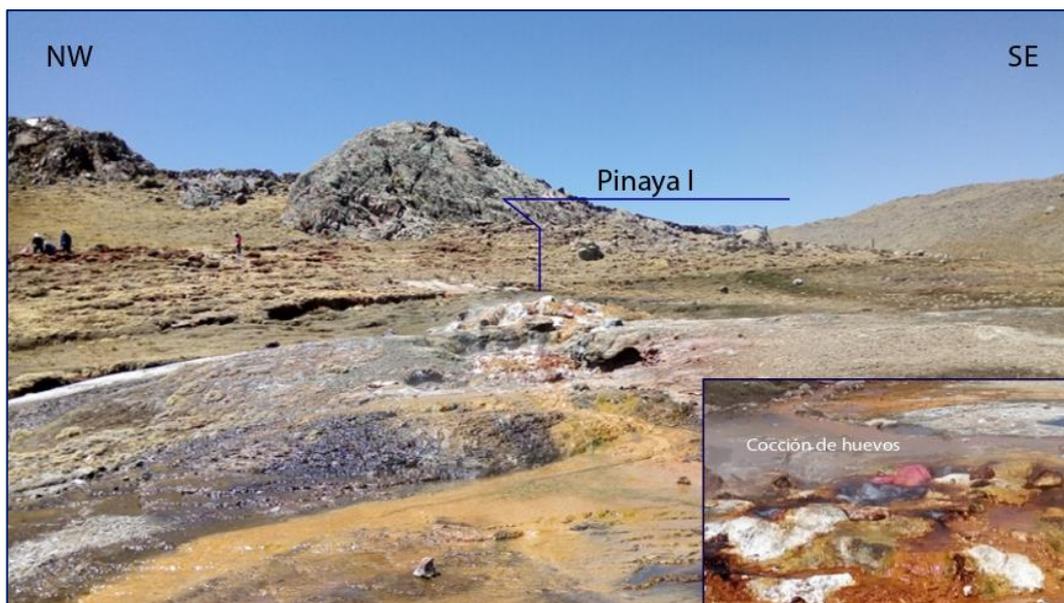


Figura 81. Pinaya I Denominada así en función de su tamaño al ser la más pequeña de las fuentes termales perteneciente a aguas calientes. En la esquina superior derecha se observa como los visitantes y habitantes de la zona lo usan para la cocción de huevos.

Pinaya II: Denominada así por su tamaño, al ser la segunda más grande, tiene aspecto de piscina como la mayoría de las fuentes termales presentes en aguas calientes, la temperatura de dicha fuente es de 80 C°.

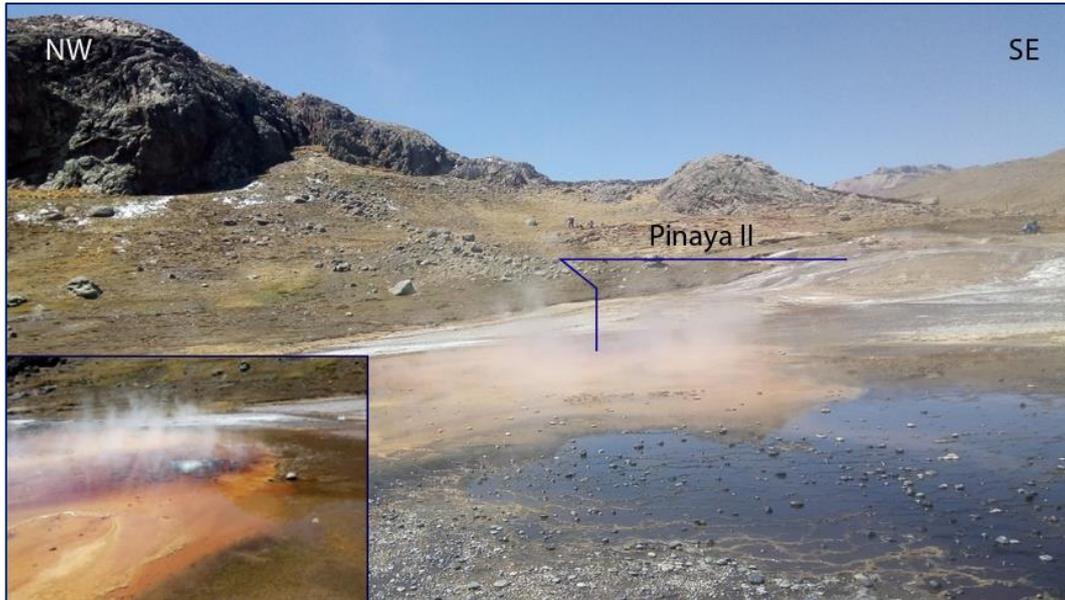


Figura 82. Pinaya II, es una fuente que tiene forma de piscina amorfa que es somera y su temperatura es de 80 C°.

Pinaya III: Cuyo tamaño es menor a los anteriormente mencionados. Donde se observa la precipitación de sínter en su interior (material de color amarillo-rojizo) por la presencia de Fe, la temperatura de dicha fuente termal es de 70 C°.

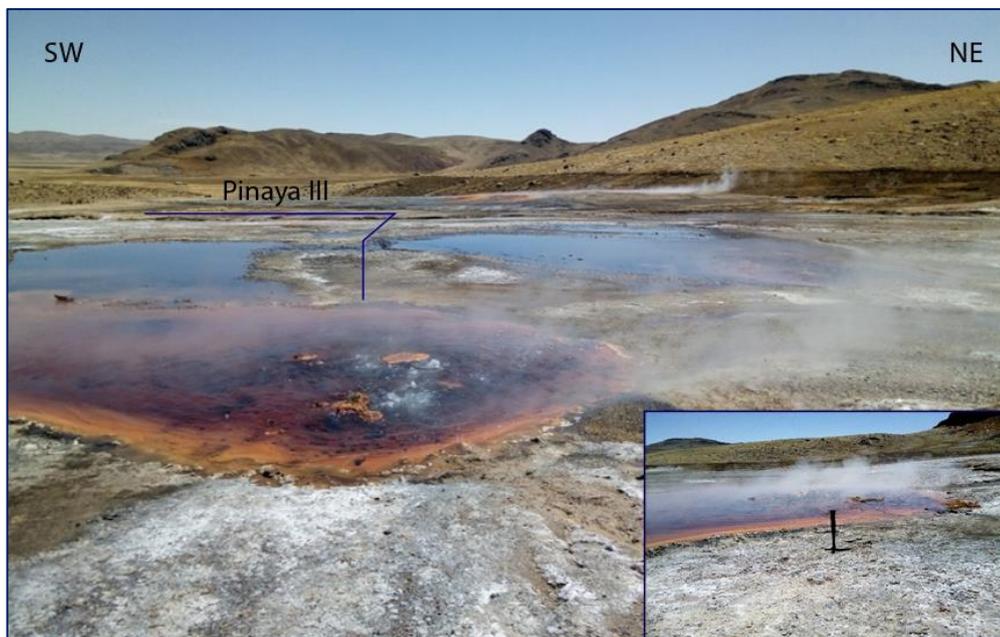


Figura 83. Pinaya III, tiene aspecto de piscina con una temperatura, lo de color naranja son óxidos.

Pinaya IV: Denominado así por ser la de tamaño más apreciable comparándola con las demás. El color de esta fuente termal es muy particular debido a que su color es un celeste pálido, su profundidad es superior a las demás fuentes termales de esta zona.

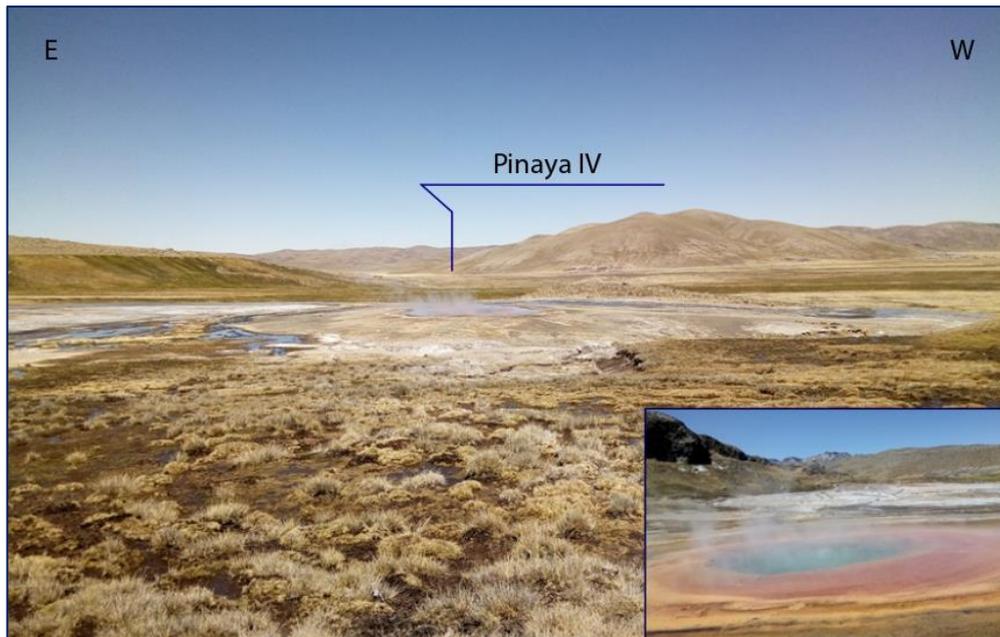


Figura 84. *Pinaya IV es la más grande fuente termal de Aguas Calientes, el color de las aguas es de un color celeste el cual es muy diferente a las demás fuentes termales de esta zona.*

En la zona los pobladores de la comunidad de Pinaya han construido una piscina rústica de concreto (Figura 81) que es utilizada para bañarse. En el mes de noviembre del 2019 se ha observado que esta piscina se encuentra descuidada por los usuarios(bañistas), no hay limpieza, echan todos sus desechos como: Plásticos, pilas, botellas, envases de champú y otros en los alrededores y dentro de la piscina, sin embargo, los pobladores y los visitantes los siguen usando. Para poder de un lugar de esparcimiento y recreación.

El potencial turístico que ofrece aguas calientes es innegable, posee unas hermosas vistas, Pinaya IV tiene mucho parecido con una de las aguas calientes del parque de Yellowstone ubicado en E.E.U.U. lo único que difiere es el tamaño de dicha fuente y el hecho que en Yellowstone el agua sale de chorro de la fuente. Por lo demás no hay mucha diferencia este campo geotérmico merece la pena ser visitado y ser cuidado.



Figura 85. *Piscina rústica de concreto, las aguas de dichas pozas son provenientes de las fuentes termales anteriormente mencionadas. En donde los bañistas suelen pasar horas sumergidos en dichas aguas (niños y adultos).*

Alteración Hidrotermal

En la prolongación de fallas Sillapaca, las lavas presentan alteración hidrotermal, son afloramientos de color blanco y otros de colores rojizos. En las de color blanco presentan minerales como albita, montmorillonita y en las zonas rojizas se caracteriza por presentar minerales como halloysita, cristobalita y alunita. La presencia de estos minerales permite clasificar la alteración como propilítica y argílica avanzada. Las condiciones de la formación de los minerales de alteración se deben a partir de los arreglos estructurales.

4.10.2. Caracterización de Jaraña

La zona geotérmica denominada por los pobladores como Jaraña está ubicada en el altiplano de los Andes, a 11 km al N-E de la comunidad de Pinaya perteneciente al distrito de Paratía, provincia de Lampa en el departamento de Puno al sur del Perú a una altitud de 4,500 m s n m (figura. 87). La descarga de las manifestaciones ocurre a lo largo del río Pacaje hasta la zona de Jarpaña; con presencia de formaciones naturales de pozas

de aguas calientes que varían de coloración asociada a la precipitación de sales de color blanquecino y rojizo este último con mayor predominancia y presencia de algas termófilas de colores verdes a rojizos.

Se encuentran ubicadas en rocas volcánicas, lavas andesíticas gris de textura porfirítica con fenocristales de plagioclasa, esta roca en algunos sectores se encuentra silicificada, variando de menor a mayor intensidad, se observan vetillas de sílice y brechas con clastos angulosos, existen oquedades rellenas con óxidos. Las secuencias silicificadas son cubiertas por eventos de lavas andesíticas y autobrechas que no se encuentran afectadas por ningún tipo de migración de fluidos. Aguas arriba, la zona de alteración hidrotermal es argílica siendo difícil identificar la roca protolito, pues la roca se presenta de color blanco abundante en arcillas, en el flanco norte del cerro Condorsayana se identifican secuencias volcanoclásticas infrayaciendo a lavas andesíticas, por lo que se supone que este sector donde aflora el domo Turputa de forma cortante a las unidades inferiores, estuvo conformado por secuencias de tobas y volcanoclásticos, siendo posteriormente afectadas por la migración de fluidos. En las lavas andesíticas reciente se encuentra azufre en las fracturas conformada por minerales como cristobalita (Cuarzo de baja temperatura), muscovita, montmorillonita y cuarzo.



Figura 86. Manifestaciones geotermales en la zona de Jaraña.



En Jaraña, las manifestaciones termales ubicadas en el río Pacaje son 7, de norte a sur son las siguientes: la primera se ubica en el margen oeste del río Pacaje, presenta una temperatura superficial de 69°C a una cota de 4571msnm.

Jaraña I y Jaraña II

Ambas fuentes termales poseen una alineación SW-NE, son pequeñas posas de una profundidad somera. La temperatura de dichas fuentes es de 55 y 58 C° respectivamente. La presencia de sínter no es abundante como en el caso de aguas calientes.

Las manifestaciones termales en esta zona presentan temperaturas entre 52 a 62 °C, pH de 5.9 a 6.7 y con valores de conductividad eléctrica entre los 4 a 5 mS/cm respectivamente, Las aguas son incoloras e inodoras y se presentan burbujeo ocasional en algunas fuentes. El área de descarga termal ocurre en aproximadamente 0.7 km² donde la roca se encuentra en superficie bastante alterada e hidrotermalizada, asimismo se observan que los cerros que rodean al sistema hidrotermal también se hallan intensamente hidrotermalizados de ahí que lleva el nombre de Quello Apacheta o cerro Turputa. En la zona se observa la presencia de la Formación Sillapaca y la Formación Palca, así como presencia de pórfidos.

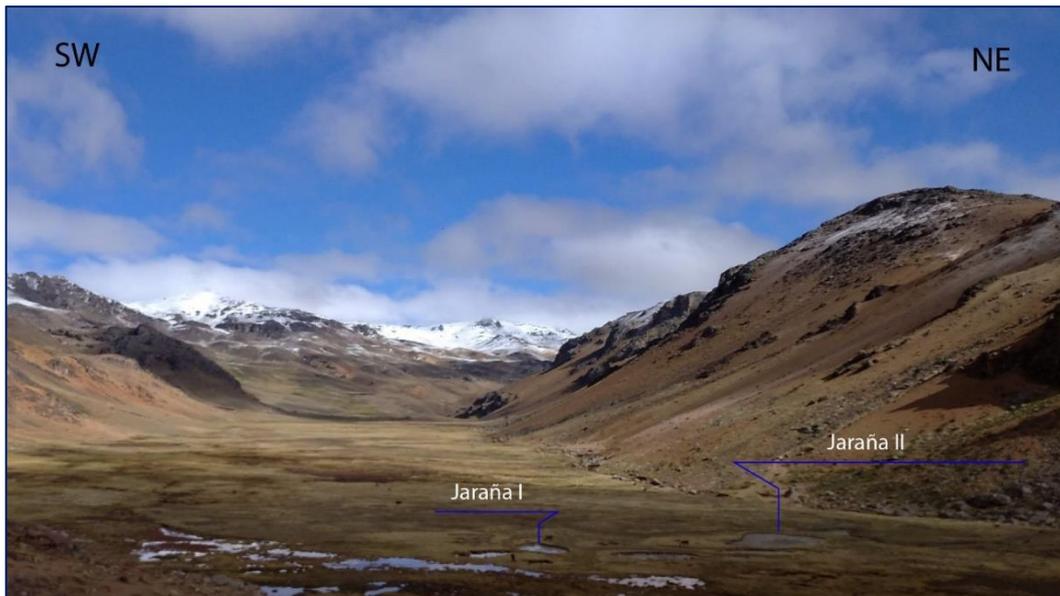


Figura 87. Vista de Jaraña I Y Jaraña II ambas fuentes termales son pequeñas y se encuentran situadas dentro del Valle en “U”.

Jaraña III

Esta fuente es una de las más representativas de esta zona Jaraña, de igual manera la presencia de sínter resiente no es abundante, es una poza de una profundidad somera sus aguas son incoloras e inodoras y se presentan burbujeo ocasional parecidas a las otras fuentes termales presentes en esta zona. La temperatura que posee Jaraña III 62 C°.



Figura 88. Vista de Jaraña III, se observa la evaporación de la fuente termal.

Jaraña IV

Tiene apariencia de piscina es un ojo termal con una temperatura de 52 C° la

presencia de sínter tampoco es abundante esta fuente en particular posee un color rojizo el cual es diferente a las otras aguas termales.



Figura 89. Jaraña IV, al fondo se observan capas de lavas andesíticas con silicificación.

Jaraña V

El tamaño del mismo es inferior a las fuentes termales anteriores y es mucho más somera,



Figura 90. Vista de Jaraña V, se localiza a lado de la carretera.

Jaraña VI Y VII

Son de un diámetro mucho menor tamaño en comparación de las demás, el sínter reciente que poseen es mínimo, las temperaturas de ambas fuentes son mucho menores, poseen una temperatura de 45 y 48 C° respectivamente.



Figura 91. Vista de Jaraña VI y Jaraña VII, el sítter que poseen ambas fuentes termales es mínimo.

Las fuentes termales son utilizadas por los pobladores de la zona para bañarse, para lo cual han construido una pequeña piscina rústica de concreto (Figura 88). La fotografía fue tomada en el mes de diciembre del 2020 permanece sin agua y sin bañistas por la pandemia (COVID 2019), el acceso era muy limitado. Este lugar tiene un gran potencial como zona turística y de esparcimiento.



Figura 92. Piscina rústica de concreto, las aguas de dichas pozas son provenientes de las fuentes termales anteriormente mencionadas, antes de la pandemia los bañistas solían permanecer horas sumergidos en dicha piscina.

A una distancia de 1.2 km desde la última fuente de Jaraña aparecen otras manifestaciones geotermales que se localizan cerca de la zona de Chupahuito a 12 km al

N-E de la comunidad de Pinaya perteneciente al distrito de Paratía a una altitud de 4,500 m. s. n. m. (Figura 94). Estas manifestaciones presentan características muy similares a las fuentes de Jaraña, lo que indica que pertenece al mismo sistema hidrotermal. Las manifestaciones geotermales presentan temperaturas entre 62 a 64°C.



Figura 93. Manifestaciones geotermales en la zona de Chupahuito.



Figura 94. Vista SN de las manifestaciones geotermales en la zona de Chupahuito.

El área de descarga termal ocurre en aproximadamente 0.12 km² donde la roca se encuentra alterada e hidrotermalizada, asimismo se observa presencia de algas termófilas de colores verdes a rojizos. Desde esta zona el agua del río Pacaje cambia de color a amarillento, posiblemente asociado rocas con alto contenido de azufre que al



interaccionar con los fluidos calientes existentes en la zona influyen en la coloración de las aguas.

Alteración Hidrotermal

A los alrededores de las manifestaciones termales en el río Pacaje, las rocas presentan alteración hidrotermal de aspecto rojizo y roca de tonalidades amarillentas, la roca se encuentra constituido por sílice masivo, presenta oquedades, algunos rellenos por óxidos. En este sector la alteración hidrotermal se encuentra caracterizada por una silicificación.

Al norte, cerca del cerro Turputa, las rocas se encuentran afectadas por alteración hidrotermal, siendo los afloramientos de colores rojizos y blancos, el protolito es difícil de reconocer, sin embargo, en algunos sectores afloran rocas volcanoclásticas que infrayacen a las lavas andesíticas del Grupo Sillapaca. Los minerales de alteración se encuentran caracterizados por cuarzo, caolinita, alunita y tridimita. En este sector la alteración hidrotermal se encuentra relacionada a una alteración hidrotermal argílica y argílica avanzada, por la presencia de cuarzo en todas las muestras evidenciaría el exceso de sílice en el proceso de formación de los minerales de alteración hidrotermal.

Siguiendo la zona norte, las zonas de alteración hidrotermal argílica avanzada se intercalan con minerales de alteración como cuarzo, alunita, rutilo y hematita. Según este análisis resulta que en la zona norte del cerro Turputa se encuentra intercalada con rocas silicificadas con presencia de óxidos como hematita. Esto probablemente se debe al control de diaclasas principales y brechas orientadas dirección este- oeste.

4.10.3. Caracterización de Jarpaña

En el caserío de Jarpaña, se encuentran pequeñas fuentes termales de agua inmóvil a una cota de 4350 msnm, las fuentes termales se encuentran ubicadas en el margen del río Jallpamayo.

En ambos márgenes del río Jallpamayo afloran precipitaciones de sínter de hasta 2m, a una cota de 4358 y 4367 msnm con aparente actividad termal actualmente extinta. Las manifestaciones termales afloran en tobas líticas blancas soldadas. Los componentes como fragmentos líticos heterogéneos subangulosos de 2cm, pómez blanca alargada y en algunas zonas lixiviadas, cristales de plagioclasa y cuarzo se encuentran en ceniza blanca. Sobreyacen en formas masivas tobas cristalolíticas blancas de matriz de ceniza deleznable. En este sector las tobas sobreyacen en discordancia angular a lavas dacíticas porfiríticas (Grupo Tacaza). Las lavas presentan oquedades rellenas por cuarzo, el afloramiento se extiende por el río Verde.

Jarpaña I

Esta fuente se encuentra rodeada de sínter antiguo la fuente termal es muy pequeña, la surgencia termal es poca, la temperatura de dicha fuente es 16 C°, esta agua puede ser tocada sin ningún problema no ofrece problema alguno.



Figura 95. Vista de Jarpaña I, se observa la presencia de sínter que posee una coloración blanquecina.

Jarpaña II

Al igual que la anterior la fuente es pequeña y de baja temperatura



Figura 96. Vista de Jarpaña II en donde se observa que es una fuente termal muy pequeña.

Jarpaña III

Fuente termal de tamaño reducido con temperatura de 17 C° es una fuente de un diámetro <1 m, el color del sínter es amarillo por la presencia de óxidos.



Figura 97. Vista de Jarpaña III, alrededor se tiene la presencia de precipitaciones de sínter antiguos.

Jarpaña IV

Es una fuente muy pequeña y posee una temperatura de 16 C° presenta presencia de sínter reciente que cubre el sínter antiguo diferenciándolo por su coloración.

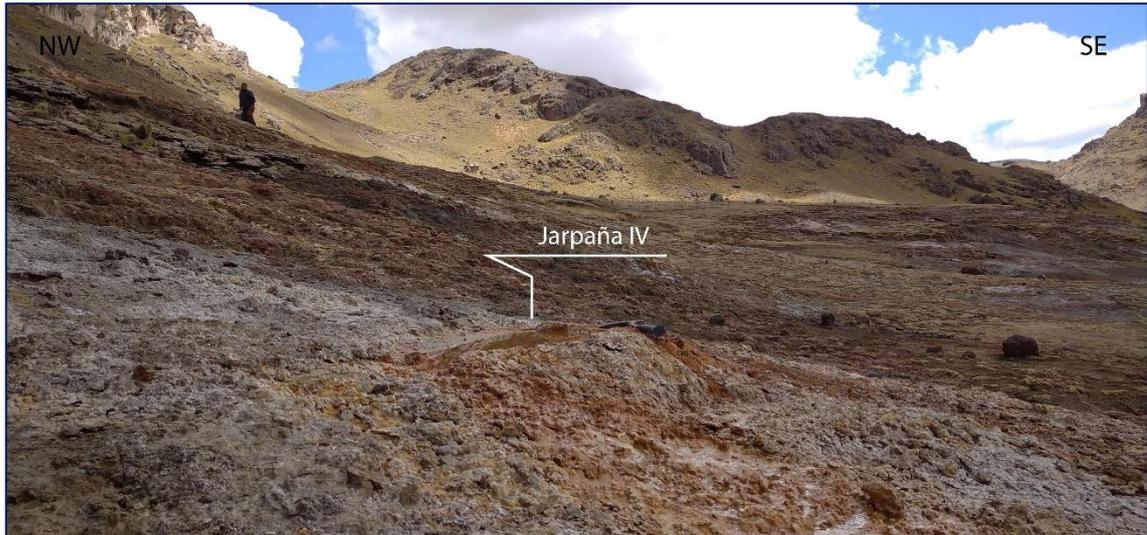


Figura 98. Vista de Jarpaña IV la cual es muy somera y pequeña, se observa la presencia de óxidos de Fe.



Figura 99. Vista de cerca de Jarpaña IV.

Jarpaña V

Al igual que las otras el tamaño de la fuente es pequeña, tiene una temperatura baja así mismo la profundidad es que posee es muy somera lo cual dificulta la obtención de la toma de muestra.



Figura 100. Vista de Jarpaña V, al fondo se observa al Grupo Tacaza, Palca y Sillapaca.



Figura 101. Vista de cerca de Jarpaña V, en donde claramente se observa que la temperatura es mucho menor en comparación de Aguas Calientes y Jaraña.

Se tiene la presencia de capas de sínter antiguos en las laderas de los cerros, estas zonas son propensa a colapso debido a que el sínter no posee una buena resistencia, las capas de sínter antiguo tiene un espesor de 2m.



Figura 102. Las precipitaciones de sínter calcáreo antiguos, se encuentran en los bordes de las laderas.

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DE LAS AGUAS TERMALES Y LOS CUERPOS RECEPTORES (RÍOS)

5.1.1 Ubicación de las Estaciones de Muestreo

La tabla 9 y 10 se indica la ubicación de los puntos de muestreo de las aguas termales y de los cuerpos receptores respectivamente.

Tabla 9. Ubicación de las estaciones de muestreo de las aguas termales.

FECHA	ESTACIÓN	UBICACIÓN			UBICACIÓN	OBSERVACIÓN
		ESTE	NORTE	COTA		
28/09/2019	MP-01	297503	8278140	4386	Aguas Calientes	Fuente termal(piscina)
21/12/2020	MJ-001	301658	8285080	4567	Jaraña	Fuente termal
21/12/2020	MJ-004	308295	8283035	4371	Jarpaña	Fuente termal

Tabla 10. Ubicación de las estaciones de muestreo de los cuerpos receptores.

FECHA	ESTACIÓN	UBICACIÓN			UBICACIÓN	OBSERVACIÓN
		ESTE	NORTE	COTA		
28/09/2019	MP-02	296841	8278223	4384	Aguas Calientes	Rio Sillihuirí
21/12/2020	MJ-002	302398	8285029	4552	Jaraña	Rio Pacaje
21/12/2020	MJ-003	303603	8284901	4519	Jaraña	Rio Pacaje
21/12/2020	MJ-005	308295	8283150	4355	Jarpaña	Rio Jallpamayo
28/09/2019	M6	294296	8276639	4375	Pinaya	Casa de Pinaya

5.1.2. Descripción de las Estaciones de Muestreo

Muestra M1

Esta muestra es la correspondiente a la zona de aguas calientes, el agua es insípida, inodora e incolora, tiene aspecto de un montículo de sínter (geiser) en esta fuente se observó la presencia de huevos que se sumergían para su posterior cocción, es un acto

habitual que los lugareños y los visitantes usan. Ellos realizan tal acto sin saber realmente la composición de las aguas debido a que hay aguas que si se podrían considerar como medicinales y otras no debido a que dentro de su composición se tiene la presencia de metales que podrían causarle daños posteriores. En el caso de los resultados del muestreo se determinó que no es un agua que pueda ser usada con fines recreacionales debido a que se superan los límites permisibles en cuanto a determinados metales como el As. Además de ello se debe tomar en consideración que al entrar en contacto dichas aguas con el huevo los metales ingresan por los poros abiertos y absorben los componentes de la fuente termal.



Figura 103. Estación de muestreo de la muestra M1, localizado en Aguas Calientes.

Muestra M2

Esta muestra se tomó del río Sillihuirí antes de entrar en contacto con la fuente termal denominada aguas calientes, de esta muestra solo se hizo el análisis de los parámetros físicos y químicos dando como resultado que es un agua buena según la clasificación de Riverside y de Wilcox.



Figura 104. Estación de muestreo de la muestra M2 localizado en el río Sillihuirí, el cual es proveniente de los nevados de la cordillera del Sillapaca.

Muestra M-001(M4)

Tiene dos nombres debidos a que el nombre de MP-001 se envió a los laboratorios del sur para que sean analizados por ICP-OES y la muestra M4 es correspondiente al mismo punto solo que esta se envió a los laboratorios del INIA para su análisis de parámetros físicos y químicos.



Figura 105. Estación de muestreo de la muestra MP-001(M4), perteneciente a una fuente termal en la zona de Aguas Calientes.

Muestra MP-002 (M5)

Al igual que el anterior en este caso sucedió lo mismo la muestra MP-002 se rotulo de esa manera para que fuera enviado a los laboratorios analíticos del sur y la muestra con el rotulo de M5 se envió al INIA PUNO para analizar sus parámetros físicos y químicos.



Figura 106. Estación de muestreo de la muestra MP-002(M5) localizado en el río Taquipunco, este río es habitado por peces.

A continuación, se muestra cómo se realizó la toma de muestra en campo, exactamente se observa cómo se realiza el tema del enjuagado antes lo cual se realiza de manera repetida por tres veces antes de ser tomada la muestra.



Figura 107. Se muestra la forma en cómo se obtuvo la muestra, exactamente se observa cómo se realizó el enjuagado de las botellas de polietileno (3 veces).

Muestra M6

Esta muestra se obtuvo en el C.P. de Pinaya, para lo cual principalmente se tomó esta muestra para ser considerada como una muestra en blanco, para comprobar el control de calidad del laboratorio.

Al ser una muestra de agua potable de alguna manera ya se conocían ciertos estándares, así mismo, aunque el agua que toman habitantes no proviene del río Pinaya, con dicho análisis se logró comprobar que el agua que consumen es un agua considerada como buena según la clasificación de Wilcox y de Riverside.



Figura 108. Estación de muestreo de la muestra M6, esta muestra se tomó del caño de una vivienda del C.P. de Pinaya.

Muestra MJ-001

Es una muestra que corresponde a la zona de Jaraña en donde se tomó como fuente termal representativa a la fuente que veremos a continuación (Figura 105), donde en esta ocasión se tomaron dos muestras con el mismo nombre una para ser enviada a Arequipa y la otra a Puno.



Figura 109. Estación de muestreo MJ-001 se observa el vapor de la fuente termal.

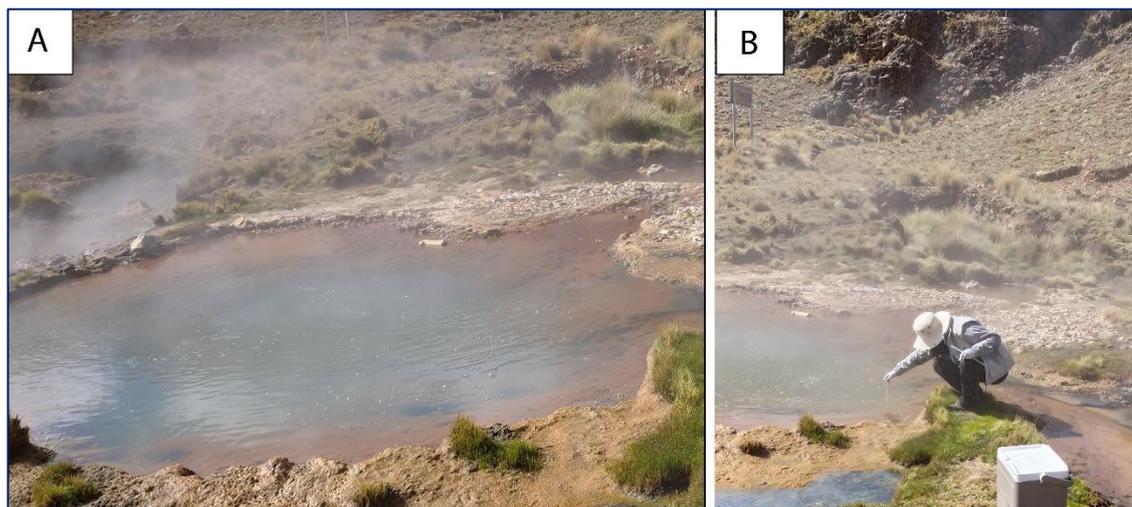


Figura 110. (A) Se muestra a la fuente termal donde se realizó el muestreo (B) Se muestra cómo se realizó la toma de la temperatura de dicha fuente, de manera similar se realizó en las otras.

Muestra MJ-002

Esta muestra se tomó en el Rio Pacaje que es el lugar donde desembocan las aguas de las fuentes termales de Jaraña, se puede apreciar que la coloración del río tiene un

color amarillento debido a la composición de las fuentes termales, así mismo en dicha zona se tiene la presencia de azufre nativo es por ello de su cambio de coloración.



Figura 111. Estación de muestreo de la muestra MJ-002, localizado en el río Pacaje, la coloración de las aguas es un poco amarillenta.

Muestra MJ-003

Esta se tomó a unos kilómetros más distante de la muestra MJ-002, la coloración de dichas aguas es un tanto similar a la del anterior muestra debido a que luego del lugar donde se obtuvo la muestra MJ-002 a unos cuantos metro distante, se encuentra una pequeña fuente termal denominada como Chupahuito, estas aguas también se depositan en el Rio Pacaje, se recolecto 2 muestras una para ser analizada por ICP-OES y la otra para que sean analizados sus parámetros físicos y químicos en el INIA-PUNO.



Figura 112. Estación de muestreo de la muestra MJ-003, en la imagen de la derecha se observa cómo se realizó la recolección de la muestra de agua.

Muestra MJ-004

Esta muestra fue tomada en la zona denominada como Jarpaña, esta fuente es de un tamaño pequeño, en este caso no existe la presencia de piscinas rusticas como lo hay en Aguas calientes y en Jaraña, aquí no se tiene la presencia de los mismos. Esto es debido al tamaño de dichas fuentes, así mismo las fuentes termales poseen unas temperaturas muy bajas comparándolas con la demás zonas termales (Aguas Calientes y Jaraña). El punto de muestreo MJ-004 posee una temperatura de 17 °C.

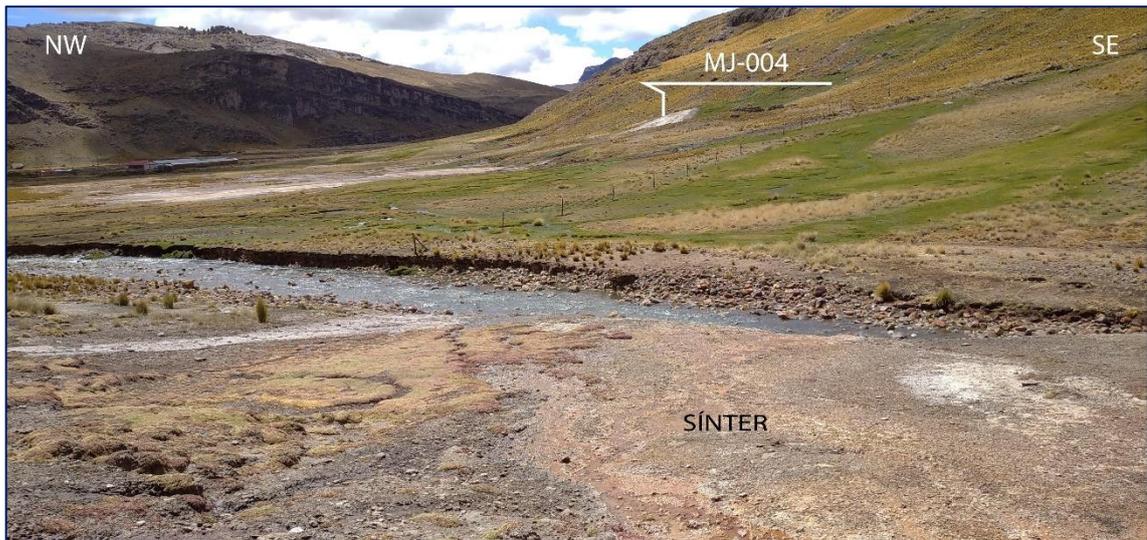


Figura 113. Estación de muestreo de la muestra MJ-004, en primer plano se observa las precipitaciones de sínter y al fondo en la ladera se encuentra la estación de muestreo.



Figura 114. (A) Se observa a la fuerza termal, que es pequeña, así mismo se observa las botellas donde se almacenaron las muestras.

Muestra MJ-005

Esta muestra corresponde a la zona de Jarpaña, la muestra MJ-005 se obtuvo del río Jallpamayo, el cual recibe descargas de aguas termales, este río es de primer orden.



Figura 115. Estación de muestreo de la muestra MJ-005 debajo del puente



Figura 116. Vista de cerca del río Jallpamayo, se observa como se realizó el muestreo, siguiendo del protocolo.

5.1.3. Temperatura de las Estaciones de Muestreo

Estos parámetros físicos son de mucha importancia dentro de esta investigación, lo cual durante la elaboración de la investigación se estuvo monitoreando en diferentes fechas dando como resultado como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 11. Temperaturas de los sitios de muestreo.

FUENTES	TEMPERATURA	
Aguas Calientes	M1	82 C°
	M2	15 C°
	MP-001(M4)	70 C°
	MP-002(M5)	15 C°
	M6	15 C°
	Jaraña	MJ-001
MJ-002		12 C°
MJ-003		14 C°
Jarpaña	MJ-004	17 C°
	MJ-005	14 C°

De la tabla 11, las fuentes termales en estudio se encuentran dentro de la clasificación propuesta por Castany, como aguas hipertermales ($> 45^{\circ}\text{C}$) para el caso de Aguas Calientes y Jaraña; para el caso de Jarpaña debido a su temperatura se clasifica como aguas frías.

5.1.4. Características Físico - Químicas de las fuentes termales (Aguas Calientes, Jaraña y Jarpaña) y sus cuerpos receptores (ríos)

A continuación, se observan las tablas 12 y 13 que contienen información sobre las características físicas y químicas. En la tabla 13 se observa a las características físicas y químicas de las fuentes termales muestreadas M1 y M4(MP-001) corresponden a la zona de Aguas Calientes. La muestra MJ-001 corresponde a la zona denominada como Jaraña y la muestra MJ-004 pertenece a la zona de Jarpaña.

En la tabla 14 se observa a las características físicas y químicas de los cuerpos receptores de las fuentes termales, con excepción de la muestra M2 y M6. La muestra M2



es la perteneciente al río Sillihuiri cuyas aguas provienen de los nevados de la cordillera del Sillapaca, por su recorrido pasa muy cerca de las fuentes termales de Aguas Calientes, en donde se mezclan y el río, continua su recorrido. La muestra M6 es agua potable tomada de una vivienda del centro poblado de Pinaya.

Las demás muestras si son las pertenecientes a cuerpos receptores (ríos), M5(MP-002) es una muestra tomada del río Taquipunco que recibe aguas de las fuentes termales esto en la zona de Aguas Calientes. La muestra MJ-002 y MJ-003 ambas son pertenecientes al río Pacaje situado en la zona de Jaraña, MJ-002 es más cercano a las fuentes termales de Jaraña que MJ-003, se separan por unos kilómetros. La muestra MJ-005 se tomó del río Jallpamayo ubicado en la zona denominada como Jarpaña, que al igual que los otros ríos mencionados reciben aguas provenientes de las fuentes termales.

Tabla 12. Parámetros fisicoquímicos de las fuentes termales, obtenidos del laboratorio de aguas del INIA - PUNO.

Parámetros	Unidad	M1	M4(MP-001)	MJ-001	MJ-004
pH		8	8.19	7.011	6.634
C.E.	mS/cm	9.5	8.11	16.96	112.90
Saltes totales	mg/l	1000	1000	12.10	80.60
Dureza total	CaCO ₃ (G.H.F.)	132.8	111.21	49.09	33.56
Alcalinidad total	CaCO ₃	2800	2900	4180.00	1580.00
R.A.S.		45.85	52.82	13.82	4.26
S.C.R.		23.70	19.30	5.70	5.12
Calcio	mg/l	10.02	122.24	124.24	68.13
Magnesio	mg/l	316.16	195.77	43.77	40.12
Potasio	mg/l	938.40	1266.84	613.87	285.43
Sodio	mg/l	3838.70	4048.00	703.80	172.5
Cloruros	mg/l	3379.33	5475.02	1031.88	446.79
Sulfatos	mg/l	84.05	93.65	45.62	61.95
Carbonatos	mg/l	0.00	0.00	0.00	0.00
Bicarbonatos	mg/l	170.82	176.92	255.02	96.39
Nitratos	mg/l	124	111.60	24.80	12.40
Clasificación Riverside		C6S4	C4S4	C6S4	C6S3
RAS		Aguas utilizables con precaución	Aguas utilizables con precaución	Aguas utilizables con precaución	Aguas no aptas-dudosa a recomendable
SCR		Aguas no recomendables	Aguas no recomendables	Aguas no recomendables	Aguas no recomendables
Tipo de agua		Muy dura	Muy dura	Dura	Dura
Diag. Wilcox		Agua no válida	Agua no válida	Agua no válida	Agua no válida

Tabla 13. Parámetros fisicoquímicos de los cuerpos receptores (ríos), obtenidos del laboratorio de aguas del INIA - PUNO.

Parámetros	Unidad	M2	M5(MP-002)	MJ-002	MJ-003	MJ-005	M6
pH		8.92	9.70	4.762	7.133	7.610	8.72
C.E.	mS/cm	0.083	4.04	5.38	7.74	5.38	0.047
Sales totales	mg/l	26	1000	3.84	5.54	4.37	15
Dureza total	CaCO ₃ (G.H.F.)	155.80	118.33	23.54	49.09	21.45	17.53
Alcalinidad total	CaCO ₃	200	680	1020.00	1120.00	1580.00	300
R.A.S.		1.02	43.45	5.02	8.13	1.83	1.51
S.C.R.		30.90	26.72	4.14	8.78	5.12	3.20
Calcio	mg/l	342.68	378.75	44.08	136.27	68.13	10.02
Magnesio	mg/l	170.24	103.36	30.40	36.48	40.12	36.48
Potasio	mg/l	821.10	879.75	746.81	488.75	746.81	719.44
Sodio	mg/l	78.20	2279.30	177.10	416.30	177.10	46
Cloruros	mg/l	53.19	1868.74	319.14	326.23	2840.34	70.92
Sulfatos	mg/l	53.79	67.72	48.99	61.95	61.95	69.64
Carbonatos	mg/l	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Bicarbonatos	mg/l	12.20	41.48	34.16	68.33	96.39	18.30
Nitratos	mg/l	49.60	105.40	12.40	18.60	12.40	55.80
Clasificación Riverside		C1S1	C4S4	C5S3	C4S4	C5S2	C1S1
RAS	Agua buena de calidad apta	Agua buena de calidad apta	Agua utilizable con precaución	Agua buena de calidad apta			
SCR	Agua no recomendables	Agua no recomendables	Agua no recomendables	Agua no recomendables	Agua no recomendables	Agua no recomendables	Agua no recomendables
Tipo de agua	Muy dura	Muy dura	Semi blanda	Semi blanda	Semi blanda	Semi blanda	Semi blanda
Diag. Wilcox	Agua excelente a buena	Agua no válida	Agua no válida	Agua no válida	Agua no válida	Agua no válida	Agua excelente a buena



La muestra MJ-004 correspondientes a una fuente termal (Jarpaña) posee un pH ácido (6,634) lo que nos indica que esta agua estaría atravesando vetas de sulfuros. Así mismo MJ-002 también posee un Ph ácido (4,762). Las demás muestras de agua son consideradas como básicas.

De acuerdo a la C. E. la muestra MJ-004 correspondiente a la zona de Jarpaña posee la más alta conductividad de todas las muestras tomadas, posee un alto contenido de sales. Haciendo la comparación de la tabla 13 y 14 respecto a la conductividad eléctrica, se observa que las aguas de las fuentes termales poseen una mayor salinidad que las aguas superficiales que los reciben (ríos). La dureza total de las aguas es un componente con bastante significación en la calidad físico-química. No se conocen con claridad los efectos de las aguas blandas y duras sobre el organismo de los consumidores, aunque ciertos estudios epidemiológicos parecen apuntar a que la incidencia de enfermedades cardiovasculares es mayor en las zonas de consumo de aguas blandas. Por otra parte, las aguas blandas son agresivas y facilitan la disolución de metales de las cañerías, provocando, entre otras enfermedades, saturnismo o intoxicación por plomo en aquellos abastecimientos en que aún se conservan tuberías antiguas de plomo. El uso de las aguas duras tanto a nivel doméstico como industrial tiene graves inconvenientes. En el lavado se produce precipitación del jabón por el calcio y el magnesio, en la cocción de legumbres y en la industria pueden presentarse problemas de incrustaciones. La muestra M1 y M4(MP-001) son muy duras, MJ-001 y MJ-004 son consideradas duras. En los cuerpos receptores de las fuentes termales la muestra M5(MP-002) es muy dura, MJ-002 es semiblanda, MJ-003 es dura y MJ-005 es semiblanda.

La composición química del agua y su contenido en iones depende del suelo del que provienen. En los suelos de basalto, arenisca y granito las aguas son muy blandas. Las aguas procedentes de suelos de cal, yeso y dolomita son muy duras.



Diagrama de Piper

De acuerdo al diagrama de Piper Figura 117 las muestras de las fuentes termales que comprenden M1, M4(MP-001), MJ-001 Y MJ-004 corresponden a aguas cloruradas y/o sulfatadas sódicas. Así mismo las aguas superficiales pertenecientes a los ríos que comprenden M5(MP-002), MJ-002, MJ-003y MJ-005 también corresponden a aguas cloruradas y/o sulfatadas sódicas, con excepción de la muestra M2 que corresponde a aguas sulfatadas y/o cloruradas cálcicas magnésicas debido a que esta muestra se tomó del río Sillihuiri cuyas aguas provienen de los nevados de la cordillera. La muestra M6 correspondiente a agua potable se encuentra dentro del campo de clasificación a aguas cloruradas y/o sulfatadas sódicas.

Según Giggenbach W. (1991) las aguas cloruradas son comunes en los sistemas geotermales, su origen puede ser muy profundo de aguas fósiles o capas de sal en rocas sedimentarias muy antiguas o formarse de las reacciones entre HCl magmático y los minerales formadores de rocas. Los estudios geológicos de la zona nos muestran la existencia de secuencias volcánicas de tobas cristalolíticas del Grupo Palca, lavas andesíticas del Grupo Tacaza y lavas andesíticas del Grupo Sillapaca; como se puede visualizar en el sector de Torohuani, norte de Jarpaña, las tobas líticas presentan matriz muy fina con un buen porcentaje de cenizas volcánicas es conocido que estas lavas tuvieron su origen en magmas félsicos, donde hay predominancia de elementos alcalinos como sodio, potasio, calcio; elementos traza como flúor, cloro, azufre, litio , boro y arsénico entre sus minerales constituyentes. La tendencia a sulfatadas sódicas podemos atribuirlo a la lixiviación de las rocas por donde atraviesan los fluidos calientes, que al salir a la superficie han formado sínter de color pardo rojizo por precipitación química constituido por minerales de calcio y yeso.

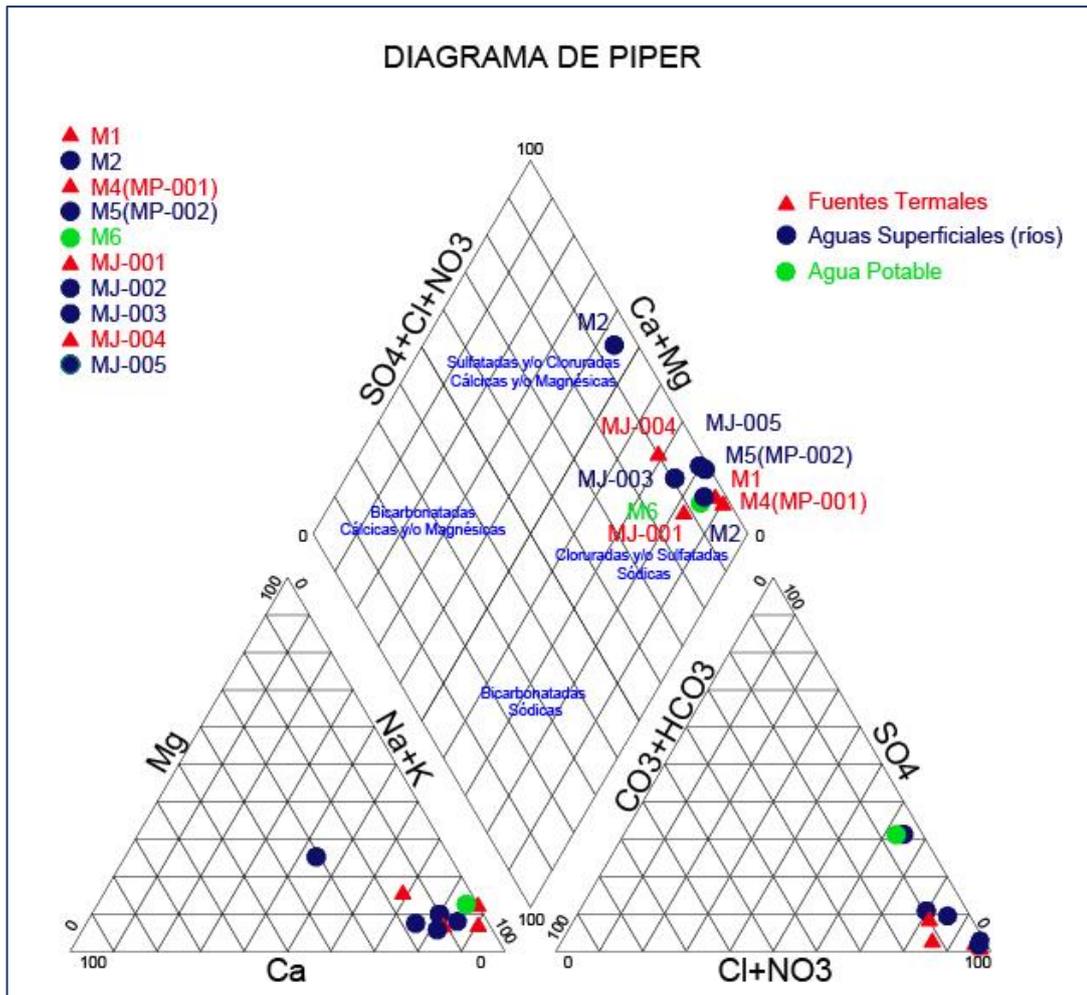


Figura 117. Diagrama de Piper con las estaciones de muestreo ploteadas.

Diagrama de Stiff

En el diagrama de Stiff se han ploteado todas las muestras obtenidas en campo. Las muestras M1 y MP-001 pertenecientes a las fuentes termales de Aguas Calientes, poseen una alta concentración de aniones de cloro superior a 90 meq/L y los cationes Na + K superan los 100 meq/L, concordantes con la figura del diagrama de Piper. Como vimos el origen de estos elementos son provenientes de rocas félsicas. Mientras tanto las muestras MJ-001 y MJ-004 presentan concentraciones bajas posiblemente a la precipitación del sínter. Para el caso de las muestras que pertenecen a aguas superficiales (ríos) que son quienes recepcionan las aguas termales, estos tendrán una similar composición que las aguas que se depositan en ellos. Aunque existe ciertas excepciones por ejemplo en las muestras MJ-004 y MJ-005 que pertenecen a la zona de Jarpaña. La muestra que la perteneciente a la fuente termal posee 18 meq/L de Na + K y 12 meq/L de Cl mientras que su cuerpo receptor (rio Jallpamayo) posee 28 meq/L de Na + K y 80

meq/L de Cl, lo cual nos indica que aparte de la fuente termal MJ-004 el río Jallpamayo recibe aguas de otras fuentes ubicados en Jarpaña, y posiblemente estas otras fuentes tengan mayor concentración que las que se tienen en el río Jallpamayo.

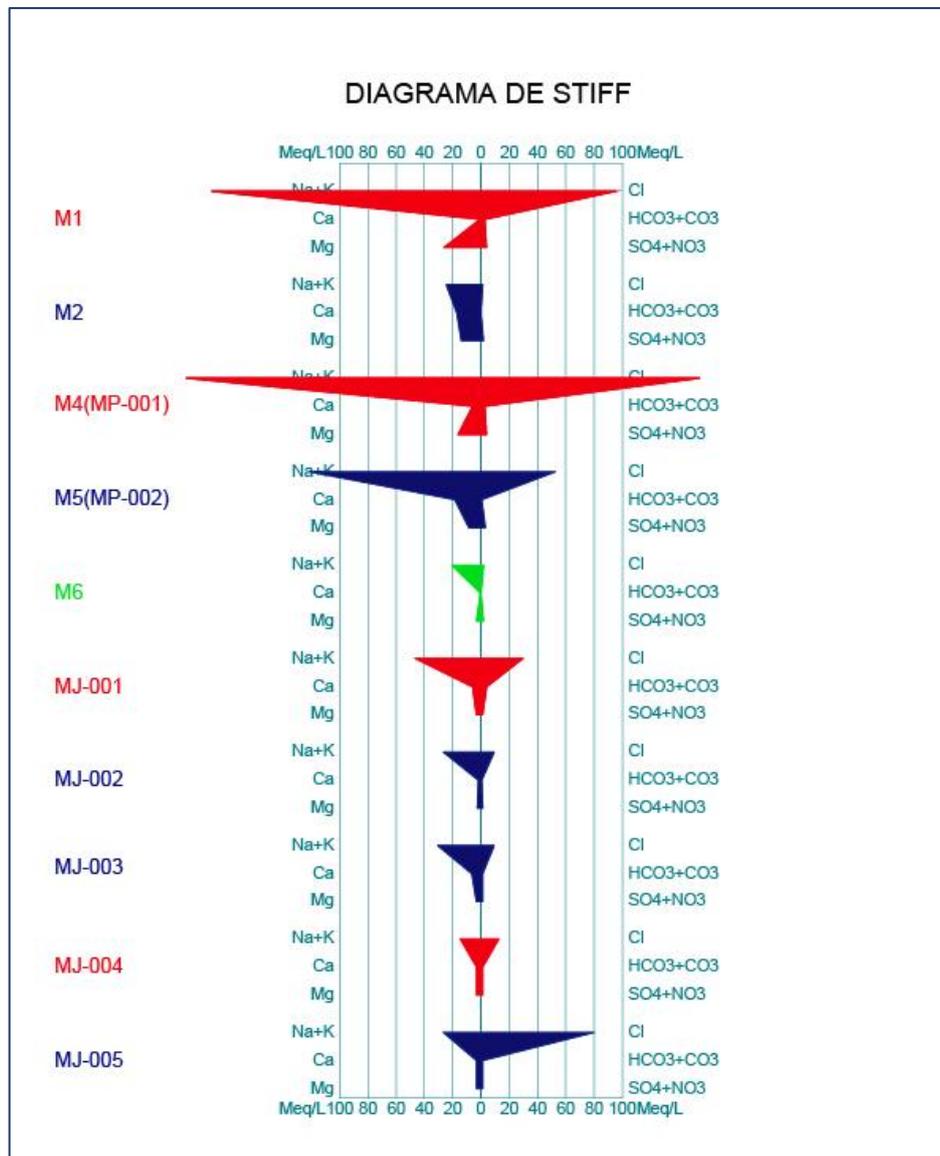


Figura 118. Diagrama de Stiff con las estaciones de muestreo ploteadas.

Diagrama de Schoeller – Berkaloff

Al igual que el diagrama de Stiff, nos muestra la abundancia de los iones Na, K, Ca y Mg, así como cloruros, sulfatos, bicarbonatos y nitratos. Este diagrama nos indica a simple vista que hay dos tipos de aguas por el contenido de salinidad que podemos clasificar que las muestras M1, (M4) MP-001, M5(MP-002), MJ-001 y MJ-002 son altamente salinos y las muestras M2, M6, MJ-003, MJ-004 y MJ-005 son bajas en sales.



Las muestras M1, (M4) MP-001, MJ-001 son muestras de fuentes termales, M1 y (M4) MP-001 son de Aguas Calientes, MJ-001 pertenece a la fuente termal de Jaraña, estas muestras son consideradas salinas, esto debido a que las aguas calientes lixiviaron rocas originadas a partir de magmas félsicos. Así mismo los cuerpos receptores de dichas fuentes termales también son salinos, pero en una proporción menor. La muestra M2 y M6 poseen una baja salinidad, siendo la muestra M6 de agua potable y M2 es del río Sillihuirí que aún no se mezcla con las fuentes termales. Las muestras MJ-004 y MJ-005 ambas pertenecen a Jarpaña, poseen una baja salinidad debido a que no hay actividad geotérmica, por lo que sus temperaturas son bajas.

Las aguas subsuperficiales en las que predominan los iones de bicarbonato y sodio son consideradas jóvenes, poco evolucionadas, mientras, las cloruradas tienen largo tiempo de residencia en el acuífero.

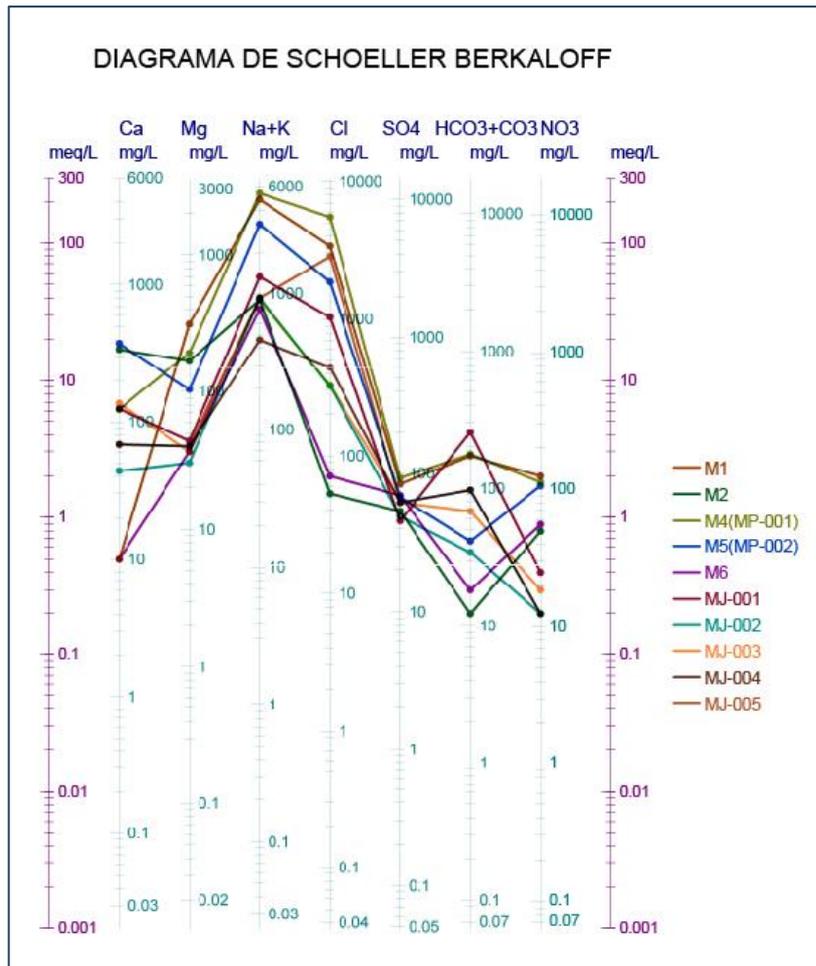


Figura 119. Diagrama de Schoeller - Berkaloff, presenta las concentraciones de iones de las estaciones muestreadas.

Diagrama de Wilcox

De acuerdo a la clasificación del diagrama de Wilcox se observa que todas las muestras correspondientes a las aguas termales M1, (M4) MP-001, MJ-001, MJ-004 son aguas clasificadas como muy malas o no aptas para el riego. La muestra M2 y M6 según el diagrama son aguas excelentes y pueden ser utilizadas para riego.

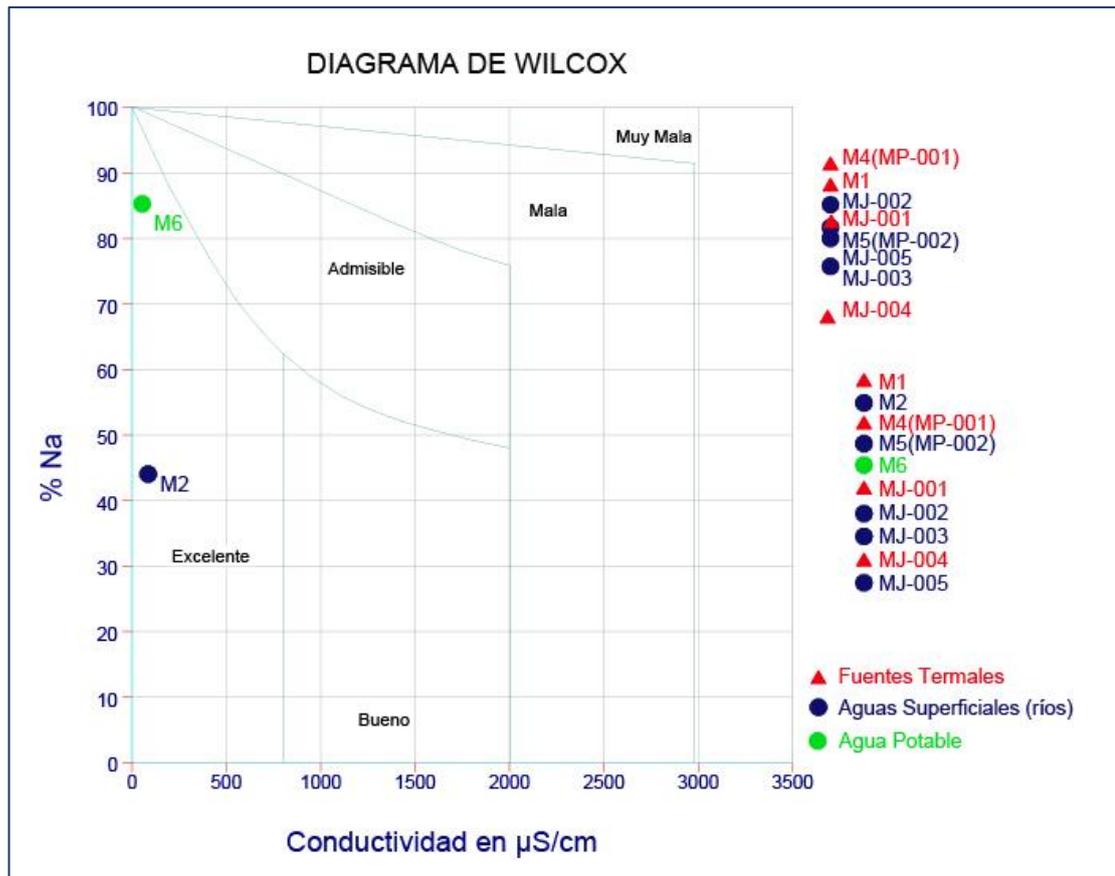


Figura 120. Diagrama de Wilcox con las estaciones de muestreo ploteadas.

Diagrama de Riverside

De acuerdo al diagrama de Riverside las muestras pertenecientes a las aguas termales M1, (M4) MP-001, MJ-001, MJ-004 son aguas con un poder alcalinizante muy fuerte. Lo cual nos confirma que estas aguas no pueden ser utilizadas para riego. Las muestras M2 y M6 tienen un poder alcalinizante bajo, se consideran aguas de baja salinidad, bajo contenido de Na y son aptas para el riego en la mayoría de los casos, la muestra MJ-002, MJ-005 perteneciente a aguas superficiales(ríos) poseen un poder alcalinizante medio, estas aguas de salinidad excesiva, sólo debe emplearse en casos muy contados, la muestra MJ-003 posee un poder alcalinizante fuerte y M5(MP-002) posee un poder alcalinizante muy fuerte al igual que las fuentes termales.

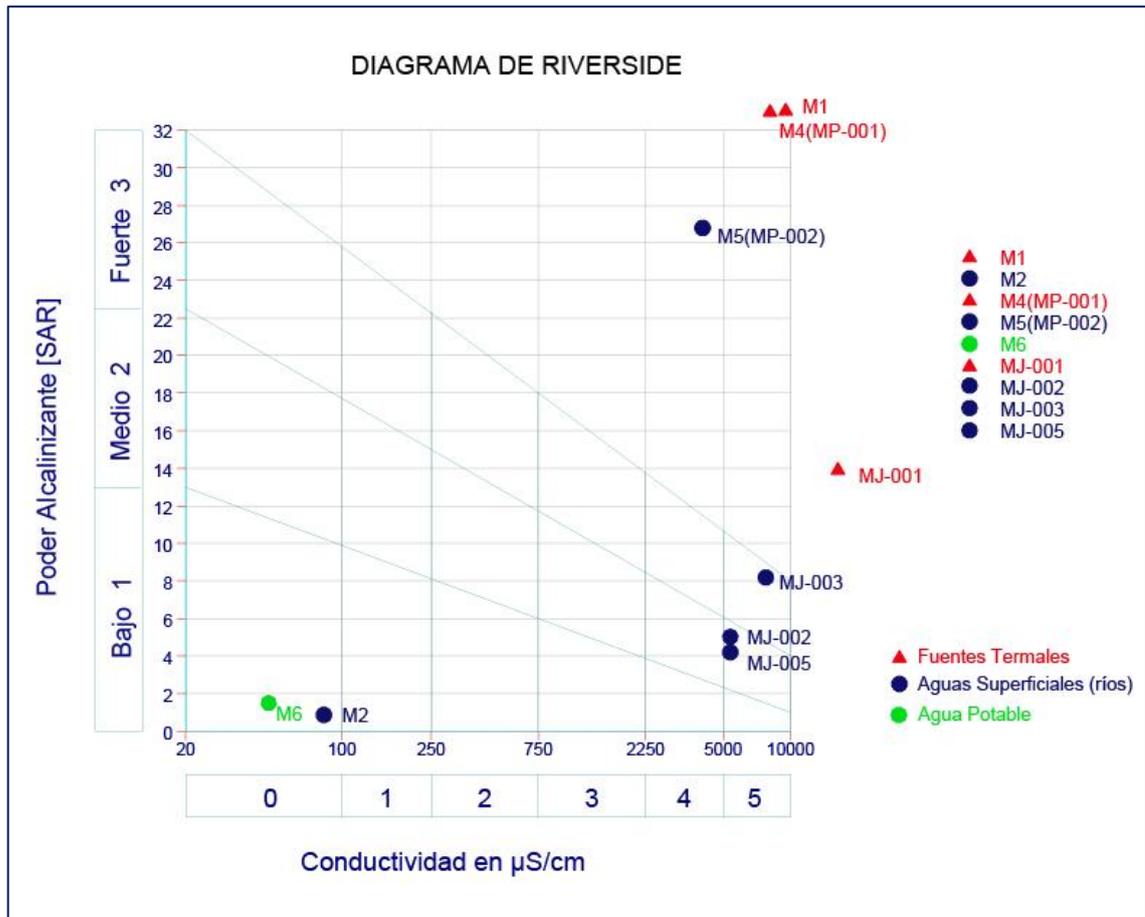


Figura 121. Diagrama de Riverside con las estaciones de muestreo ploteadas.

5.2. CONTAMINACIÓN NATURAL POR CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EN LAS FUENTES TERMALES Y EN LOS CUERPOS RECEPTORES (RÍOS)

5.2.1. Resultados de Laboratorio por ICP-OES de Las Fuentes Termales y Los Cuerpos Receptores.

El análisis realizado, tomo en consideración las normas ya mencionadas (ECA's para agua) y el alcance se indica a continuación:

Tabla 14. Resultados “Pruebas de laboratorio de análisis de calidad de agua (ICP-OES)”.

Parámetros	Und.	MP-01	MP-02	MJ-001	MJ-002	MJ-003	MJ-004	MJ-005	Catg. 1		Catg. 3	
									(B1) Contacto Primario	(D1) Riego de vegetales	(D2) Bebida Animales	
As	mg/L	3,165	1,192	1,990	0,3417	0,4530	3,993	0,2253	0,01	0,1	0,2	0,2
Hg	mg/L	<0.00041	<0.00041						0,001	0,001	0,001	0,001
Ag	mg/L	<0.029	<0.0024	<0.0024	<0.0024	<0.0024	<0.0024	<0.0024	0,001	0,05	0,05	0,05
Al	mg/L	<0.029	0,068	0,585	8,71	3,79	0,132	1,24	0,2	5	5	5
B	mg/L	16,73	6,685	5,860	1,784	1,974	29,47	1,509	0,5	1	5	5
Ba	mg/L	0,10570	0,03780	0,10276	0,02777	0,03074	0,16929	0,02971	0,7	0,7	**	**
Be	mg/L	0,000131	<0.000079	0,000604	0,000846	0,000465	0,006965	0,000240	0,04	0,1	0,1	0,1
Ca	mg/L	>250	113	193	63,3	169	>250	92,4				
Cd	mg/L	<0.00011	<0.00011	0,00024	0,00062	0,00041	0,15919	0,00116	0,01	0,01	0,01	0,05
Co	mg/L	0,000690	<0.000094	0,001138	0,024467	0,014256	0,019375	0,004160	0,05	0,05	1	1
Cr	mg/L	0,0023	<0.00039	0,00144	0,00166	0,00247	0,00464	0,00042	0,05	0,1	1	1
Cu	mg/L	0,0023	<0.002	0,0879	0,0147	0,0157	0,2085	0,0612	2	0,2	0,5	0,5
Fe	mg/L	0,475	0,081	1,37	3,97	3,49	16,1	1,35	0,3	5	**	**
K	mg/L	247	91,2	64,4	19,9	19,7	>250	21,2				
Li	mg/L	10,043	33,680	25,026	0,73631	0,86689	27,202	0,83231		2,5	2,5	2,5
Mg	mg/L	31,51	13,21	11,75	6,324	10,96	179,1	7,831		**	**	250
Mn	mg/L	0,37737	0,05051	0,22499	0,20589	0,22008	28,181	0,10945	0,1	0,2	0,2	0,2
Mo	mg/L	0,06339	0,02127	0,02627	0,00580	0,00626	0,01138	0,00314				
Na	mg/L	>1250	>1250	>250	>250	>250	231	>250				
Ni	mg/L	<0.00051	<0.00051	0,00577	0,03987	0,02765	0,04677	0,01055	0,02	0,2	1	1
P	mg/L	0,0125	0,0160	<0.0054	0,0111	0,0216	0,0206	<0.0054				
Pb	mg/L	<0.0026	<0.0026	<0.0026	<0.0026	<0.0026	12,28	0,0237	0,01	0,05	0,05	0,05
Sb	mg/L	0,02634	0,00165	0,01391	0,00175	0,00202	0,00291	0,00094	0,006			

Se	mg/L	<0.002	<0.002	0.0342	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	0.0196	0.01	0.02	0.05
SiO2	mg/L	69.63	32.02	26.14	23.23	25.08	42.69	15.80				
Sn	mg/L	<0.00085	<0.00085	0.00475	0.00561	0.00864	0.00167	0.00529				
Sr	mg/L	9,771	4,105	6,629	2,221	4,747	>50	3,209				
Ti	mg/L	0.00215	0.00290	0.00849	0.00352	0.00512	0.02568	0.00687				
Tl	mg/L	<0.0013	<0.0013	0.0047	0.0020	0.0016	0.1022	0.0020				
V	mg/L	<0.00014	0.00054	0.01248	0.00338	0.00459	0.08851	0.00606	0.1			
Zn	mg/L	0.0134	<0.0031	0.0498	0.1117	0.0791	5,152	0.1368	3	2	24	

ECA: Categoría 1: poblacional y recreacional Sub categoría B1: contacto primario

ECA: Categoría 3: Riego de vegetales y Bebida de animales

Supera los límites permisibles ECA

El símbolo ** dentro de la tabla

significa que el parámetro no aplica para esta subcategoría.



De acuerdo a la tabla 14, para el caso del As (0,225 – 3.17 mg/l) se superan los límites permisibles en las 7 estaciones de muestreo que abarca tanto las fuentes termales como los cuerpos receptores (ríos), los límites se superan tanto para la categoría 1 (B1) contacto primario, tales como la natación, sucede de manera similar para la categoría 3 (D1) riego de vegetales y (D2) bebidas de animales con lo cual se dice que estas aguas no pueden ser usadas para tales fines debido a las consecuencias que se podrían tener si así lo hicieran, lo cual sería daños principalmente a la salud, como por ejemplo cáncer.

Para el caso del Pb (0.024 – 12.28 mg/l) por ejemplo solo se superan los límites permisibles en la zona denominada como Jarpaña que serían las muestras MJ-004 y MJ-005, las aguas correspondientes a la muestra MJ-004 no pueden ser usadas para contacto primario, riego de vegetales y bebidas de animales, sin embargo, la muestra MJ-005 no supera los límites permisibles para riego de plantas y bebidas de animales pudiendo ser utilizadas para tales fines.

Para el caso del Li (10.04-33.68 mg/l) se superan los límites permisibles en las estaciones de muestreo MP-001, MP – 002, MJ-001 y en MJ-004, todas estas muestras corresponden a fuentes termales con excepción de MP-002 que es muestra de río. La presencia de Li se debe a que las aguas calientes lixivian minerales tales como biotitas y muscovitas, las cuales están presentes en las rocas ígneas. De acuerdo a esto podemos decir que las aguas termales contaminan de manera natural los cuerpos receptores que serían los ríos.

5.3. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DEL CAMPO GEOTERMAL

5.3.1. Geología Local o Formaciones Geológicas

El área geotérmica de Pinaya se encuentra influenciada por la falla regional Lagunillas, respecto a la litología las secuencias de areniscas cuarzosas (Formación Hualhuani) y calizas (Formación Arcurquina) que se encuentran plegadas, en



discordancia angular se depositan las secuencias de areniscas verdes y rojas intercaladas con niveles de conglomerados en matriz rojiza (Sur de Atecata), estas facies varían a conglomerados heterogéneos donde también se encuentran bloques aislados de calizas desprendidos del levantamiento tectónico ocurrido durante el Eoceno-Oligoceno. Las secuencias de conglomerados varían lateralmente hacia el sur intercalándose con areniscas arcólicas (Coline). Posteriormente, todas estas secuencias son plegadas, las capas buzan al suroeste y noreste, intruyen rocas de composición granodiorita y tonalita, son cortadas posteriormente por la falla Lagunillas, ubicándose en esta intercepción las manifestaciones termales. Las fallas de rumbo noroeste – sureste y los ejes de esfuerzos distensivos noreste-suroeste evidencian que existe facilidad de circulación de los fluidos desde las zonas altas a bajas, donde atraviesan la falla Lagunillas y son calentadas por gradiente geotérmico.

La zona de Aguas Pinaya y Jaraña, se considera la zona geotermal más importante, se relacionan las manifestaciones termales de Aguas Calientes y Río Pacaje con el sistema de fallas Sillapaca, considerando como zona de recarga a la Cordillera Sillapaca, esta zona presenta fallas originadas por el sistema de fallas principal por donde afloran las manifestaciones termales. En el caso de la manifestación termal extinta en Sorapata indica que en un tiempo la actividad geotermal estuvo a mayor altura en las laderas de la Cordillera Sillapaca.

La actividad geotermal en el río Pacaje presenta dos zonas de recarga en la Cordillera Sillapaca y cerro Turputa debido a la gran presencia de fracturación y zonas de apertura rellenadas por brecha con dirección este – oeste. En esta zona predomina la alteración hidrotermal la cual puede ayudar a formar un nivel de capa sello siendo respaldada por las secuencias de tobas. Se estima que a una profundidad de 1500 m pueda estar alojado la zona de reservorio hospedado en el límite de las secuencias de areniscas



rojas y conglomerados del Grupo Puno. La zona del río Pacaje se considera como un conducto compuesto por fallas donde ocurre el ascenso de manifestaciones termales. El sistema de fallas Sillapaca se le considera como parte de una falla activa lo que podría ser la causa de la actividad geotermal en esta zona.

En Jarpaña también se encuentra controlado por fallas de rumbo regionales, la existencia de manifestaciones termales podría considerarse como una zona distal a la principal fuente de calor, en la cual evidencia el descenso de nivel de circulación de agua debido a la presencia de precipitaciones calcáreas antiguas ubicadas a una mayor altura que las actuales.

Se considera que el sistema de fallas Sillapaca representó el conducto para la actividad volcánica durante el Oligoceno-Mioceno, esta actividad pudo continuar y generar migración de fluidos otra alternativa sería considerar la presencia de un sistema de fallamiento EW correspondiente a tectonismo polifásico como los sistemas que controlarían la Zona de ascenso de los fluidos.

5.3.2. Estructuras Geológicas

El área de estudio se encuentra controlada por el sistema de falla regional Lagunillas NO-SE y el sistema de fallas de la Cordillera del Sillapaca, ambas se encuentran delimitando la planicie fluvioglaciaria y la Cordillera Sillapaca. La falla Lagunillas con un trazo de mayor prolongación también se le denomina como Cusco-Lagunillas-Mañazo (Carlotto et al., 2005, Cerpa et al., 2012) durante el Mesozoico actúa como fallas normales delimitando los altos Cusco – Puno, comportándose como fallas normales y de rumbo (Transtensión), durante el Cenozoico actúa como fallas de rumbo e inversa (Transpresión) controlando cuencas continentales e intermontaña, entre los 43 y 42 Ma existen esfuerzos compresivos NE-SO, a los 29 y 28 Ma se identifican compresiones alternantes E-O con movimientos sinestrales, originando las cuencas



Oligomiocénicas. Entre los 24 y 22 Ma existen movimientos sinestrales e inversos, originando discordancia angular entre los conglomerados del Grupo Puno y lavas del Grupo Tacaza. Entre los 12 y 9 Ma existe compresión en dirección E-O y movimientos sinestrales, durante el cuaternario se identifican como fallas en echelón. Las fallas tienen origen profundo y controlan el magmatismo desde el Oligoceno. En el área de estudio también se reconoce una falla inversa al norte de Pinaya, la cual pone en contacto a las lavas del Grupo Tacaza y conglomerados del Grupo Puno (Alccamarine). Respecto al sistema de fallas de la Cordillera Sillapaca de acuerdo al mapa neotectónico (GEOCATMIN) se le identifica como una falla inferida.

5.3.3. Caracterización Hidrogeológica

La configuración geomorfológica por una parte muestra planicies conformadas por materiales detríticos no consolidados (aluvial, bofedal, glaciar y coluvial), de acuerdo a esta configuración estos materiales alojan aguas subterráneas de sistemas de flujos sub-superficiales (poco tiempo de residencia en los acuíferos), parte de estos flujos afloran a superficie a manera de manantiales fríos temporales debido a que están condicionados por materiales impermeables, y en zonas donde se tienen por debajo materiales permeables las aguas subterráneas percolan hacia los acuíferos más profundos.

Las rocas volcánicas en especial las lavas muestran superficies pronunciadas que afloran a superficie, sin embargo, la tectónica activa causó el desarrollo de sistemas de fracturas y mejora de la permeabilidad secundaria haciendo que las aguas de precipitación infiltren fácilmente hacia los acuíferos profundos.

La configuración hidrogeológica hacia las zonas más profundas de acuerdo a la interpretación geológica, presenta unidades hidrogeológicas multicapa, quiere decir que se tienen secuencias de acuíferos confinados por materiales poco permeables a impermeables. Entre ellos se tienen como posibles reservorios geotérmicos a las calizas



de la formación Ayabacas (Arcurquina) confinado por la secuencia sedimentaria (limoarcillitas) de la Formación Ausangate como capa sello, también existe la posibilidad de alojar fluidos geotérmicos las areniscas Grupo Puno, cuya capa sello sería los conglomerados del mismo Grupo.

El funcionamiento hidrogeológico empieza con la recarga ubicado en zonas de baja pendiente a más de 400 msnm y de la percolación de acuíferos someros (poroso no consolidado), que permiten la infiltración del agua meteórica, posteriormente estos fluidos circulan por medio de las lavas del Tacaza y areniscas del Grupo Puno alcanzando cada vez mayor temperatura determinado por la gradiente geotérmica (3°C por cada 100m), y para luego alcanzar hasta las zonas más profundas donde incrementan aún más su temperatura en función del gradiente.

Las surgencias de fuentes termales a superficie están relacionados a las fallas y fracturas continuas, los mismos que representan conductos naturales de evacuación de fluidos geotérmico. Las temperaturas que adquieren los fluidos geotérmicos posiblemente estan relacionados a la gradiente geotérmica y al enfriamiento de cuerpos sub-volcánicos e intrusivos.



VI. CONCLUSIONES

- De acuerdo a las características fisicoquímicas de las zonas de Aguas Calientes y Jaraña son clasificadas como aguas hipertermales ($>45\text{ }^{\circ}\text{C}$) y Jaraña es clasificada como agua fría. La muestra MJ-004 y MJ-002 correspondientes a fuentes termales con pH 6.63 y 4.76 respectivamente que corresponde de moderado a ligeramente ácido, lo que indica que estas aguas estarían atravesando vetas de sulfuros. Las demás muestras de agua son consideradas como básicas (7.96 a 9.70). De acuerdo a la conductividad eléctrica las aguas de las fuentes termales (0.08 – 7.74 mS/cm) poseen una mayor salinidad que las aguas superficiales que los reciben (ríos).
- Existe contaminación natural por metales pesados, As (0.225 – 3.165 mg/l) superan ampliamente los límites permisibles en todas las estaciones de muestreo, no apto para la categoría 1 (B1) contacto primario, tales como la natación, categoría 3 (D1) riego de vegetales y (D2) bebidas de animales con lo cual se dice que estas aguas no pueden ser usadas para tales fines, su uso trae consecuencias para la salud .Y para los elementos tales como B (1.51 – 29.47 mg/l), Li (10.04 - 33.68 mg/l), Fe (0.48 – 16.1 mg/l) y Al (1.24 – 8.71 mg/l) se superan los límites permisibles para dichas categorías en algunas estaciones de muestreo.
- Los estudios geológicos de la zona nos muestran la existencia de rocas sedimentarias (Gpo. Puno), lavas andesíticas (Gpo. Tacaza), tobas cristalinas (Gpo. Palca), secuencias volcanoclásticas (Gpo. Maure) y lavas andesitas del Grupo Sillapaca. Las lavas tuvieron su origen en magmas félsicos, donde hay predominancia de elementos alcalinos como sodio, potasio, calcio elementos traza como flúor, cloro, azufre, litio, boro y arsénico entre sus minerales constituyentes. Las aguas termales son de origen meteórico que se han infiltrado por fracturas y fallas, asociados al sistema de fallas Cusco – Lagunillas - Mañazo.



VII. RECOMENDACIONES

- Se recomienda efectuar estudios hidroquímicos más amplios y frecuentes para confirmar los contenidos de estos elementos, ya que sus características fisicoquímicas y químicas varían según la estación a la que se encuentra, aunque sus consecuencias no sean inmediatas, a largo plazo son elementos dañinos para la salud, sobre todo en el caso de ser ingeridos.
- Se recomienda realizar un estudio de análisis microbiológico de las fuentes termales tanto de Aguas Calientes, Jaraña y Jarpaña.



VIII. REFERENCIAS

AESAN. (02 de 10 de 2015). Obtenido de AESAN:

https://www.aesan.gob.es/AECOSAN/web/seguridad_alimentaria/subdetalle/metales_pesados.htm

Apaza, R., & Calcina, M. (2014). Contaminación natural de aguas subterráneas por arsénico en la zona de Carancas y Huata. *Altoandina*, 8.

Arellano, D. (2002). *Introducción a la Ingeniería Ambiental*. México.

Armijo, V. (1968). *Compendio de Hidrología Médica*. Barcelona: Editorial Médica.

Arnórsson, S. (1985). The use of mixing models and chemical geothermometers for estimating underground temperatures in geothermal system. *J. Volcanol. Geother*, 23,299-335.

Arnórsson, S. (2007). *Fluid-Fluid Interactions in geothermal systems*. Iceland: Reviews in mineralogy & geochemistry, Volumen 65.

ATSDR. (1992). *Reseña Toxicológica del Antimonio*. Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de Salud Pública.

Axon up. (s.f.). Obtenido de http://blog.axonup.com/?page_id=825.

Jiménez, A. (2000). *Determinación de los parámetros fisico-químicos de calidad de las aguas*. Gestión Ambiental.

Badillo, J.(1985). Curso básico de toxicología ambiental. p. 205-29. Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos. Metepec.

Barraza, J. (2017). Geología y contaminación por fuentes hidrotermales: caso río Ollachea-Carabaya-Puno. Puno: Universidad Nacional del Altiplano Puno.



- Browne, P. (1978). Hydrothermal alteration in active geothermal fields. *Ann. Rev. Earth Plan. Sci.*, 6, 229-250.
- Bruni, S. (2014). Geotermia: una fuente sostenible de energía. *InterAmerican Development. Documento disponible*. Obtenido de <https://publications.iadb.org/en/geothermal-energy-sustainable-source-power>.
- Castany, G.(1971). en (Armiejo-Valenzuela M. y San Martín J. (1994). Aguas minerales. Conceptos generales. Ed. Computense, Madrid, 11-16.
- Celis, R. (2012). “*Caracterización Geoquímica del Sistema Geotermal Termas de Puyehue – Aguas Calientes, Región de Los*. Chile: Tesis Univ. Universidad de Chile.
- Cerpa, L.; Cereceda, I.; Torres, D.; Muñoz, L.; Aguilar, R.; Martínez, J.; Siesquen, D.; Chacón, A. (2012). Controles tectono- magmáticos en el sur del Perú (72°-70°30' y 14°-16°S): implicancias metalogenéticas. Congreso Peruano de Geología, 16, Lima. Resúmenes extendidos. Lima: Sociedad Geológica del Perú 2012, 5 p.
- Chandrasekharam, D., & Bundschuh, J. (2008). *Low Enthalpy Geothermal Resources for*. s.l.:Taylor & Francis.
- Corbett G.J. y Leach T.M. (1997). Southwest Pacific Rim Gold-Copper Systems: Structure, Alteration and Mineralization. Society of Economic Geologist, Special Publication Number 6., pp: 237.
- Cruz, V., & Matsuda, K. (2014). Estudio geoquímico de las fuentes termales de la zona geotermal de Pinaya, Santa Lucia (Puno). Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, 109: 44-53.



- Dickson, M., & Fanelli, M. (2004). *What is geothermal energy?* Pisa, Italia: Istituto di Geoscienze e Georisorse. Obtenido de <http://users.metu.edu.tr/mahmut/pete450/Dickson.pdf>.
- EcuRed*. (s.f.). Obtenido de EcuRed: https://www.ecured.cu/Diagrama_hidroqu%C3%ADmico_para_modelos_de_agua.
- Fagundo, J. (1990). *Evolución química y relaciones empíricas*. Hidrogeología, Granada.
- Fluquer, L. & Otto, S. (2006). Modelo hidrogeológico del funcionamiento de las fuentes termales de baños del inca, Cajamarca Perú. INGEMMET, 5.
- Fornari, M.; Baldellon, E.; Espinoza, F.; Ibarra, I.; Jiménez, N.; Mamani, M. (2002).- Ar-Ar dating of late Oligocene-Early Miocene volcanism in the Altiplano. International Symposium on Andean Geodynamics, 5, Toulouse, FR, 16-18 September 2002, Géodynamique andine: résumés étendus. Paris:IRD 2002, pp. 223-226.
- Giggenbach, W. (1991). *Chemical techniques in geothermal exploration. En: Application*. Roma: UNITAR.
- Giggenbach, W., & Glover, R. (1992). Tectonic and major processes governing the chemistry of water and gas discharges from the Rotorua geothermal field, New Zealand. *Geothermics*, 21, 121-140.
- Hedenquist, J. & Lowenstern, J. (1994). The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. *Nature*, 370, 519-527.
- Henley, R. & Ellis, A. (1983). Geothermal Systems Ancient and Modern: A Geochemical Review. *Earth Science Reviews*, 50.



- Hochstein, M. (1990). *Classification and assessment of geothermal resources*. New York: UNITAR.
- IARC. (2004). Summaries & evaluations: Arsenic in drinking-water (Group 1). *Lyon International Agency for Research on Cancer Vol. 84*, p. 39.
- International Geothermal Association. (2014). Best Practices Guide for Geothermal Exploration: Alemania. *Alemania, Bochum University of Applied Sciences*, 194.
- Johnson, D., Ambrose, S., Bassett, T., Bowen, M., Crummey, D., & Isaacson, J. (1997). Meanings of Environmental Terms. *Journal of Environmental Quality*, 26, 581-589.
- Kiely, G. (1999). *Ingeniería Ambiental*. España: Mc Graw Hill.
- Klinck, B.A.; Ellison, R.A.; Hawkins, M.P. (1986).- The geology of the Cordillera Occidental and Altiplano West of Lake Titicaca Southern Peru. British Geological Survey, INGEMMET.
- Llopis G. & Rodrigo, A. (s.f.). *Guía de la Energía Geotérmica Guía de la Energía Geotérmica*. Madrid: Energía de la Comunidad de Madrid.
- Mamani, E. (2019). Relación entre el consumo de agua potable con niveles altos de metales pesados (Plomo, Cadmio, Aluminio) con aspectos clínicos de la gingivitis en niños de 6 a 12 años atendidos en el Puesto de Salud de Calana – Tacna. 2018. Tacna: Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.
- Marini, L. (2000). Geochemical Techniques for Exploration of Geothermal Energy. *Ciencia Abierta ,Vol.11*.
- MINCETUR. (2005). Baños del Inca de Cajamarca: Aguas Termales para el Nuevo Milenio. 49.



- Orche, E. (2011). *Energía Geotérmica*. Madrid: E.T.S.I. Minas-Universidad Politécnica de Madrid.
- Organización Mundial de la Salud*. (23 de octubre del 2019). Obtenido de: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health>.
- Pacheco, M. & Viera, L. (2015). Metodología geoquímica aplicada a Fluidos Geotermales. Programa Regional de Entrenamiento Geotérmico (PREG). Universidad de El Salvador.
- Palacios, O.; De La Cruz, J.; De La Cruz, N.; Klinck, B.; Allison, R.; Hawkins, M. (1991).- Geología de la Cordillera Occidental y Altiplano al oeste del Lago Titicaca-Sur del Perú. INGEMMET, Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, 42.
- Pajuelo, D. ;Condorhuamán, A.; Cruz, V. & Zegarra, E. (2016). Características geológicas de la zona geotérmica de Pinaya-región Puno.
- Pinagua, J. (2010). Infraestructura Hidrotermal. España: Instituto Tecnológico GeoMinero de España.
- Pinuaga, J. (2008). Infraestructuras Hidrotermales. *Instituto Tecnológico GeoMinero de España*, 9.
- Prazak, L. (1949). *Crenología peruana*. Lima: Ed. Corporación Nacional de Turismo.
- Sánchez, A. & Zapata, A. (2003).- Memoria descriptiva de la revisión y actualización de los cuadrángulos de Sicuani (29-T), Nuñoa (29-U), Macusani (29-V), Limbani (29-X), Sandia (29-Y), San Ignacio(29-Z), Yauri (30-T), Azángaro (30-V), Putina(30-X), La Rinconada (30-Y), Condoroma (31-T), Ocuvi (31-U), Juliaca (31-V), Callalli (32-T), Y Ácora (32-X). INGEMMET, Lima, Perú.



- Sheppard, S.; Nielsen, R., & Taylor, H. (1971). Hydrogen and Oxygen isotope ratios in minerals. *Economic Geology*, 66, 515-542.
- Sierra, J. & Pedro, G. (1998). *Energía geotérmica*. Argentina: Secretaria de energía.
Obtenido de
http://www.energia.gov.ar/contenidos/archivos/publicaciones/libro_energia_geotermica.pdf.
- Spellman, J. (2004). *Manual de agua potable*. Editorial Acribia.
- Truesdell, A. (1991). *Effects of physical process on geothermal fluids*. Roma:
UNITAR/UNDP Centre of Small.
- Valenzuela, O. (2003). Aguas termales y minerales en el Oriente central del Perú.
Lima: INGEMMET. Boletín, Serie D: Estudios Regionales; N° 25.
- Vargas, V. (2010). Fuentes termales en el Perú, estado y uso actual. *Sociedad Geológica del Perú, Pub. Esp. N°9*, 1175-1178.
- White, D. (1973). *Characteristics of geothermal resources*. Stanford: Stanford University Press.
- Yorio, A. & Muzio, R. (2013). Contaminación de las fuentes de agua y sus efectos en el sistema nervioso y la conducta. *Encrucijadas*, 34-39.
- Yupanqui, T. (2006). *Análisis Físicoquímico de Fuentes de Aguas*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Zapata, V. (1973). *Aguas minerales del Perú*. Lima: Boletín D 1- INGEMMET.



ANEXOS

A. MAPAS

B. RESULTADOS DE LABORATORIO