

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



TESIS

**CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y GEOMECAICA DE LOS
BAÑOS TERMALES DE AGUAS CALIENTES DEL DISTRITO DE
MACHUPICCHU, PROVINCIA DE URUBAMBA, REGION CUSCO**

PRESENTADO POR:

BR. VANESSA ISABEL VALVERDE GOYZUETA

BR. KATHERINE GUTIERREZ PERALTA

**PARA OPTAR AL TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERO GEÓLOGO**

ASESOR:

Dr. RONALD LUIS LOPEZ ZAPANA

CUSCO – PERÚ

2024

INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, **Asesor** del trabajo de investigación/tesis titulada: CARACTERIZACIÓN
HIDROGEOLÓGICA Y GEOMECAICA DE LOS BAÑOS TERMALES DE AGUAS
CALIENTES DEL DISTRITO DE MACHUPICCHU, PROVINCIA DE URUBAMBA,
REGION CUSCO

presentado por: VANESSA ISABEL VALVERDE GOYZUETA con DNI Nro.: 70581966 presentado
por: KATHERINE GUTIERREZ PERALTA con DNI Nro.: 77140725 para optar el
título profesional/grado académico de INGENIERO GEÓLOGO

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 01 veces, mediante el
Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la**
UNSAAC y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 3 %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o
título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	☒
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	☐
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	☐

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto**
la primera página del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 20 de DICIEMBRE de 2024


Firma
Post firma Ronald López Zapana

Nro. de DNI 23923500

ORCID del Asesor 0000-0003-0148-6535

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: oid: 27259:417835617

VANESA KATHERINE VALVERDE GUTIERREZ

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y GEOMECHANICA DE ...

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:417835617

Fecha de entrega

20 dic 2024, 7:58 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

20 dic 2024, 8:30 a.m. GMT-5

Nombre de archivo

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y GEOMECHANICA DE LOS BAÑOS TERMALES DE AGUAS CAL....pdf

Tamaño de archivo

26.5 MB

251 Páginas

45,405 Palabras

266,723 Caracteres

3% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 20 palabras)

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 3%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 1%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
34 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.
-  **Texto oculto**
32 caracteres sospechosos en N.º de páginas
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



DEDICATORIA

A mi querida mamá, Maxi Goyzueta, por su amor infinito e incondicional.

Atte. Vanessa Isabel Valverde Goyzueta.



DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, quien me dio la capacidad de soñar y la fuerza para lograrlo.

A mis padres, por su incondicional apoyo y amor.

A mi hermano, hermanas y familia por ser mi fuente de inspiración y fortaleza; y por su apoyo en cada paso que doy.

A mi amiga y compañera Vanessa Valverde y su familia por su apoyo incondicional durante toda la trayectoria universitaria y para la realización de este trabajo.

Agradezco al Ing. Ronald López Zapana, asesor de este trabajo por su orientación y guía.

A la Universidad Nacional San Antonio Abad por la oportunidad de crecer.

Atte. Katherine Gutierrez Peralta.



RESUMEN

La zona de estudio se encuentra en la localidad de Aguas Calientes, en la provincia de Urubamba. El objetivo de este trabajo es caracterizar hidrogeológica y geomecánicamente la zona del balneario de aguas termales. Para ello se hizo trabajos en campo como extracción de muestras de roca y agua, mediciones y reconocimiento de la zona, luego se mandaron estas muestras al laboratorio químico y para la elaboración de la sección delgada y una serie de análisis para llegar a los resultados que se presenta en este trabajo. La quebrada de Aguas Calientes constituye pendientes muy abruptas fuertemente inclinada a extremadamente Empinada; se presentan unidades geomorfológicas Abanico Aluvial, Ladera de montaña, Pie de monte, Quebrada, y talud escarpado. Regionalmente aflora las formaciones Ollantaytambo y Málaga (rocas metamórficas), aflora el batolito de Machupicchu del permo-triásico compuesto por granito y Microdiorita, debido al enfriamiento del batolito se formaron sistemas de diaclasas, que ha permitido que esta unidad actúe como acuífero fisurado en la zona del balneario. Las zonas de recarga más importantes son, la cordillera de Vilcabamba, la falla inversa Ollantaytambo-Vilcabamba-Quimbiri, mediante la cual se infiltran aguas meteóricas hasta profundidades de 4.44 km y por gradiente geotérmico estas aguas llegan a temperatura de foco 147.4°C ; las fallas locales ubicadas en aguas calientes intersecan en profundidad a la falla inversa permitiendo que estas aguas profundas surjan a superficie con temperatura promedio de fuente 41°C donde son aprovechadas como aguas balnearológicas recreativo. La geofísica ha permitido establecer que el principal acuífero fisurado se encuentra en la sección central del balneario con un ancho de 15 metros seguido por un acuitardo de 10 m, y nuevamente se evidencia el acuífero en un ancho de 2 m, y finalmente debajo de las piscinas N°5 y 6 otro acuífero que no prosigue en profundidad. Las estructuras que están directamente vinculadas a la presencia de este acuífero son cinco fallas identificadas en el área de los baños termales, de las cuales las benéficas son las fallas 1 2 y 4 mientras que la falla 5 delimita el acuífero en general. Por medio de las estaciones micro tectónicas ha sido posible la valoración del macizo rocoso, calificando como roca de calidad buena y media, de clase II y Clase III. La valoración de acuerdo al método RMR de Bieniawski va de 42 ha 66 puntos. El coeficiente de permeabilidad promedio es $2.35\text{E}-04\text{ cm/s}$ considerado roca de permeabilidad media.

Palabras Clave:

Caracterización, hidrogeología, geomecánica, hidroquímica, geofísica, aguas termales.



ABSTRACT

The study area is located in the town of Aguas Calientes, in the province of Urubamba. The objective of this work is to characterize the hydrogeological and geomechanical aspects of the hot springs area. To do this, field work was carried out such as extraction of rock and water samples, measurements and recognition of the area, then these samples were sent to the chemical laboratory for the preparation of the thin section and a series of analyses to arrive at the results presented in this work. The Aguas Calientes ravine consists of very steep slopes, strongly inclined to extremely steep; the geomorphological units are Alluvial Fan, Mountain Slope, Foothills, Ravine, and Steep Slope. Regionally, the Ollantaytambo and Malaga formations (metamorphic rocks) outcrop, the Machu Picchu batholith from the Permo-Triassic composed of granite and microdiorite, due to the cooling of the batholith, joint systems were formed, which has allowed this unit to act as a fissured aquifer in the area. The most important recharge areas are the Vilcabamba mountain range, the Ollantaytambo-Vilcabamba-Quimbiri reverse fault, through which meteoric waters infiltrate to depths of 4.44 km and by geothermal gradient these waters reach a focus temperature of 147.4 ° C; the local faults located in hot waters intersect at depth to the reverse fault allowing these deep waters to emerge to the surface with an average source temperature of 41 ° C where they are used as recreational spa waters. Geophysics has established that the main fissured aquifer is located in the central section of the spa with a width of 15 meters followed by a 10 m aquitard, and again the aquifer is evident in a width of 2 m, and finally below pools No. 5 and 6 another aquifer that does not continue in depth. The structures that are directly linked to the presence of this aquifer are five faults identified in the area of the thermal baths, of which the beneficial ones are faults 1, 2 and 4 while fault 5 delimits the aquifer in general. By means of micro-tectonic stations it has been possible to assess the rock mass, classifying it as good and medium quality rock, class II and Class III. The assessment according to the RMR method of Bieniawski ranges from 42 to 66 points. The average permeability coefficient is 2.35E-04 cm/s, considered as medium permeability.

Keywords:

Characterization, hydrogeology, geomechanics, hydrochemistry, geophysics, hot springs.



INTRODUCCIÓN

Los Baños Termales de Aguas Calientes están ubicados en la localidad de Aguas Calientes, lugar de parada obligatoria de turistas nacionales y extranjeros en su camino a visitar el Parque Arqueológico de Machupicchu. Los baños termales cuentan también con una gran afluencia de visitantes diarios por ser un atractivo turístico importante de la zona. Estos pudieron haber sido utilizados desde la época inca con fines recreativos y termo medicinales.

La presente tesis se realizó con el fin de caracterizar la hidrogeología y geomecánica de los Baños Termales de Aguas Calientes, mediante el análisis de las propiedades físico químicas, valorización del macizo rocoso y la interpretación de las secciones tomográficas.

La tesis se desarrolla en siete capítulos, teniendo la siguiente estructura: el capítulo I, denominado Generalidades, en el cual se describe la ubicación, clima, vegetación, accesibilidad, planteamiento del problema, importancia y justificación, objetivos, hipótesis, alcance y metodología de la investigación. El capítulo II, denominado Marco Teórico, donde se desarrolla los estudios anteriores, antecedentes y la definición de términos y conceptos que se han utilizado en la tesis. El capítulo III, denominado Geomorfología, donde se determinan y describen las pendientes y las unidades geomorfológicas. El capítulo IV, denominado Geología Local, donde se describen las unidades litoestratigráficas de la zona de estudio mediante la descripción de muestras macroscópicas y microscópica. El capítulo V, denominado Geología estructural y geomecánica, donde se describe las características estructurales del balneario y las características geomecánicas. El capítulo VI, denominado Caracterización hidrogeológica de las aguas termales del balneario, donde se describe los parámetros hidrogeológicos, el inventario de fuentes de agua, el análisis de los parámetros físico químicos y de facies hidro químicas, y por último la determinación de la temperatura y profundidad de foco por el método de geotermómetros. El capítulo VII, denominado Geofísica e interpretación hidrogeológica, donde se describen las secciones tomográficas, unidades hidrogeológicas y se finaliza con el análisis del movimiento de las aguas subterráneas.

Por último, se presentan las conclusiones en respuesta a cada uno de los objetivos y las recomendaciones del trabajo de tesis.



ÍNDICE

CAPITULO I: GENERALIDADES	1
1.1. UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	1
1.2. CLIMA Y VEGETACIÓN.	2
1.3. ACCESIBILIDAD	3
1.4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	7
1.4.1. Descripción del problema	7
1.4.2. Formulación del Problema General	8
1.4.3. Formulación de los Problemas Específicos	8
1.5. IMPORTANCIA Y JUSTIFICACIÓN	8
1.5.1. Justificación del problema	8
1.6. OBJETIVOS.....	9
1.6.1. Objetivos generales	9
1.6.2. Objetivos específicos	9
1.7. HIPÓTESIS	10
1.7.1. Hipótesis general.....	10
1.7.2. Hipótesis Específicos	10
1.8. ALCANCE	11
1.9. VARIABLES	12
1.10. METODOLOGÍA.....	13



1.10.1.	Métodos de investigación.....	13
1.10.2.	Diseño de la investigación.....	13
1.10.3.	Enfoque	14
1.10.4.	Materiales y equipos.....	14
1.10.5.	Fases de la investigación	16
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO		17
2.1.	ESTUDIOS ANTERIORES.....	17
2.2.	ANTECEDENTES.....	19
2.3.	CARACTERIZACIÓN	23
2.4.	CONCEPTOS DE HIDROGEOLOGÍA	23
2.4.1.	Aguas subterráneas.	23
2.4.2.	Clasificación de las rocas desde el punto de vista hidrogeológico.	23
2.4.3.	Clasificación de los acuíferos según su potencial hidráulico.....	25
2.4.4.	Aguas termales, minerales y termominerales y mineromedicinales.	27
2.4.5.	Clasificación de aguas termales según su origen.....	28
2.4.6.	Áreas geotérmicas.....	29
2.4.7.	Surgencia de las aguas termales.....	30
2.4.8.	Mecanismos de Surgencia de las aguas termales.....	32
2.4.9.	Clasificación de las aguas termales.....	33
2.4.10.	Aspectos físicos y químicos del agua.....	34



2.5. GEOTERMÓMETROS	42
2.6. MÉTODOS DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA	44
2.5.1. Tomografía eléctrica	44
2.6. CUENCAS HIDROGRÁFICA.....	46
2.7. SISTEMA DE CODIFICACIÓN PFAFSTETTER	46
2.8. MARCO NORMATIVO Y LEGAL	48
2.9. GEOMORFOLOGÍA REGIONAL.....	49
1.15.1. Cordillera Oriental:	50
2.10. GEOLOGIA REGIONAL	55
2.10.1. Formación Ollantaytambo.	55
2.10.2. Formación Málaga	56
2.10.3. Macizo de Machupicchu.	58
2.10.4. Depósitos Aluviales:	58
2.10.5. Depósitos Fluviales:.....	59
2.11. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL REGIONAL.....	59
2.11.1. Evolución Geotectónica:	59
2.11.2. Deflexión de Abancay:	61
2.11.3. Pliegues.	61
2.11.4. Fallas.	63
2.11.5. Diaclasas.	67



2.12. CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO.	70
2.12.1. Sistema RMR.	70
2.12.2. Sistema de Clasificación SMR.....	74
CAPITULO III GEOMORFOLOGÍA	75
3.1. CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS DEL BALNEARIO.	75
3.1.1. Pendientes	75
3.1.2. Geomorfología	80
CAPÍTULO IV: GEOLOGÍA LOCAL.....	89
4.1. Batolito de Machupicchu:	89
4.2. Depósitos Coluviales:	97
4.3. Depósitos Fluviales:.....	98
4.4. Depósitos Aluviales:	99
CAPITULO V: GEOLOGIA ESTRUCTURAL Y GEOMECANICA	101
5.1. CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES DEL BALNEARIO.....	101
5.1.1. Sistema de Fallas.....	101
5.1.2. Sistema de Diaclasas.....	111
5.3. CARACTERÍSTICAS GEOMÉCANICAS	113
5.3.1. Resistencia a la compresión simple para el macizo rocoso.	113
5.3.2. Módulo de Elasticidad	113
5.3.3. Valoración del Macizo Rcoso (RMR)	114



5.3.4. Valoración del Macizo rocoso mediante el Slope Mass Rating (SMR)	129
5.4. ESTABILIZACIÓN DE TALUD DE ROCA	148
5.4.1. MEDIDAS DE ESTABILIZACIÓN DE TALUDES DE ROCA	148
CAPÍTULO VI: CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LAS AGUAS TERMALES DEL BALNEARIO.....156	
6.1. GENERALIDADES.	156
6.2. PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS	156
6.2.1. Permeabilidad Secundaria.....	156
6.3. INVENTARIO DE FUENTES DE AGUA.	160
6.3.1. Análisis de Parámetros físicos e hidráulicos.....	162
6.4. HIDROQUÍMICA.	170
6.4.1. Estaciones de muestreo de agua.....	170
6.4.2. Análisis de Parámetros Físico-Químicos.	173
6.4.3. Análisis de Facies Hidroquímicas.....	174
6.4.4. Calidad de Agua.....	179
6.4.5. Determinación de Temperatura de foco por Geotermómetros.	180
6.4.6. Determinación de la Profundidad del foco por Gradiente Geotérmico.	181
CAPÍTULO VII: GEOFÍSICA E INTERPRETACIÓN HIDROGEOLÓGICA.....184	
7.1. SECCIONES TOMOGRÁFICAS	184
7.1.1. Ubicación de las líneas.....	184



7.1.2. Descripción de la interpretación de secciones	187
7.2. DESCRIPCIÓN DE UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS	202
7.2.1. Acuífugo	202
7.2.2. Acuitardo.....	204
7.2.3. Acuífero.	207
7.3. MOVIMIENTO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	209
7.3.1. Mapa de unidades hidrogeológicas de las aguas termales	209
7.3.2. Esquema Conceptual de movimiento de aguas subterráneas.....	211
CONCLUSIONES:	214
RECOMENDACIONES.....	218
ANEXOS	225
ANEXO I: MATRIZ DE CONSISTENCIA.....	225
ANEXO II: ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DE AGUA.	226



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación Geográfica de la Cuenca Urubamba.	4
Figura 2. Tipos de acuífero según su porosidad	25
Figura 3. Distintos tipos de unidades acuíferas según su disposición.	27
Figura 4: Esquema del origen meteórico de las aguas termales.	28
Figura 5. Esquema del origen mixto de las aguas termales.	29
Figura 6. Esquema de un sistema hidrotermal en una fosa tectónica	30
Figura 7. Diagrama de Stiff	39
Figura 8. Diagrama de Piper.	40
Figura 9: Diagrama de Piper para clasificación química de las aguas.	41
Figura 10. Diagrama Piper-Scater, se muestra los flujos de acuíferos.	42
Figura 11: Esquema básico de los métodos de resistividad.	45
Figura 12: Esquema de los dispositivos electródicos más habituales en los métodos de resistividad.	46
Figura 13: Codificación de una cuenca hidrográfica	48
Figura 14: Unidades geomorfológicas regionales.	51
Figura 15: Mapa Geomorfológico de los cuadrángulos de Quillabamba (26-q) y Machupicchu (27-q).....	54
Figura 16. Vista de la formación Ollantaytambo, detalle de las cuarcitas gris verdosas.	55
Figura 17. Vista de las pizarras de la Formación Málaga.	56
Figura 18. Columna Estratigráfica regional de los Cuadrángulos de Quillabamba (26-q) y Machupicchu (27-q).	57
Figura 19. Columna Estratigráfica de la Zona de estudio.	59



Figura 20. Modelo de formación del batolito de Machupicchu en un contexto de rift durante el Permo-Triásico.....	60
Figura 21. Esquema estructural de la deflexión de Abancay.....	62
Figura 22. Análisis microtectónico de pliegues de los cuadrángulos de Quillabamba (26-q) y Machupicchu (27-q).....	63
Figura 23. Análisis microtectónico de fallas (Estaciones AC-1 y AC-2), en el sector de Aguas Calientes.....	65
Figura 24. Análisis microtectónico de fallas (Estaciones AC-3 Y AC-4) en el sector Aguas Calientes.....	66
Figura 25. Diagrama de diaclasas del Batolito de Machupicchu, en el sector de Aguas Calientes.	68
Figura 26. Interpretación de los valores de RMR.....	70
Figura 27. Gráfico para la puntuación de la resistencia a la compresión simple de la roca intacta (σ_c).....	71
Figura 28. Gráfico para la puntuación del número de discontinuidades por metro.....	71
Figura 29. Valoración de la presencia de agua en el frente.	72
Figura 30. Criterios para la valoración de la resistencia de discontinuidades.	72
Figura 31. Criterios para la evaluación de la alterabilidad de la matriz rocosa por el agua.	72
Figura 32. Parámetros de Clasificación Geomecánica RMR.	73
Figura 33. Factores de Clasificación Geomecánica de taludes SRM.	74
Figura 34. Geoforma con pendiente extremadamente Empinada.....	78
Figura 35. Cauce Fluvial.....	81
Figura 36. Abanico Aluvial.	82



Figura 37. Ladera de montaña baja extremadamente empinada.....	83
Figura 38. Ladera de montaña media empinada.	84
Figura 39. Ladera de montaña media extremadamente empinada.....	84
Figura 40. Ladera de montaña media muy empinada.	85
Figura 41. Pie de Monte.....	86
Figura 42. Quebrada.	87
Figura 43. Taludes Escarpados.	87
Figura 44. Afloramiento de Granito en la zona de estudio.....	90
Figura 45. Muestra Aguas Calientes 1.....	91
Figura 46. Muestra Aguas Calientes 2.....	92
Figura 47. Diagrama de STRECKEISEN, con la cual se clasifica la roca según su composición mineralógica de cuarzo, plagioclasa y feldespatos alcalinos.	93
Figura 48. Sección Pulida de Granito.	95
Figura 49. Microclina poiquilitica.	96
Figura 50. Biotitas aglomeradas con alteración a clorita.....	96
Figura 51. Plagioclasa alterada a sericita y circón.....	97
Figura 52. Cuarzo con fracturas irregulares.....	97
Figura 53. Depósito Coluvial.....	98
Figura 54. Depósito Fluvial.	98
Figura 55. Depósito Aluvial.....	99
Figura 56. La roseta muestra la dirección preferencial NNE-SSO, de la EMT 1 ubicado en la margen derecha de la quebrada Aguas Calientes.	103



Figura 57. La roseta muestra la dirección preferencial N-S, de la EMT 2 ubicado en la margen izquierda de la quebrada Aguas Calientes.	104
Figura 58. Esta Roseta muestra la dirección preferencial ONO-ESE en la EMT 3 ubicada en la margen izquierda encima del reservorio de agua potable.	106
Figura 59. Esta Roseta muestra la dirección preferencial O-E en la EMT 4 ubicada en la margen izquierda a la altura de la piscina N°4.	107
Figura 60. Esta Roseta muestra la dirección preferencial ONO-ESE en la EMT 5 ubicada en la margen izquierda en la pasarela de madera camino a Machupicchu.	108
Figura 61. Diagrama de roseta que muestra una dirección preferencial NO-SE en la EMT 6 ubicada en la zona del puente.	110
Figura 62. El S.F. N-S corta a las S.F. E-O, lo que significa que esta última es antecesor.	111
Figura 63. Resistencia a la compresión simple del macizo rocoso.	113
Figura 64. Resumen de Módulos de Elasticidad y de Poisson.	114
Figura 65. Macizo rocoso en la entrada a la quebrada de aguas calientes, en la ETM 6, en las coordenadas UTM (Zona: 18L, Este: 768713, Norte: 8544850)	115
Figura 66. Clasificación del macizo rocoso en la EMT 1 según RMR.	116
Figura 67. Se visualiza la estación Microtectónica EMT-1.	117
Figura 68. Clasificación del macizo rocoso en la EMT 2 según RMR.	118
Figura 69. Se visualiza la estación Microtectónica EMT-2.	119
Figura 70. Clasificación del macizo rocoso en la EMT 3 según RMR.	120
Figura 71. Se visualiza la estación Microtectónica EMT-3.	121
Figura 72. Clasificación del macizo rocoso en la EMT 4 según RMR.	122
Figura 73. Se visualiza la estación microtectónica EMT-4.	123



Figura 74. Clasificación del macizo rocoso en la EMT 5 según RMR.	124
Figura 75. Se observa la estación microtectónica EMT-5.	125
Figura 76. Clasificación del macizo rocoso en la EMT 6 según RMR.	126
Figura 77 Se observa la estación microtectónica EMT-6.	127
Figura 78. Resumen de la calidad del macizo rocoso en las seis EMT.	128
Figura 79. Calidad del Macizo rocoso en relación al RMR.	128
Figura 80. Factores de ajuste de la Clasificación SMR.	130
Figura 81. Valores del SRM para cada forma de rotura.	130
Figura 82. Clasificación SRM de la familia S1 del macizo rocoso en la EMT 1.	131
Figura 83. Clasificación SRM de la familia S2 del macizo rocoso en la EMT 1.	132
Figura 84. Clasificación SRM de la familia S3 del macizo rocoso en la EMT 1.	133
Figura 85. Clasificación SRM de la familia S1 del macizo rocoso en la EMT 2.	134
Figura 86. Clasificación SRM de la familia S2 del macizo rocoso en la EMT 2.	135
Figura 87. Clasificación SRM de la familia S3 del macizo rocoso en la EMT 2.	136
Figura 88. Clasificación SRM de la familia S1 del macizo rocoso en la EMT 3.	137
Figura 89. Clasificación SRM de la familia S2 del macizo rocoso en la EMT 3.	138
Figura 90. Clasificación SRM de la familia S3 del macizo rocoso en la EMT 3.	139
Figura 91. Clasificación SRM de la familia S1 del macizo rocoso en la EMT 4.	140
Figura 92. Clasificación SRM de la familia S2 del macizo rocoso en la EMT 4.	141
Figura 93. Clasificación SRM de la familia S3 del macizo rocoso en la EMT 4.	142
Figura 94. Clasificación SRM de la familia S1 del macizo rocoso en la EMT 5.	143
Figura 95. Clasificación SRM de la familia S2 del macizo rocoso en la EMT 5.	144
Figura 96. Clasificación SRM de la familia S1 del macizo rocoso en la EMT 6.	145



Figura 97. Clasificación SRM de la familia S2 del macizo rocoso en la EMT 6.	146
Figura 98. Cuadro resumen de los valores de SMR para las 6 EMT.....	147
Figura 99. Esquema de las partes de las partes de un anclaje.....	149
Figura 100. Se muestra una imagen del talud a la altura del puente.....	149
Figura 101. Talud en la margen derecha del río Aguas Calientes a la altura del puente.	150
Figura 102. Perfil natural del talud y un esquema generalizado de las discontinuidades y anclaje.	150
Figura 103. Caída de roca aguas arriba del balneario.....	151
Figura 104. Perfil natural del talud donde se presenta caída de rocas debido al fracturamiento de la roca.....	152
Figura 105. Enrocado con muro seco en el cauce del río Huaura-Sayán.	153
Figura 106. Enrocado del cauce a la altura del puente ejército en Lima.	153
Figura 107. Perfil transversal del río donde se observa el muro seco de bloques angulares con diámetro superior a 2m.	154
Figura 108. Reducción de tamaño mediante voladura controlada.....	155
Figura 109. Cuadro del coeficiente de permeabilidad Secundaria para la EMT 4.	157
Figura 110. Cuadro de coeficiente de permeabilidad para la ETM 5.	158
Figura 111. Valores de permeabilidad primaria y secundaria para rocas fracturadas y macizos ROCOSOS.	159
Figura 112. Toma de Temperatura y parámetros físico-químicos.....	162
Figura 113. Balneario Aguas Calientes.	164
Figura 114. Medición de la altura de la piscina N°6.	167
Figura 115. Medición del largo de la piscina N°6.	167



Figura 116. Extracción de Muestra de Agua.	170
Figura 117. Captación de aguas superficiales.....	171
Figura 118. Reservorio de aguas superficiales para consumo humano.	172
Figura 119. Diagrama de Stiff de las muestras M-1 y M-2.	175
Figura 120. Diagrama de Stiff de las muestras M-3, M-4, M-5, M-6, M-7 y M-8.	176
Figura 121. Diagrama de Piper de las muestras M-1, M-2, M-3, M-4, M-5, M-6, M-7 y M-8.	177
Figura 122. Diagrama de Scatter de las muestras M-1, M-2, M-3, M-4, M-5, M-6, M-7 y M-8.	178
Figura 123. Temperatura de foco según los geotermómetros.....	183
Figura 124. Temperatura de foco según los Geotermómetros.....	183
Figura 125. Línea Geoeléctrica 01.....	185
Figura 126. Línea Geoeléctrica 02.....	185
Figura 127. Sección de la Tomografía Eléctrica ubicada a lo largo del camino de acceso al reservorio.	188
Figura 128. Sección de la Tomografía eléctrica ubicada a lo largo del camino de acceso al reservorio.	191
Figura 129. Sección 2 de la tomografía eléctrica ubicada en la zona central de las Piscinas. ...	193
Figura 130. Sección 2 de la Tomografía Eléctrica ubicada en la zona central de las Piscinas - Wenner.....	196
Figura 131. Sección 3 de la Tomografía Eléctrica ubicada en la zona del talud del reservorio.	198
Figura 132. Sección 3 de la Tomografía Eléctrica ubicada en la parte del río pasando por el reservorio y luego llegando hasta la piscina N°4.	201
Figura 133. Sección Hidrogeológica N°1 mostrando las unidades Hidrogeológicas.	203



Figura 134. Sección Hidrogeológica N°3 mostrando las unidades hidrogeológicas.	206
Figura 135. Sección Hidrogeológica N°2 mostrando las unidades hidrogeológicas.....	208
Figura 136. Ubicación del corte hidrogeológico.	212



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Ubicación Política de la zona de estudio.	1
Tabla 2. Ubicación Geográfica de la zona de estudio.	1
Tabla 3. Ubicación Hidrográfica de la quebrada Aguas Calientes según la metodología de codificación de Pfafstetter.	2
Tabla 4. Rutas de acceso a la zona de estudio.	3
Tabla 5. Operacionalización de variables.	12
Tabla 6: Clasificación de pendientes	76
Tabla 7: Pendientes y sus áreas correspondientes en la zona de trabajo.	76
Tabla 8: Clasificación de montañas según su altitud respecto al punto base de referencia.	80
Tabla 9. Unidades geomorfológicas en el área de estudio	80
Tabla 10. Medida de Temperaturas en piscinas y en los manantes exteriores.	163
Tabla 11. Volumen construido en las Piscinas del balneario de Aguas Calientes.	165
Tabla 12. Cálculo de Volumen de llenado de piscinas del balneario de Aguas Calientes.	166
Tabla 13. Caudal en las piscinas 2 y 4, en las 2 y 6 primeras horas de llenado.	169
Tabla 14. Ubicación de inventario de muestras de agua.	173
Tabla 15. Resumen de Parámetros Fisicoquímicos de las Fuentes de Agua.	173
Tabla 16. Resultados de laboratorio de la UNSAAC de muestras de agua.	174
Tabla 17. Resultados de Temperatura de Foco de las 8 muestras de agua, utilizando dos métodos (Na-K y Na-K-Ca).	181



LISTA DE MAPAS

Mapa 1. Mapa de Ubicación.	5
Mapa 2. Mapa de accesos.	6
Mapa 3. Mapa de Geología Regional.....	69
Mapa 4. Mapa de Pendientes.	79
Mapa 5. Mapa Geomorfológico Local.....	88
Mapa 6. Mapa Geológico Local.....	100
Mapa 7. Mapa Geología Estructural Local.	112
Mapa 8. Mapa de Fuentes de Agua.....	161
Mapa 9. Mapa de Líneas Geoeléctricas.	186
Mapa 10. Mapa de Unidades Hidrogeológicas del Balneario Aguas Calientes.....	210



CAPITULO I: GENERALIDADES

1.1. UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Los Baños Termales de Aguas Calientes se encuentra ubicado a 620 metros al NE de la Estación de Machupicchu, y la localidad de Aguas Calientes se encuentra ubicado a 104 km al NW de la ciudad del Cusco. Los Baños de Aguas Calientes políticamente y geográficamente se encuentra ubicado en:

Tabla 1. Ubicación Política de la zona de estudio.

Localidad	Aguas Calientes
Distrito	Machupicchu
Provincia	Urubamba
Departamento	Cusco

Tabla 2. Ubicación Geográfica de la zona de estudio.

Latitud	13° 09'3.69" S
Longitud	72° 31'16.81" O
Coordenadas UTM	Este: 768702 m
	Norte: 8544840 m
	Zona: 18 L
	Datum: WGS 84
Altitud	2160 m.s.n.m.



Tabla 3. Ubicación Hidrográfica de la quebrada Aguas Calientes según la metodología de codificación de Pfafstetter.

Nivel	Unidad Hidrográfica	Código
Nivel 6	Intercuenca Vilcanota	499497
Nivel 5	Intercuenca Alto Urubamba - Vilcanota	49949
Nivel 4	Cuenca Urubamba	4994
Nivel 3	Ucayali	499
Nivel 2	Alto Amazonas	49
Nivel 1	Región Hidrográfica del Amazonas	4

Fuente: (ANA, Inventario de fuentes de agua superficiales Cuenca del río

Urubamba, 2010)

1.2. CLIMA Y VEGETACIÓN.

1.2.1. Clima:

La zona de estudio resalta dos estaciones, la primera de estiaje durante los meses de mayo a septiembre y la segunda de alta precipitación pluvial durante los meses de noviembre a abril.

Según la clasificación de Pugar Vidal (1987), el poblado de Machupicchu y las microcuencas de Aguas Calientes y Alcamayo, pertenecen principalmente a la región Quechua.

En la región Quechua que va de 2300 a 3500 msnm, el clima principal es templado, con diferencias de temperatura entre el día y la noche. La temperatura media anual fluctuante entre 11 y 16°C; las temperaturas máximas entre 22 y 29°C y las mínimas entre 7 y -4°C durante el invierno, entre los meses mayo y agosto. Las precipitaciones caen con regularidad durante los meses de noviembre a abril. (Delgado Madera, 2014)



1.2.2. Vegetación:

Posee una diversidad de plantas que ha sido calculado entre 2350 y 3400 especies entre plantas vasculares y no vasculares. Como por ejemplo helechos, alisos, pisones y un centenar de especies de orquídeas. (Travel, 2023)

1.3. ACCESIBILIDAD

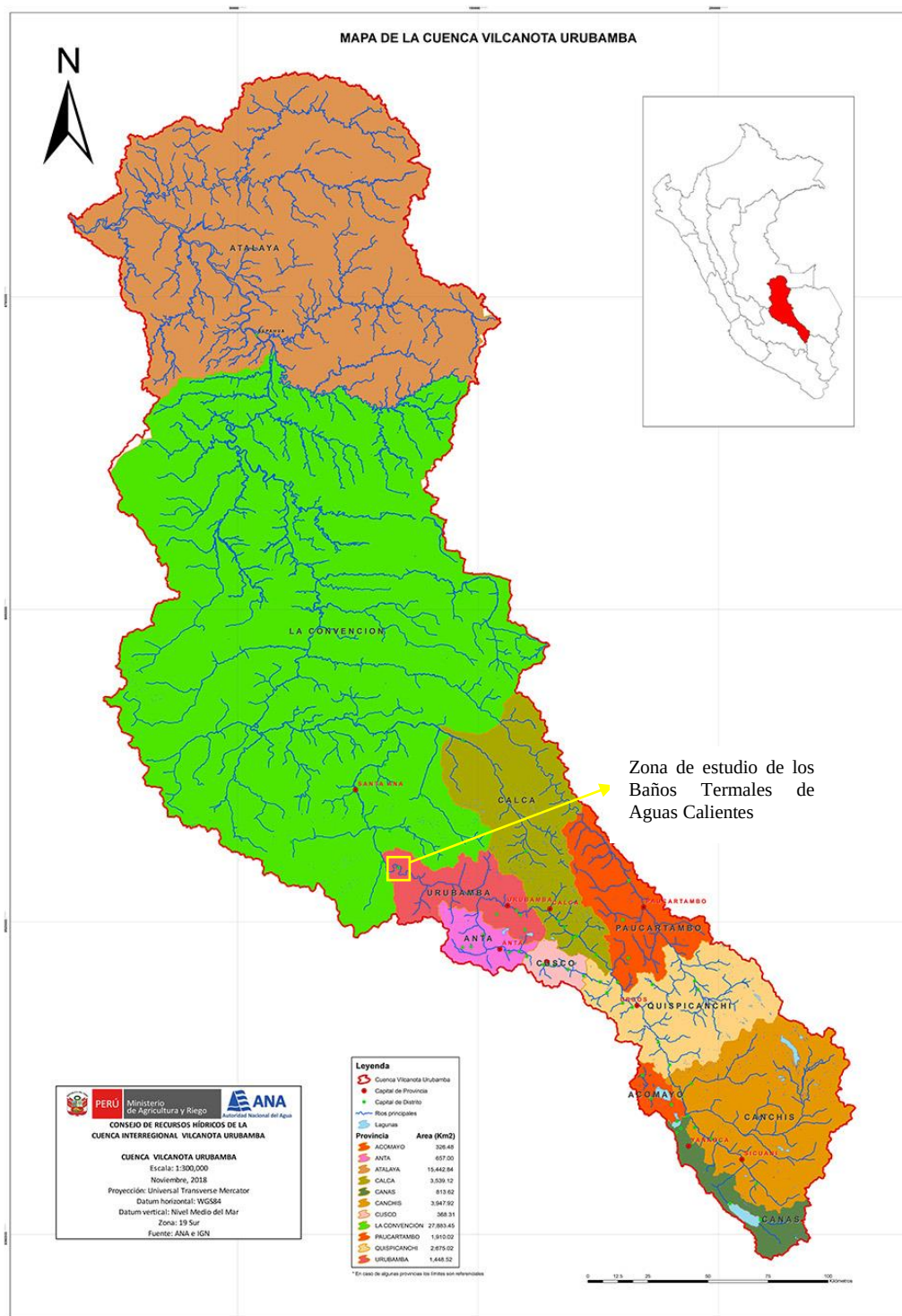
Para llegar a los Baños Termales de Aguas Calientes, las principales vías de acceso son las siguientes:

Tabla 4. Rutas de acceso a la zona de estudio.

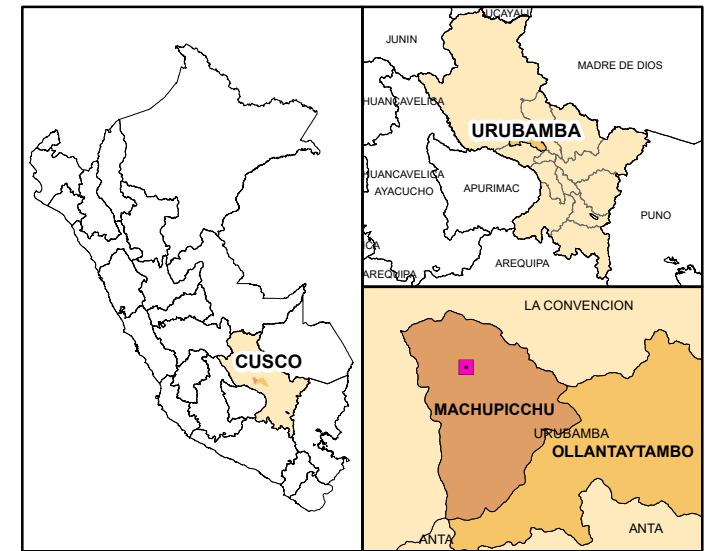
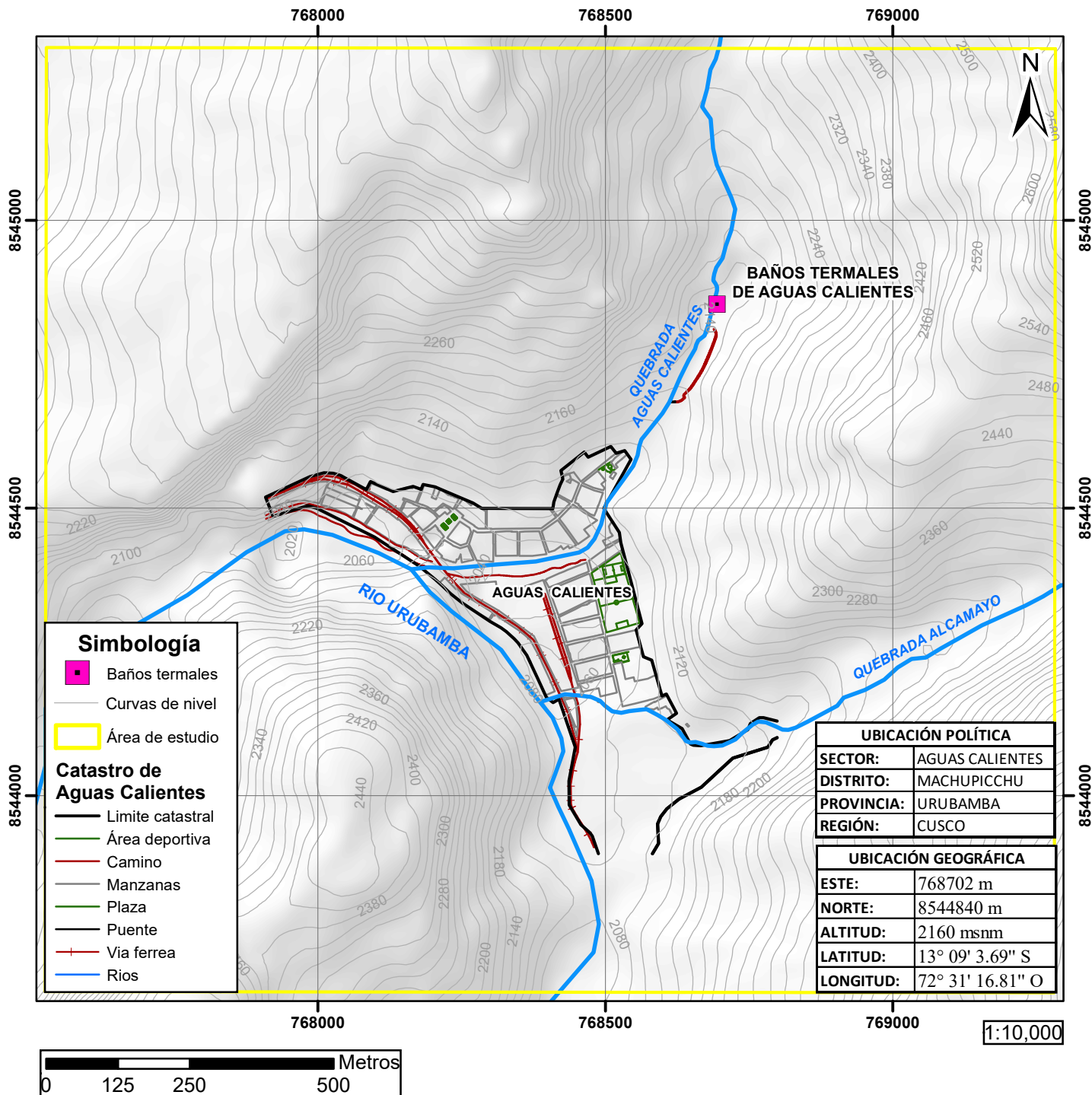
Ruta	Tramo	Distancia	Tiempo	Tipo de Vía
Ruta 1	Cusco - Ollantaytambo	59.3 km	1h 45 min	Asfaltado
	Ollantaytambo - Aguas Calientes	44.7 km	1h 50 min	Férrea
	Aguas Calientes - Baños Termales	620 m	10 min	Camino Peatonal
Ruta 2	Cusco - Santa María	181 km	4h	Asfaltado
	Santa María - Hidroeléctrica	33.6 km	1h 20 min	Trocha Carrozable
	Hidroeléctrica - Aguas Calientes	9.2 km	30 min	Ferréa
	Aguas Calientes - Baños Termales	620 m	10 min	Camino Peatonal



Figura 1. Ubicación Geográfica de la Cuenca Urubamba.



Fuente: (ANA, Inventario de fuentes de agua superficiales Cuenca del río Urubamba, 2010)



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

TESIS: "CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y GEOMECANICA DE LOS BAÑOS TERMALES DE AGUAS CALIENTES DEL DISTRITO DE MACHUPICCHU, PROVINCIA DE URUBAMBA, REGION CUSCO"

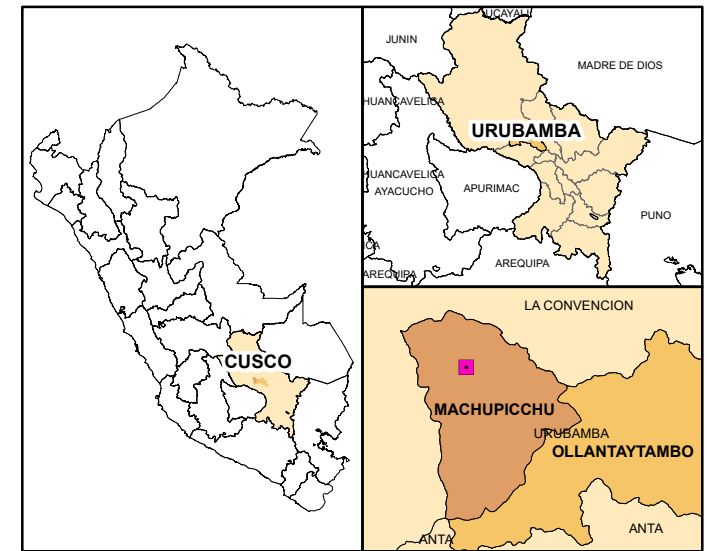
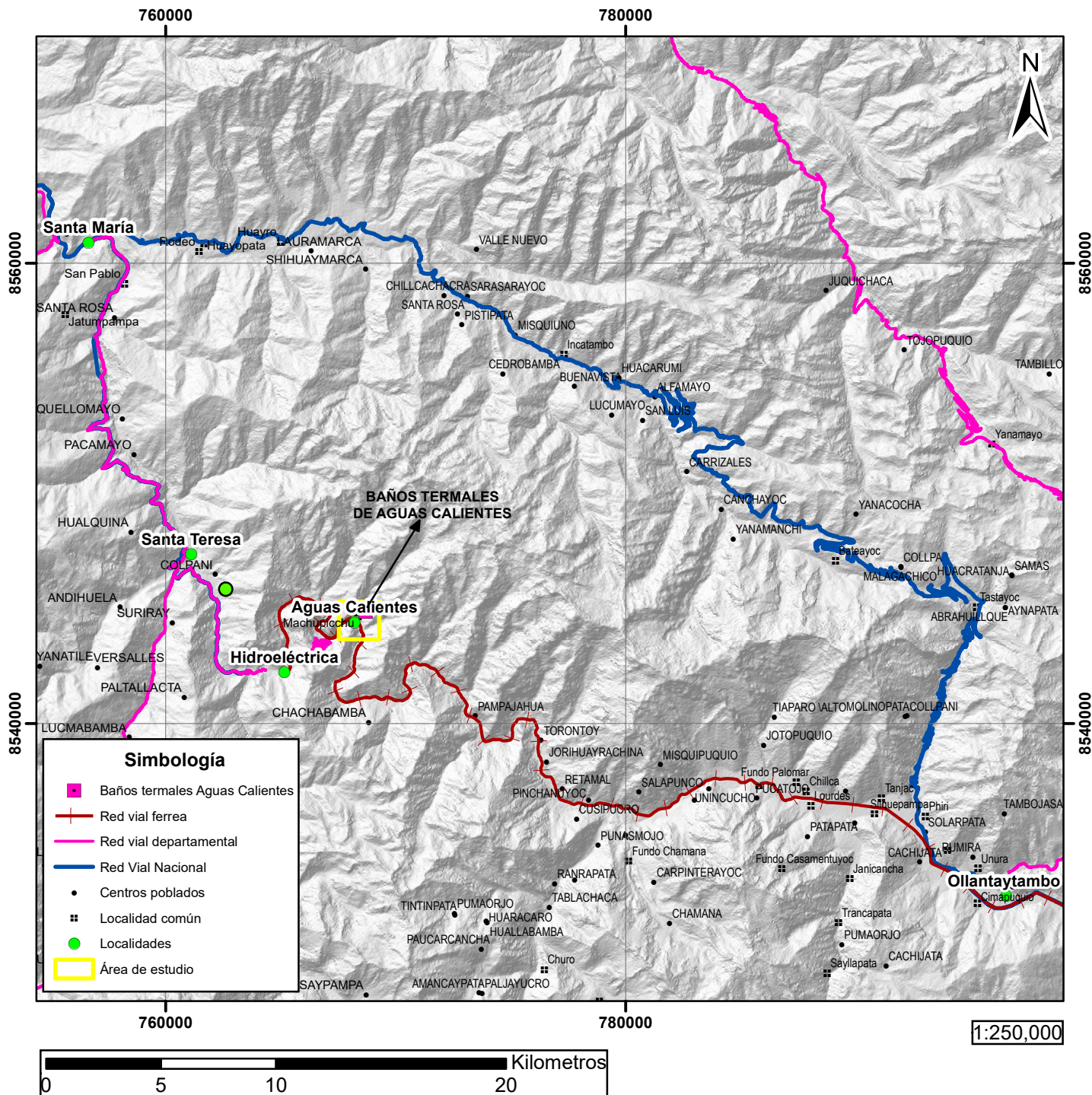
MAPA: MAPA DE UBICACIÓN

ELABORADOR POR: KATHERINE GUTIERREZ PERALTA - VANESSA I. VALVERDE GOYZUETA

ASESOR: ING. LÓPEZ ZAPANA RONALD LUIS

DATUM: WGS 1984_UTM_ZONA_18S

MAPA N° 01



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

TESIS: "CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y GEOMECANICA DE LOS BAÑOS TERMALES DE AGUAS CALIENTES DEL DISTRITO DE MACHUPICCHU, PROVINCIA DE URUBAMBA, REGION CUSCO"

MAPA:	MAPA DE ACCESOS	ESCALA:	INDICADA
ELABORADOR POR:	KATHERINE GUTIERREZ PERALTA - VANESSA I. VALVERDE GOYZUETA		
FUENTE DE DATOS:	ING. LÓPEZ ZAPANA RONALD LUIS		
DATUM:	WGS 1984_UTM_ZONA_18S		
			MAPA N° 02



1.4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.4.1. Descripción del problema

El balneario de Aguas Calientes es utilizado durante años para fines recreativos, ha sido catalogado según el estudio de “Aguas termales y minerales en el suroriente del Perú” del INGEMMET en el año 2001 como un complejo termal turístico de tipo de agua termomineral.

Con la declaración del sitio arqueológico de Machupicchu como una de las Siete Maravillas del Mundo Moderno en el 2007, la afluencia de turistas nacionales y extranjeros ha aumentado considerablemente para visitar y contemplar este lugar, además, otro punto de afluencia son los Baños Termales de Aguas Calientes.

En el lugar sólo se encuentra un cuadro de características físico-químicas de parámetros como Temperatura, PH, salinidad, etc., sin embargo, estas no presentan una información amplia y/o están sin interpretación alguna para el público en general. Los Baños Termales de Aguas Calientes no poseen estudios específicos sobre su origen, clasificación hidrogeológica, la interrelación con las estructuras geológicas tanto local como regional, ni estudios recientes de su hidroquímica, no se tiene conocimiento sobre la zona de recarga de este acuífero, el tipo de agua que origina estas aguas termales, los procesos mediante el cual se calientan estas aguas, ni la temperatura a la cual se encuentra el foco, tampoco la profundidad a la cual se encuentra dicho foco; etc.

En la zona exterior al balneario existen dos manantes los cuales surgieron tiempo después de ser construido las estructuras del balneario, además surgieron otros manantes en la base de las piscinas (2, 3 y 4).



1.4.2. Formulación del Problema General

¿Cuáles son las características hidrogeológicas y geomecánicas de los Baños Termales de Machupicchu Pueblo?

1.4.3. Formulación de los Problemas Específicos

1. ¿Cuáles son las unidades geomorfológicas de la zona de estudio?
2. ¿Cuáles son las unidades geológicas en la zona de estudio?
3. ¿Cuáles son las estructuras (fallas y fracturas) del área de estudio?
4. ¿Cuáles son las características el macizo rocoso según la clasificación geo-mecánica del RMR de Bieniawski y cuál es la permeabilidad indirecta?
5. ¿Cuáles son los parámetros fisicoquímicos y su interpretación hidroquímica?
6. ¿Cuáles son las características de las unidades hidrogeológicas mediante la aplicación del método de resistividad eléctrica con el uso del tomógrafo eléctrico?

1.5.IMPORTANCIA Y JUSTIFICACIÓN

1.5.1. Justificación del problema

Este trabajo de investigación amplía el conocimiento que se tiene sobre las aguas termales de Aguas Calientes. Con esto se refuerza otros estudios regionales (como el desarrollado por el INGEMMET en su Boletín de “Aguas termales y minerales en el suroriente del Perú) y se genera nueva información de las características hidrogeológicas de las aguas termales y de las características geomecánicas del macizo rocoso donde se encuentra el balneario de Aguas Calientes.

- a) Conveniencia.** El estudio mostró las características hidrogeológicas y geomecánicas actuales de los Baños Termales de Aguas Calientes, las cuales permitieron mediante la



utilización de la química de las aguas termales determinar la profundidad y temperatura de foco con los geotermómetros naturales, además de resaltar una relación específica entre la geológica estructural y la geomecánica de las estructuras geológicas tanto regionales como locales.

- b) Relevancia.** Su relevancia social se centra en que los pobladores, autoridades y visitantes puedan conocer de manera científica el origen o descripción de la surgencia de las aguas termales en esta zona.
- c) Implicancia práctica.** El presente estudio podrá permitir a la institución encargada de los Baños Termales de Aguas Calientes (Municipalidad distrital de Machupicchu) gestionar la infraestructura adecuada para el mejor aprovechamiento de las aguas termales, así como poder informar a los visitantes de los resultados hidro químicos y su interpretación.
- d) Valor teórico.** El estudio proporciona datos esenciales para describir las propiedades hidrogeológicas y geomecánica de las aguas termales de Aguas Calientes, constituyendo una base sólida para desarrollo de futuras investigaciones científicas o proyectos específicos en la zona.

1.6.OBJETIVOS

1.6.1. *Objetivos generales*

Determinar las características hidrogeológicas y geomecánicas de los Baños Termales de Aguas Calientes.

1.6.2. *Objetivos específicos*

1. Identificar las unidades geomorfológicas de la zona de estudio
2. Identificar las unidades geológicas en la zona de estudio.
3. Identificar las estructuras (fallas y fracturas) del área de estudio.



4. Caracterizar el macizo rocoso según la clasificación geo-mecánica del RMR de Bieniawski y la determinar la permeabilidad indirecta.
5. Determinar los parámetros fisicoquímicos y su interpretación hidroquímica.
6. Caracterizar las unidades hidrogeológicas mediante la aplicación del método de resistividad eléctrica con el uso del tomógrafo eléctrico.

1.7.HIPÓTESIS

1.7.1. *Hipótesis general*

Las características hidrogeología y geomecánica presentes en el área de estudio, constituyen acuíferos que dan las condiciones para la existencia de este balneario de aguas calientes.

1.7.2. *Hipótesis Específicos*

1. Las unidades geomorfológicas regionales como las montañas altas de la cordillera de Vilcabamba y los glaciares preexistentes favorecen en la infiltración de las aguas y por gradiente hidráulico estas se transportan hacia la quebrada aguas calientes.
2. Las unidades geológicas en la zona de estudio condicionan la composición química de las aguas termales.
3. Las estructuras (fallas y fracturas) regionales como la falla inversa Ollantaytambo-Vilcabamba-Quimbiri favorecen en la infiltración de aguas meteóricas y además las fallas locales hacen posible que las aguas termales emerjan a la superficie.
4. El macizo rocoso en la zona de estudio presenta una clasificación buena según la clasificación geo-mecánica del RMR de Bieniawski y la permeabilidad indirecta es media según el grado de fracturamiento de la roca.



5. Los parámetros fisicoquímicos y la hidroquímica de las aguas termales dependen de la composición de las cocas por las cuales estas transitan como el batolito de Machupicchu y las rocas metamórficas.
6. El batolito de Machupicchu y su fracturamiento comprende las unidades hidrogeológicas en la zona de estudio que se clasifica como un acuífero fisurado.

1.8.ALCANCE

Este trabajo de investigación tiene por objetivo principal la caracterización hidrogeológica y geomecánica de las aguas termales de Aguas Calientes. De lo anterior podemos afirmar que este estudio se enfoca en la descripción, análisis y medición de los parámetros fundamentales relacionados a la hidrogeología y la geomecánica en las rocas relacionada a los acuíferos. Esta investigación no incluye análisis geomecánico avanzados (análisis de estabilidad de taludes o modelamientos numéricos), ni modelamientos de flujos avanzados o balances hídricos en zonas de recarga y descarga. La finalidad de esta investigación es proporcionar información base para futuros estudios o proyectos específicos relacionados con la gestión de las aguas termales de Aguas Calientes.



1.9.VARIABLES

Tabla 5. Operacionalización de variables.

Variables de la investigación	Dimensiones	Indicadores	Índices	Escala de medición
Caracterización Hidrogeológica	Geología	Estratigrafía	Litoestratigrafía	Tipo de roca
			Espesor	Metros
		Geología Estructural	Análisis estructural	Dirección preferente de fracturas
			Deformaciones	Fallas, Plegamientos, fracturas
		Geomorfología	Fisiografía	Fondo de valle, montaña, etc
	Hidrogeología	Porosidad	Porosidad secundaria	Adimencional
		Permeabilidad	Coeficiente de permeabilidad indirecta	cm/s
		Fuentes de agua	Unidad hidrogeológica	Acuífero fisurado, acuitado, acuífugo, acuícludo
		Parámetro físico-químico	T°, pH, C.E, TDS, salinidad, resistividad	°C, Ds/m, ppt, psu, ohm/cm
		Facies hidroquímicas	Diagrama de Stiff	Componentes iónicos mayoritarios (Ca, Mg, Na, K, bicarbonatos, sulfatos y cloruros)
Caracterización Geomecánica	Geofísica	Método eléctrico	Diagrama de Piper-Scatter	ohmios.metro
	Clasificación del macizo rocoso	RMR	Resistividad eléctrica (tomografía eléctrica)	Calidad del macizo rocoso: Muy buena, buena, medio, mala, muy mala



1.10. METODOLOGÍA

1.10.1. *Métodos de investigación*

El método empleado fue el descriptivo – correlacional (causal)

Método descriptivo: Busca especificar propiedades y características importantes de cualquier fenómeno que se analice. En esta clase de estudios el investigador debe ser capaz de definir, o al menos visualizar, qué se medirá (qué conceptos, variables, componentes, etc.) y sobre qué o quiénes se recolectarán los datos (personas, grupos, comunidades, objetos, animales, hechos) (Hernández Sampieri, 2014)

Método correlacional: Este tipo de estudios tiene como finalidad conocer la relación o grado de asociación que exista entre dos o más conceptos, categorías o variables en una muestra o contexto en particular. En ciertas oportunidades se analiza la relación entre dos variables solamente, pero a menudo se tienen en el estudio relación entre tres, cuatro o más variables. Para evaluar el grado de asociación entre dos o más variables, en los estudios correlacionales primero se mide cada una de éstas, y después se cuantifican, analizan y establecen las vinculaciones. (Hernández Sampieri, 2014)

1.10.2. *Diseño de la investigación*

Se determinó que el diseño de la investigación es No experimental.

Diseño no experimental: Se les conoce así a los estudios que se ejecutan sin la maniobra deliberada de variables y en los que sólo se ven los fenómenos en su estado natural para estudiarlos. Por ello, se trata de estudios en los que no se hace variar en forma deliberada las variables independientes para ver lo que resulta sobre otras variables. Lo que hacemos en la investigación



no experimental es observar fenómenos tal como se dan en su contexto natural, para analizarlos. (Hernández Sampieri, 2014).

1.10.3. Enfoque

Se determino el enfoque Mixto (Cuantitativo – Cualitativo): Los métodos mixtos o híbridos representan un conjunto de procesos sistemáticos, empíricos y críticos de investigación e implican la recolección y el análisis de datos tanto cuantitativos como cualitativos, así como su integración y discusión conjunta, para realizar inferencias producto de toda la información recabada (denominadas metainferencias) y lograr un mayor entendimiento del fenómeno bajo estudio. (Hernández Sampieri, 2014)

1.10.4. Materiales y equipos

Materiales de Gabinete

- Hojas
- Útiles de escritorio
- Mapas de trabajo
- Pizarra

Materiales de campo

- Mapas de trabajo
- Escalímetro, protector y tablero
- Picota
- Brújula
- Rayador
- Lupa



- Colores y marcadores
- Bolsa de muestreo
- Libreta de campo
- Cíncel y comba
- Tiza
- Linterna
- Wincha

EQUIPOS DE TRABAJO

Equipo de gabinete

- Computadoras
- Impresoras
- Calculadoras
- Programas de procesamiento (ARCGIS, AUTOCAD, CIVIL 3D, EXCEL)

Equipos de campo

- GPS
- GEOGIGA ELECTRIC DZD-6A y DUK – 2^a
- HANNA COMBO PH/EC/TDS/TEMP TESTER



1.10.5. Fases de la investigación

FASE DE PRECAMPO

- Visita a la zona de estudio para hacer conocer los detalles del estudio a las autoridades de la localidad de Aguas Calientes, mediante la presentación del documento emitido por la Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica.
- Determinar un cronograma tentativo de visitas a la zona de estudio
- Elaboración de mapas base.

FASE DE CAMPO

- Identificar y delimitar la geología (extracción de muestras que represente la litología de cada formación presente en la zona de estudio para realizar la descripción macroscópica y también para elaborar una muestra de roca pulida y sección delgada para la descripción microscópica).
- Identificar y delimitar las estructuras presentes (fallas y diaclasas mediante estaciones micro tectónicas.
- Recolección de datos hidrogeológicos (inventario de fuentes de agua termal, medición de caudales, extracción de muestra de agua, permeabilidad, Registro de las características hidroquímicas del agua, etc.).
- Realizar prospección geofísica de manera sistemática en la zona de estudio (mediante el método de tomografía eléctrica).
- Fotografiar características geológicas, geomorfológicas, entre otros, de importancia para el estudio.



ETAPA DE GABINETE “GABINETE II”

- Procesamiento de datos de campo, interpretación y análisis de datos.
- Delimitación de acuíferos.
- Elaboración y digitalización de mapas detallados según lo que requiera el presente estudio.
- Elaboración de secciones geológicas-estructurales.
- Análisis y descripción macroscópica y microscópica de las muestras obtenidas en campo.
- Conclusiones y recomendaciones.
- Elaboración de anexos, donde se presentará fotos de la zona de estudio y descripción de cada fotografía.
- Redacción de tesis.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. ESTUDIOS ANTERIORES

Como estudios anteriores se tomarán los siguientes estudios:

(Huamaní & Valenzuela, 2003) Boletín N°25 “**Aguas Termales y Minerales en el Suroriente del Perú**” Boletín N°25 (INGEMMET). Este boletín realiza un estudio general de las aguas termales en las regiones Apurímac, Cusco, Madre de Dios y Puno, indica que las aguas termales de acuerdo al análisis químico que presentan, La fuente Termal de Aguas Calientes posee una clasificación clorurado-sódico de 1342 mg/l de Cl, 39 °C y pH de 6.1 clasificado como aguas ligeramente ácido. También indican que el alto contenido de Sodio con Li, Cs, Rb y K, evidencian la influencia del intrusivo de Machupicchu.



(Carlotto, Cárdenas, & Fidel, 2009) **“La geología, evolución geomorfológica y geodinámica externa de la ciudad Inca de Machupicchu, Cusco-Perú”** Revista (Asociación Geológica Argentina). En este trabajo afirman que la ciudad Inca de Machupicchu y alrededores están enmarcadas geológicamente por afloramientos caóticos de granitos. En este artículo también afirman la presencia de fallas geológicas regionales de dirección NO-SE, una de ellas denominada Falla Urubamba por Vilimek et al (2005), y la otra denominada Central Hidroeléctrica Machupicchu, ambas fallas controlan el meandro ubicado en la localidad de Machupicchu Pueblo (Carlotto et al. 1999, 2007). También en este artículo se resalta la presencia de fallas locales denominadas Waynapicchu, Machupicchu y Foso Seco (como se citó en Kalafatovich, 1963).

(INDECI PNUD, 2012) **“Mapa de peligros y medidas de mitigación ante desastres de la Ciudad de Machupicchu2** Informe de Riesgos (INDECI). De este trabajo podemos destacar el estudio geotécnico realizado en la localidad de Machupicchu Pueblo, y una calicata ubicada a inmediaciones del baño termal Aguas Calientes dio como resultado (Clasificación SUCS) Arena bien graduada con grava SW, este resultado concuerda con las 9 calicatas restantes, lo que confirma que estos depósitos cuaternarios son originados por la erosión de rocas graníticas que están presentes en toda la zona de estudios.

(Municipalidad Distrital de Machupicchu, 2017) **“Estudio geológico con fines de cimentación del proyecto. Mejoramiento del sistema de agua y desagüe del CC. PP Machupicchu, provincia de Urubamba, Cusco”** Expediente Técnico (Municipalidad Distrital de Machupicchu). En este trabajo se hizo un Análisis Geomecánico del Macizo Rocosó en granitos y granodioritas pertenecientes al Batolito de Machupicchu ubicados en la misma localidad, la extracción de muestras lo hicieron en 3 puntos específicos, de las cuales podemos resaltar los siguientes ensayos: densidad (2.57 a 2.64 gr/cm³), carga puntual (28 a 70 σ_C Mpa), RMR básico



(30 a 39), lo que da a consideración la gran cantidad de diaclasamiento que existe en la zona de estudio, en total 4 familias.

(Menegat, 2019) **“Cómo los Incas utilizaron las fallas geológicas en sus asentamientos”** Artículo Científico (Menegat). Este trabajo establece la relación de la construcción de Machupicchu con la geología estructural, geomorfología y geología. Menegat indica que en Machupicchu e inmediaciones existe una gran red geológica muy densa de fallas y fracturas, también indica que se ha analizado 8 estructuras entre lineamientos y fallas a partir de imágenes satelitales, así como datos obtenidos en el mismo campo.

2.2.ANTECEDENTES.

A. Antecedentes Internacionales.

Ant. 1 (Sanchez, 2008) **“Evolución Geoquímica de las aguas subterráneas”** Artículo Científico (Universidad de Salamanca). Este trabajo nos indica que, en las cuencas sedimentarias, existe o se identifican tres zonas de profundidad en las aguas subterráneas: Una zona superior donde predomina las aguas bicarbonatadas y poco salinas, una zona intermedia de aguas sulfatas, y una zona inferior-flujos regionales de flujo muy lento y recorrido largo con elevada salinidad y aguas cloruradas (como se citó en Chevotareb, 1955).

También cabe resaltar el origen y contenido relativos de especies de azufre S (SO_2 y H_2S), son los constituyentes cuantitativamente más importantes después del H_2O y el CO_2 en la composición de los gases volcánicos, que, a comparación con el análisis efectuado por el INGEMMET en el boletín de Aguas Termales y Minerales en el oriente del Perú, las aguas termales de Machupicchu podrían ser descartados de manera preliminar como de origen volcánico.



Ant. 2 (Aymerich Urzaiz, 2013) **“Estudio y modelización del sistema geotérmico de Sierra Almagrera (Almería)”** Tesis Pregrado (Universidad Politécnica de Catalunya). En este trabajo se muestra la utilización de los diferentes geotermómetros naturales como los de Na-K y Na-K-Ca, y a partir de los cationes que presenta las muestras de aguas termales de los diferentes pozos determinan la Temperatura de foco, además realizan una comparación entre los diferentes geotermómetros tomando como un dato representativo el resultado del geotermómetro Na-K y Na-K-Ca.

Ant. 3 (Agua, 2009) **“Las Aguas Minero – medicinales del Balneario de Almeida”** Artículo Científico (Mar Llamas del Agua). En este trabajo se realiza un análisis físico en diferentes fechas y se realiza un análisis de la evolución de la composición de las aguas tomando en cuenta temperatura, el caudal y su mineralización. Además, se concluye que el agua es de flujo intermedio de facie sulfatada.

Ant. 4 (Bécher Quinodóz, Blarasin, & Cabrera, 2011) **“Caracterización Hidrogeoquímica Conceptual y Modelación en la Llanura Medanosa de Laguna Oscura – Córdoba – Argentina”** Artículo Científico (Universidad Nacional de Río Cuarto). Este trabajo realiza una caracterización hidrodinámica e Hidrogeoquímica del acuífero freático, estableciendo relaciones entre aguas superficiales–subterráneas. con el objetivo de validar el modelo hidrogeológico conceptual, el modelo conceptual planteado para la modelación es a lo largo de una línea de flujo; ello nos ayudará a realizar el modelo conceptual del flujo de aguas subterráneas en nuestra tesis.

Ant. 5 (Panichi & Badiola, 1948) **“Utilización del Geotermómetro Na-K-Ca en la prospección preliminar de áreas geotérmicas”** Artículo Científico (Instituto Lucas Mallada). En este trabajo se presenta resultados obtenidos mediante la aplicación del geotermómetro Na-K-Ca



a las manifestaciones termales del territorio italiano, efectuándose un análisis crítico del método mediante el estudio en detalle de las zonas planteándose las condiciones requeridas en la aplicación de esta tecnología, lo cual se aplica en esta tesis.

B. Antecedentes Nacionales.

Ant. 1 (Peña, Sima & Baratoux, 2007) “**Hidrogeología de las fuentes termales de Cajamarca y Churin para el desarrollo de las aguas termales y minerales**” Artículo Científico (Sociedad Geológica del Perú). Este trabajo realizado por Fluquer Peña y geólogos de la República Checa (Sima & Baratoux) es muy importante para la elaboración de esta tesis, ya que contiene información relevante y similar a las condiciones hidrogeológicas de las aguas termales de Aguas Calientes. En este artículo, los autores llegan a las conclusiones que las fuentes termales y minerales del Baño de Inca-Cajamarca están controladas por fallas paralelas N-S al valle y el anticlinal de baños del Inca.

Ant. 2 (Vargas, 2010) “**Las fuentes Termales en el Perú, Estado y Uso Actual**” Artículo (Sociedad Geológica del Perú). Este artículo describe el tipo de origen de aguas termales en el Perú, además diferencia tipo de fuentes como como aguas minerales, termominerales y minero medicinales el uso y su normativa todo ello nos sirve para realizar una caracterización en nuestra tesis.

Ant. 3 (Guzmán Álvarez & Huallpa Yucra, 2023) “**Estudio Hidrogeológico de Aguas Subterráneas en el Balneario Pojpoquilla Distrito de Ayaviri – Puno**” Tesis de Pregrado (UNSAAC). Este trabajo de tesis realiza una caracterización del balneario de Pojpoquilla desde el punto de vista geológico, geomorfológico, hidrogeológico, hidroquímica y una prospección geofísica. Se llegó a la conclusión que esta agua es de facie clorurada y que las aguas de este



balneario se calientan por gradiente geotérmico, condiciones muy similares a los del balneario Aguas Calientes.

C. Antecedentes Regionales.

Ant. 1 (Apaza Rojas & Huamán Quispe, 2020) “**Estudio Hidrogeológico con fines de determinar el Potencial Hídrico en la Cuenca de Cachimayo, Dist. Santiago, Prov. Cusco, Reg. Cusco – 2019**” Tesis de Pregrado (UNSAAC). En este trabajo se identificó 02 tipos de familias que predominan en la cuenca Cachimayo, la familia dominante es la cálcica sulfatada que provendrían de rocas sedimentarias, areniscas cuarzosas y feldespáticas (formación Kayra y Quilque), sobre todo, en los flancos del anticlinal de Puquín. En la parte del núcleo del anticlinal se identificó la familia cálcica clorurada que provendrían de la disolución de yesos y sales de la formación Puquín. Esta última en una facie similar a la que se presenta en el balneario Aguas Calientes.

Ant. 2 (Gutierrez Supa, 2023) “**Estudio Hidrogeológico de los baños termales de La Raya, distrito de Marangani, Provincia de Canchis, Cusco**” Tesis de Pregrado (UNSAAC). En este trabajo se realiza una evaluación de tomografías eléctricas y geología estructural que evidencian la presencia de dos fallas de rumbo y son responsables de la surgencia de aguas termales además las aguas termales de este lugar lo clasifican como cloruradas sódicas, permitiendo determinar como un tipo de aguas termales de flujo regional, teniendo como origen la precipitación pluvial infiltrándose por medio de las fracturas y recargando los acuíferos y elevando la temperatura en profundidad; características muy similares a las aguas termales de Aguas Calientes.



2.3. CARACTERIZACIÓN

“Es el proceso de describir y analizar las propiedades, atributos o rasgos específicos de un fenómeno, objeto o área de interés con el fin de identificar sus particularidades” (Burga, 2011).

La caracterización se limita a realizar la identificación, descripción y medición de propiedades (por ejemplo: parámetros físico-químicos, parámetros geomecánicas, geológicos, entre otros). En cambio, un **estudio** comienza cuando se integran estos datos de caracterización para realizar análisis, modelamientos o evaluaciones con el fin de resolver problemas, aquí se describe procesos integrales más profundos de las variables.

2.4. CONCEPTOS DE HIDROGEOLOGÍA

2.4.1. Aguas subterráneas.

Es el agua que se distribuye y recorre en profundidad, conformando los acuíferos. La fuente principal es el agua de lluvia durante la infiltración. Otras fuentes locales de alimentos pueden ser ríos, arroyos, lagos y estanques. El agua subterránea se encuentra debajo del nivel freático y satura completamente los poros y/o grietas del suelo y fluye naturalmente hacia la superficie a través de vertientes o manantiales o ríos. Su movimiento en los acuíferos es desde zonas de recarga a zonas de descarga, con velocidades que van desde metro por año a cientos de metros por día, con tiempo de residencia largos resultando grandes volúmenes de almacenamientos, aspectos característicos del agua subterránea. (Collazo Caraballo & Montaña Javier, 2012)

2.4.2. Clasificación de las rocas desde el punto de vista hidrogeológico.

Desde el punto de vista hidrogeológico, las rocas se clasifican en:

- Los acuíferos son rocas que almacenan y transportan grandes cantidades de agua.
- Los Acuitardos son rocas que almacenan agua y la transportan lentamente.



- Los Acuicludos son rocas con importante capacidad de almacenamiento, pero casi nula capacidad de transporte.
- Los Acuífugos son rocas que no almacenan ni transporta agua.

Los límites entre un tipo de roca y otro no están claramente definidos y, en la práctica, una unidad geológica a menudo se considera un acuífero basado en las características de otras unidades geológicas de la zona. El término acuífero (del latín aqua = agua y ferre = transportar) no se refiere a la naturaleza o edad de las rocas de una unidad geológica, sino únicamente a su capacidad para transportar agua. El agua almacenada en estas unidades geológicas se denomina agua subterránea. (Collazo Caraballo & Montaña Javier, 2012)

Clasificación de los acuíferos según su porosidad:

a) Acuíferos de porosidad primaria, porosos o sedimentarios: Constituidos por rocas sedimentarias, los materiales suelen ser gravas y principalmente arenas, que varían su composición y tamaño en función de su origen geológico (fluvial, eólico, lacustre, glacial, etc.). Estos materiales pueden estar sueltos o no consolidados (generalmente son formaciones recientes, de edad cuaternaria) o consolidados. (Collazo Caraballo & Montaña Javier, 2012)

b) Acuíferos de porosidad secundaria o fisurado: Formado a partir de una roca ígnea o "sólida" de origen metamórfico. La porosidad de estos acuíferos está determinada por la presencia de zonas de alteraciones, fracturas, fallas o juntas, que son los únicos modos de almacenamiento y circulación del agua. Cabe señalar que para que el agua circule, estas grietas deben estar abiertas y conectadas. (Collazo Caraballo & Montaña Javier, 2012)

c) Acuíferos kársticos por disolución: Está formado por rocas carbonatadas (calizas, margas, dolomías) en las que se han desarrollado poros (cavidades y cuevas) secundarios a la disolución

de los carbonatos. El agua en estos acuíferos circula por entre los huecos con una velocidad mayor que en los acuíferos porosos o fracturados. (Collazo Caraballo & Montaña Javier, 2012)

Figura 2. Tipos de acuífero según su porosidad



Fuente: (Collazo Caraballo & Montaña Javier, 2012)

2.4.3. Clasificación de los acuíferos según su potencial hidráulico

a) Acuífero Libre: Es cuando el agua almacenada en el acuífero está en contacto directo con la atmósfera a través de los poros y fisuras de la roca. En los acuíferos libres la zona saturada está limitada en su parte superior por una superficie en la que el agua se encuentra a la presión atmosférica, conocida como superficie freática. Si ésta aflora puede dar lugar a rezumes, manantiales o depresiones encharcadas. el límite superior de la zona saturada, la superficie freática, es una superficie física lugar geométrico de los puntos en los que el agua subterránea se encuentra a la presión atmosférica. En cualquier punto por debajo de la superficie freática el agua está a una presión mayor que la atmosférica (está a la presión atmosférica más la correspondiente al peso de la columna de agua que carga sobre ese punto). Se supone que el peso de la roca no ejerce ninguna

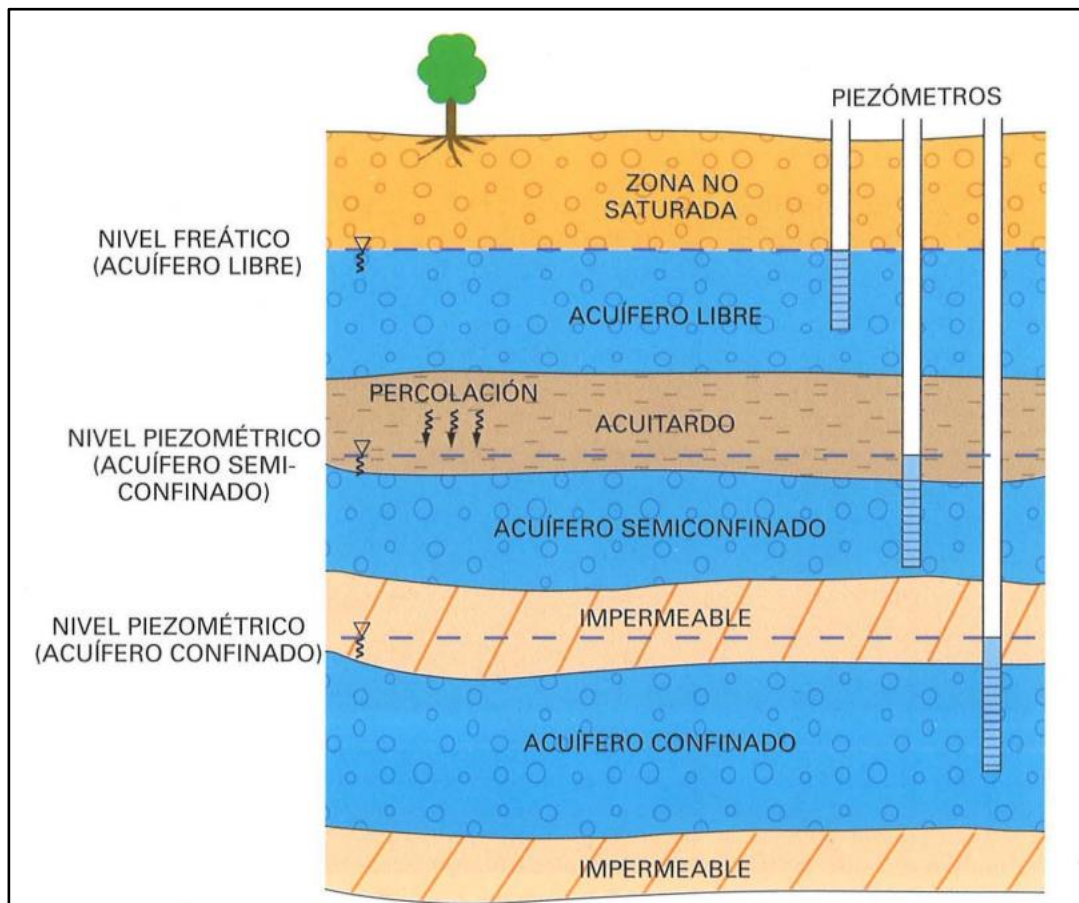


presión sobre el agua que en ella se almacena, es decir, que el esqueleto del acuífero es una estructura independiente y estable (si se vacía de agua, la roca no se desmorona). (Martínez Alfaro, Martínez Santos , & Castaño Castaño , 2006)

b) Acuífero confinado: Es cuando un acuífero está aislado de la atmósfera por unidades geológicas impermeables se le denomina acuífero confinado. Un acuífero confinado está siempre saturado de agua y en todos sus puntos el agua se encuentra a una presión mayor que la atmosférica. Debido a ello si se perfora un sondeo hasta alcanzar un acuífero confinado, el agua del acuífero ascenderá en el interior de ese sondeo hasta alcanzar un equilibrio entre la presión a la que se encuentra sometida y la presión atmosférica. A este fenómeno se le denomina artesianismo. Si la presión fuese suficiente el agua podría ascender por encima de la superficie del terreno originándose un fenómeno de surgencia. A la cota que alcanzaría el agua en el interior de un sondeo ranurado en un punto del acuífero confinado se le denomina nivel piezométrico, y al lugar geométrico del nivel piezométrico de todos los puntos de un acuífero confinado se le denomina superficie piezométrica. Puesto que la presión del agua en todos los puntos de un acuífero confinado es mayor que la atmosférica, la superficie piezométrica estará siempre por encima del techo del acuífero y será, por lo tanto, una superficie virtual. (Martínez Alfaro, Martínez Santos , & Castaño Castaño , 2006)

c) Acuífero semiconfinado: Esto significa que la formación de contención permite que una cierta cantidad de agua salga del acuífero y viceversa. (Martínez Alfaro, Martínez Santos , & Castaño Castaño , 2006)

Figura 3. Distintos tipos de unidades acuíferas según su disposición.



Fuente: (Martínez Alfaro, Martínez Santos , & Castaño Castaño , 2006)

2.4.4. Aguas termales, minerales y termominerales y mineromedicinales.

a) Aguas Termales: Se producen en el interior de la Tierra, donde la temperatura es más alta (más de 20°C o agua 5 o 6°C más caliente que la temperatura ambiente en la zona donde se producen). (Vargas, 2010)

b) Aguas minerales: Son aquellas aguas cuya composición química presentan concentraciones altas ($\Sigma_{iones} > 1000 \text{ mg/L}$) de algunos iones como son Cl^- , Br^- , SO_4^{-2} , H^-CO_3 , Na^{++} , Ca^{++} , Li^+ , Ba^+ y Mg^+ , Fe^{++} entre otros. Cabe señalar que las aguas minerales pueden ser frías o calientes. (Vargas, 2010)

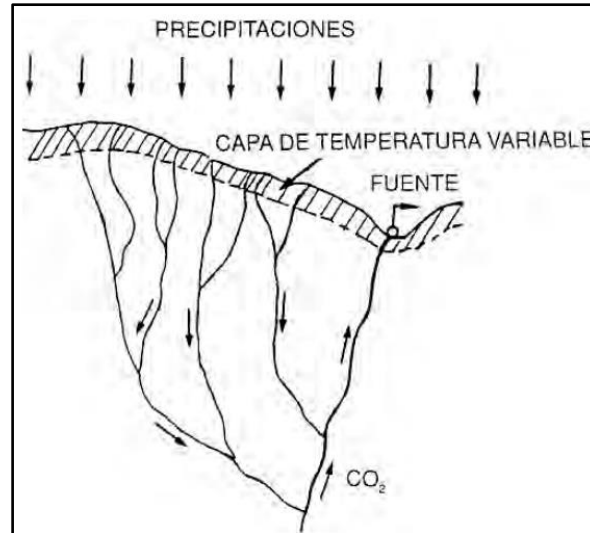
c) Aguas Termominerales: Es agua que cumple las dos características anteriores. (Vargas, 2010)

d) Aguas minero-medicinales: Son aquellas que por su composición química y física tienen propiedades terapéuticas. Entonces no todas las fuentes termales son fuentes minerales, y no todas las fuentes minerales (o termominerales) son necesariamente minero-medicinales, es decir tener propiedades y/o poderes curativos, a los que comúnmente la gente asocia. (Vargas, 2010)

2.4.5. Clasificación de aguas termales según su origen

a) Aguas termales de origen meteórico: El agua producida por la precipitación se infiltra bajo la influencia de la gravedad y cae a la capa profunda, donde su temperatura aumenta debido al gradiente geotérmico. Este parámetro se define como el cambio de temperatura con la profundidad. El gradiente geotérmico no es constante porque depende de las propiedades físicas del material en cada punto de la Tierra. Su valor medio es de 33°C por 1000 m. (Vargas, 2010)

Figura 4: Esquema del origen meteórico de las aguas termales.



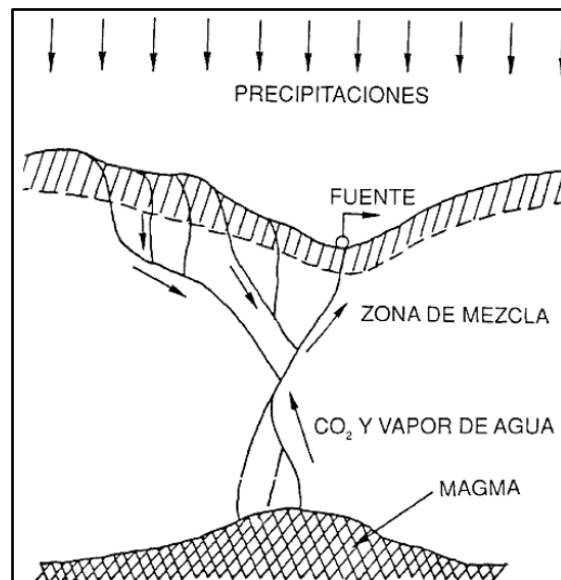
Fuente: (Pinagua, 2004)

b) Aguas termales de origen Juvenil: En este caso se tiene de dos tipos magmático y volcánico, en el primero las aguas proceden de la cristalización del magma, el cual libera constituyentes volátiles que escapan a la superficie, compuesto principalmente de hidrógeno y vapor de agua. En

el segundo, las aguas proceden de la consolidación de las lavas y el vapor de agua de origen volcánico (destilación de la humedad de las rocas, expulsión del vapor de agua de las capas profundas). (Vargas, 2010)

c) Aguas de origen Mixto: Aguas que proceden de la mezcla de aguas meteóricas y juveniles. (Vargas, 2010)

Figura 5. Esquema del origen mixto de las aguas termales.



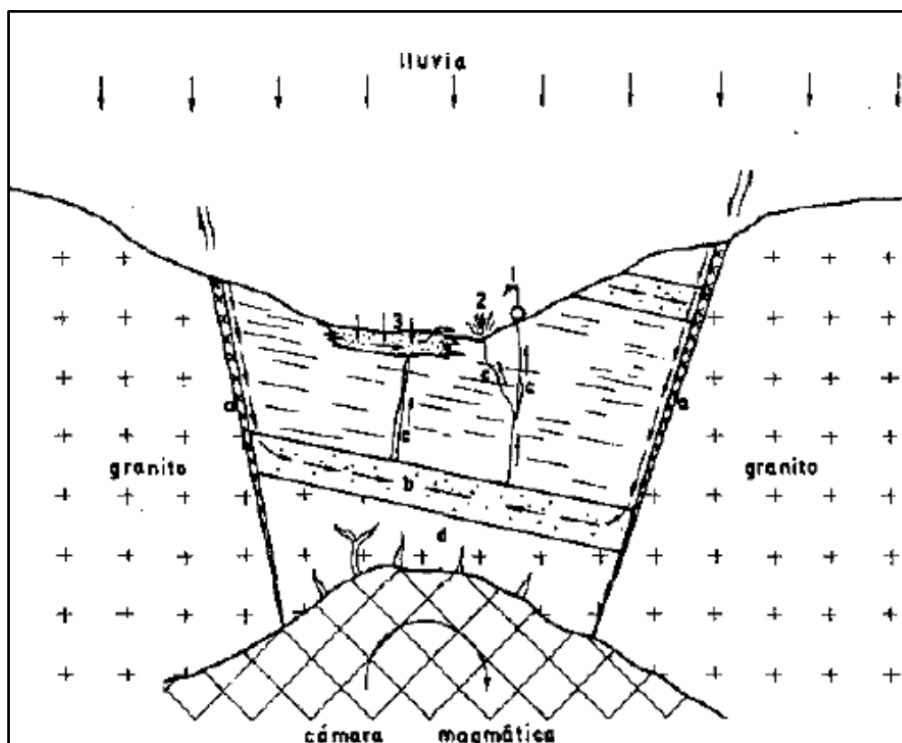
Fuente: (Pinagua, 2004)

2.4.6. Áreas geotérmicas

Estas son áreas de la corteza terrestre con gradientes geotérmicos más altos, lo que significa que la temperatura a mayor profundidad es mayor. Un grupo de materiales fluidos en movimiento, fracturas, puntos calientes, etc. que invaden una zona geotérmica forman un sistema geotérmico. Si un sistema geotérmico incluye agua en movimiento, también se le llama sistema hidrotermal y debe incluir la convección descendente de agua fría necesaria para mantener la cantidad de agua presente en el sistema. Las áreas con manantiales termales, fumarolas, etc., son la manifestación

externa de un sistema hidrotermal, aunque no siempre aparecen estas manifestaciones exteriores. (Custodio & Llamas, 1983)

Figura 6. Esquema de un sistema hidrotermal en una fosa tectónica



Fuente: (Custodio & Llamas, 1983)

En el estado de conocimientos actual, las áreas geotérmicas con frecuencia no coinciden con las grandes zonas de mayor flujo térmico terrestre, sino que constituyen manifestaciones marginales de menor extensión. (Custodio & Llamas, 1983)

2.4.7. Surgencia de las aguas termales

Las aguas termales están intrínsecamente ligadas al concepto de surgencia de aguas profundas. Esta situación muestra el importante papel de las grietas abiertas, que limitan el tipo de surgencia a estructuras muy específicas que permiten cambios menores que los del agua



subterránea normal. Entre los eventos geológicos que contribuyen a la circulación del agua podemos mencionar:

- ✓ Las diaclasas y fisuras finas.
- ✓ Las fallas y zonas de milonitización.
- ✓ Los contactos geológicos.
- ✓ Los filones y diques eruptivos.
- ✓ Los filones metalíferos.

Sin embargo, la presencia de grietas y hendiduras por sí sola no es suficiente para generar la cantidad de agua caliente. Estos incidentes deben tener apertura. De ahí el término grietas activas. (Pinagua, 2004)

Los estudios geológicos estructurales han demostrado que los accidentes geográficos que originalmente estaban abiertos y luego se expandieron y desarrollaron como resultado de la circulación de aguas subterráneas, aunque pueden estar llenos de depósitos minerales, también pueden reactivarse durante etapas tectónicas posteriores. Por tanto, las aguas termales se ubican principalmente en zonas de movimiento reciente o tectónica activa. (Pinagua, 2004)

Las juntas y grietas rara vez forman el origen de la circulación de las aguas termales, pero este no es el caso de las fallas y las zonas milonitizadas que acompañan a las fracturas, que son vías naturales para el agua de las aguas termales cuando se abren; y las aguas termales a menudo están localizadas en una gran fractura de zócalo. (Pinagua, 2004)

El contacto geológico entre el granito y la roca sedimentaria es también una vía preferida de circulación y salida de aguas termales. Además, los filones y los diques contribuyen al rápido surgimiento de fuentes termales. (Pinagua, 2004)



Los filones metalíferos generan la ocurrencia de aguas termales. En este sentido hay que resaltar que los filones se corresponden normalmente con las grandes fracturas del zócalo que continúan activas y juegan un doble papel: por un lado, hidráulico, favoreciendo la ascensión de las aguas profundas hacia la superficie, y por otro lado químico, favoreciendo el enriquecimiento en sales debido a la disolución de sus sustancias minerales. (Pinagua, 2004)

2.4.8. Mecanismos de Surgencia de las aguas termales

Los sistemas de aguas termales dan lugar al nacimiento de fuentes bajo la influencia de factores hidrogeológicos y físicos de los que unos, como el gradiente hidráulico son comunes a todo tipo de circulación subterránea, y otros, son particulares de las aguas termales profundas. (Pinagua, 2004)

Gradiente hidráulico: Es el factor más importante que afecta la circulación térmica y no térmica del agua subterránea. Su función está concebida como zona de suministro o recarga por encima de la zona de salida o acumulación. (Pinagua, 2004)

Expansión del vapor de agua: Este factor juega un papel decisivo en el funcionamiento de géiseres, fumarolas y la formación de fuentes hipertérmicas. Cuando el agua entra en contacto con la roca a alta temperatura se producen dos efectos físicos: la evaporación del agua y su fijación con oxígeno. (Pinagua, 2004)

Acción de los gases ocluidos y disueltos: Los gases absorbidos y disueltos tienen un doble efecto físico y dinámico, ya que por un lado reduce la gravedad específica del agua, por otro lado, la presión del gas emulsiona el agua y hace que suba. (Pinagua, 2004)

Acción de la temperatura: La temperatura actúa cambiando la gravedad específica del agua y su viscosidad, de modo que, si el gradiente de temperatura excede el límite del gradiente



adiabático, el líquido del acuífero se vuelve inestable y tiende a fluir hacia la superficie por convección térmica. A su vez, la diferencia de densidad entre el agua fría y el agua caliente provoca un típico fenómeno de termosifón, que aumenta con el caudal. (Pinagua, 2004)

2.4.9. Clasificación de las aguas termales

A) Según su temperatura

Las aguas termales se clasifican, por su temperatura, de la siguiente manera:

- Frías: menos de 20°C.
- Hipotermas: entre 20 y 35°C.
- Mesotermas: entre 35 y 45°C.
- Hipertermas: de más de 45 hasta 50°C.

B) Según su mineralización

Las clasificaciones más comunes aceptadas en el mundo son las basadas en la mineralización predominante y especial que pueda contener el agua. Todas consideradas mineralizaciones totales, mineralización predominante y mineralización especial, con propiedades principales atribuidas a gases, aniones o cationes que representan más del 20% de la masa iónica correspondiente (expresada en miliequivalentes). (Martínez Alfaro, Martínez Santos , & Castaño Castaño , 2006)

Siguiendo estas normas, que podemos considerar internacionales, podemos clasificar las aguas minerales como sigue:

Sulfatadas: Si el contenido mineral supera 1 (g/l), donde predomina el anión sulfato, sus propiedades terapéuticas están fuertemente influenciadas por otros iones como el sodio, magnesio, bicarbonato y cloruro. (Martínez Alfaro, Martínez Santos , & Castaño Castaño , 2006)



Cloruradas: Contiene más de 1 (g/l) de material mineralizado, generalmente con una proporción adecuada de sodio agregada a los iones cloruro. La composición de esta agua refleja el origen de capas profundas y la presencia de océanos anteriores. La presencia de fallas y grietas facilita su ascenso a la superficie. Se divide a su vez en: fuertes (más de 50 g/l), medias (de 10 a 50 g/l) y débiles (menos de 10 g/l). (Martínez Alfaro, Martínez Santos , & Castaño Castaño , 2006)

Bicarbonatadas: Contiene más de 1 (g/l) de minerales, en los que los iones bicarbonato van acompañados de calcio, magnesio, sodio, cloro, etc. Si estas aguas contienen una gran cantidad de ácido libre (CO_2 superior a 250 mg/l), también se les llama agua carbonatada o agua carbogaseosas. (Martínez Alfaro, Martínez Santos , & Castaño Castaño , 2006)

2.4.10. Aspectos físicos y químicos del agua

Muestreo del agua: El muestreo debe planificarse de forma que se asegure que las propiedades a analizar corresponden a las propiedades que tiene el agua "in situ". Para ello, primero hay que asegurarse de que la muestra recogida corresponda al agua del acuífero, no al agua almacenada en el pozo. Otro aspecto a considerar es el transporte de muestras desde el sitio de muestreo hasta el laboratorio. Esto requiere especial atención para que los cambios de temperatura y las pérdidas de gas no afecten los cambios de pH, el contenido de gas y la disolución y precipitación de ciertos gases. La botella debe ser previamente limpiada en el laboratorio con agua destilada y, si es necesario, agua acidificada para eliminar restos de sales en otras muestras, puede ser de vidrio oscuro o plástico (hay que tener en cuenta que el plástico es gaseoso). permeable y que las propiedades fisicoquímicas de la muestra pueden cambiar). Al llegar al punto de recogida se debe enjuagar con agua de muestra, llenar hasta el borde y cerrar con doble tapa. Debe trasladarse refrigerado, en nevera portátil, hasta el laboratorio. (Martínez Alfaro, Martínez Santos , & Castaño Castaño , 2006)



2.3.10.1. Constituyentes del agua:

Constituyentes Principales: Por lo general, siempre están presentes en las aguas subterráneas en concentraciones entre 1 y 1000 ppm. Se trata de sodio, calcio y magnesio en el grupo catiónico y cloruro, sulfato y bicarbonato en el grupo aniónico. La sílice también suele incluirse en este grupo, aunque no existe en forma iónica. (Martínez Alfaro, Martínez Santos , & Castaño Castaño , 2006)

Constituyentes Secundarios: Ocurren con menos frecuencia, en concentraciones entre 0,01 y 10 ppm. Entre los grupos catiónicos se encuentran el hierro, el estroncio y el potasio: carbonato, nitrato y flúor. (Martínez Alfaro, Martínez Santos , & Castaño Castaño , 2006)

Constituyentes Menores: Ocasionalmente se encuentran en aguas subterráneas, generalmente en concentraciones de 0,0001 a 0,1 ppm. Estos elementos son: antimonio, aluminio, arsénico, bario, bromo, cadmio, cromo, cobalto, cobre, germanio, yodo, plomo, litio, manganeso, molibdeno, níquel, fósforo, rubidio, selenio, titanio, uranio, vanadio y zinc. (Martínez Alfaro, Martínez Santos , & Castaño Castaño , 2006)

Constituyentes Traza: Rara vez se encuentran en aguas subterráneas en concentraciones inferiores a 0,001 ppm. Estos elementos son: Berilio, Bismuto, Cerio, Cesio, Estaño, Galio, Oro, Indio, Lantano, Niobio, Platino, Lantano, Rutenio, Escandio, Plata, Talio, Torio, Tungsteno, Yterbio, Ytrio, Zirconio. (Martínez Alfaro, Martínez Santos , & Castaño Castaño , 2006)

2.3.10.2. Características Físico-Químicas del Agua:

Temperatura: Medición del potencial hidrotermal. Su valor se expresa en °C. El agua subterránea en el mismo punto de agua subterránea generalmente no cambia significativamente. Su valor suele corresponder al aumento medio anual de la temperatura ambiente a lo largo del



gradiente geotérmico (aproximadamente 1°C por cada 30 m de profundidad del pozo). La medida se debe tomar directamente a la salida del pozo de la bomba para que no se mezcle con el agua del tanque (si lo hubiera). El termómetro debe permanecer en contacto con el agua hasta que su mercurio se estabilice. Los cambios de temperatura afectan la solubilidad de las sales y el contenido de gases disueltos. (Martínez Alfaro, Martínez Santos , & Castaño Castaño , 2006)

PH: Es una medida de la acidez del agua. Recíproco del logaritmo de la concentración de iones de hidrógeno. Se ve afectado por las pérdidas de CO_2 . Esto quiere decir que la presencia de CO_2 significa que tiene propiedades ácidas. Si el CO_2 desaparece, el equilibrio se desplaza hacia la izquierda, provocando un cambio en el pH. El pH no tiene dimensiones y 7 es el valor correspondiente al pH neutro. Un valor de pH inferior a 7 corresponde a un ambiente ácido, mientras que un valor de pH superior a 7 corresponde a un ambiente alcalino. El valor del pH del agua natural suele estar entre 6,5 y 8. (Martínez Alfaro, Martínez Santos , & Castaño Castaño , 2006)

Total de sustancias disueltas (TSD). Es el peso de todas las sustancias disueltas (sean volátiles o no) en un volumen determinado de agua. Generalmente se mide en ppm o g/l. Este parámetro puede verse afectado por cambios de pH y temperatura, que pueden provocar disolución o precipitación del producto. El TDS debe distinguirse del residuo seco (RS), que es el peso del material que queda después de que se haya evaporado un litro de agua (los volátiles han desaparecido). Si el agua se evapora entre 105°C y 110°C , es posible que quede algo de material orgánico y algo de agua mineral hidratada en el RS. A una temperatura de 180°C estas sustancias desaparecen por completo. Según RS las aguas se dividen en:

- **Agua Dulce:** RS menor de 3000 ppm.
- **Agua Salobre:** RS entre 3000 y 10000 ppm.

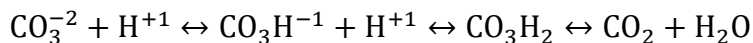


- **Agua Salada:** RS entre 10000 y 40000 ppm.
- **Salmuera:** RS mayor de 40000 ppm.

Conductividad Eléctrica: Es la capacidad del agua para conducir electricidad. Depende de la cantidad de iones combustibles, su carga y movilidad. Se mide en microsiemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$) o micromohs/cm a 25°C ($1 \mu\text{S}/\text{cm} = 1 \text{ microhs}/\text{cm}$). Los cambios de pH y temperatura afectan la solubilidad de las sales, lo que a su vez afecta la conductividad. (Martínez Alfaro, Martínez Santos , & Castaño Castaño , 2006)

- **Agua muy pura o desionizada:** Menos de $1\mu\text{S}/\text{cm}$. Este tipo de agua tiene una conductividad extremadamente baja, ya que carece de iones.
- **Agua ultrapura:** $1\text{-}10 \mu\text{S}/\text{cm}$. Ideal para laboratorios y aplicaciones especiales.
- **Agua destilada:** $10\text{-}50 \mu\text{S}/\text{cm}$. Adecuada para uso de laboratorios y equipos sensibles.
- **Agua potable:** $50\text{-}500 \mu\text{S}/\text{cm}$. Cumple con los estándares para consumo humano.
- **Agua subterránea:** $100\text{-}1000 \mu\text{S}/\text{cm}$. Puede variar según la geología y la profundidad.
- **Agua de río o lago:** $100\text{-}5000 \mu\text{S}/\text{cm}$. Dependiendo de factores como la ubicación, el clima y la contaminación.
- **Agua Salobre o estuarina:** $1000\text{-}50000 \mu\text{S}/\text{cm}$. Se encuentra en zonas de mezcla de agua dulce y salada.
- **Agua de mar:** $30000\text{-}60000 \mu\text{S}/\text{cm}$. Característica de aguas oceánicas.

Alcalinidad: (Martínez Alfaro, Martínez Santos , & Castaño Castaño , 2006) Es la capacidad del agua para neutralizar ácidos, es decir. capacidad de eliminar iones H^{+1} en disolución. En las aguas subterráneas, los iones de hidrógeno son consumidos principalmente por carbonatos y bicarbonatos de la siguiente manera:



Potencial Redox (Eh): Es un indicador de la tendencia a la oxidación ($\text{Eh} > 0$) o a la reducción ($\text{Eh} < 0$) de sustancias disueltas en el agua subterránea. La oxidación implica la pérdida de electrones y, por tanto, un aumento de valencia. Por otro lado, la reducción implica la ganancia de electrones y la pérdida de estados de valencia. Dado que el número de electrones en una solución dada es constante, la oxidación de un elemento significa la reducción de otro elemento y viceversa. El movimiento de los electrones crea una corriente eléctrica, que se mide en voltios o milivoltios. (Martínez Alfaro, Martínez Santos , & Castaño Castaño , 2006)

Dureza: Es la capacidad del agua para absorber jabón (sodio o agua blanda) o producir cal (calcio o agua dura). La dureza es la suma de meq de Ca^{+2} y Mg^{+2} en solución expresada en ppm CO_3Ca . (Martínez Alfaro, Martínez Santos , & Castaño Castaño , 2006)

- **Aguas Blandas:** Se consideran a las de dureza inferior a 50 ppm de CO_3Ca .
- **Aguas duras:** Las que tienen hasta 200 ppm de CO_3Ca .
- **Aguas muy duras:** Las que presentan mayor a 200 ppm de CO_3Ca . (Martínez Alfaro, Martínez Santos , & Castaño Castaño , 2006)

2.3.10.3. Utilidad y manejo de los resultados de los análisis físico-químicos.

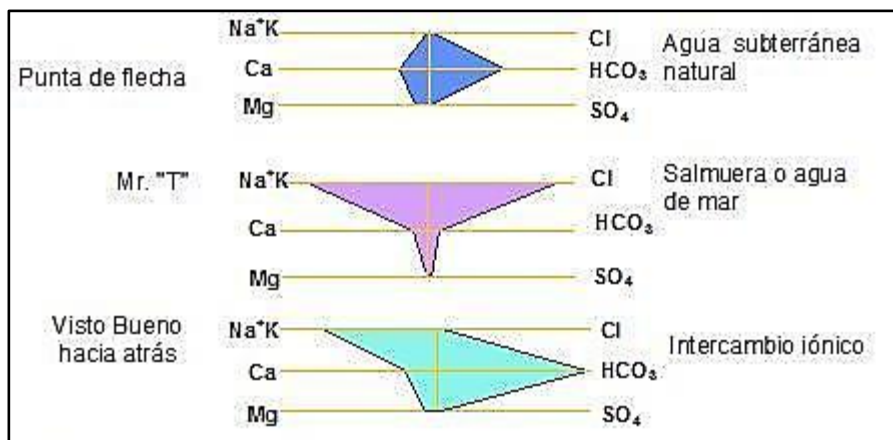
Los datos correspondientes aun solo análisis pueden representarse en gráficos de columnas, tipo tarta, radiales y poligonales, Estas representaciones permiten observar la distribución de aniones y cationes. (Martínez Alfaro, Martínez Santos , & Castaño Castaño , 2006)

Diagrama de polígonos o de Stiff: (Stiff, 1951) constan de una serie de rectas paralelas equidistantes entre sí cortadas por un a perpendicular a ellas. Esta línea vertical forma el punto inicial de medición de los rayos divididos por líneas paralelas. Los aniones (uno por media línea



en meq/L) se muestran a la derecha de la línea vertical, al igual que la media línea a la izquierda de la línea vertical muestra los cationes. Generalmente suelen representarse Cl^{-1} , SO_4^{-2} , CO_3H^{-1} , NO_3^{-1} en la zona de los aniones, y Na^{+1} , K^{+1} , Ca^{+2} y Mg^{+2} en la de los cationes. Para cada uno, la longitud del haz es proporcional a la concentración (meq/L) de cada elemento. La conexión de los extremos de estos segmentos de línea define un polígono cuya superficie es proporcional a la salinidad del agua. Su forma viene dada por la longitud del fragmento correspondiente a la concentración de iones disueltos, lo que desde el punto de vista químico indica el tipo de agua (clorada, sulfatada, etc., sodio, potasio, etc.). Los mapas de rigidez a veces se modifican para acomodar elementos en el agua. Por ejemplo, puede prescindirse de las semirrectas correspondientes en el agua. Por ejemplo, puede prescindirse de las semirrectas correspondientes al K^{+1} y a los NO_3^{-1} si estos elementos no son importantes. En el diagrama original se considera CO_3^{-2} en lugar de NO_3^{-} y Fe^{+2} en lugar K^{+1} . (Martínez Alfaro, Martínez Santos , & Castaño Castaño , 2006)

Figura 7. Diagrama de Stiff



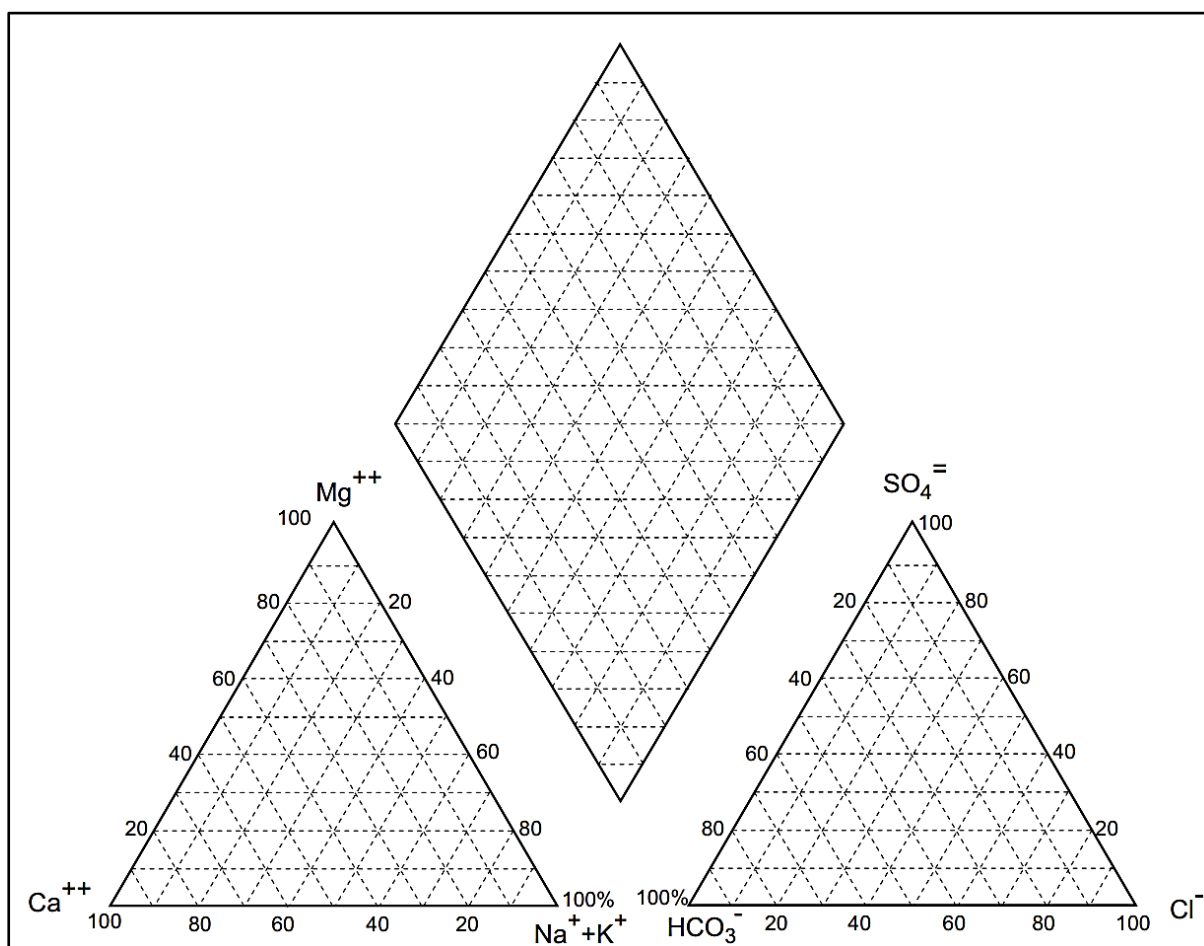
Fuente: (Martínez Alfaro, Martínez Santos , & Castaño Castaño , 2006)

Diagramas Triangulares: (Piper, 1944), cada uno de los vértices de un triángulo equilátero representa el 100% de la concentración en meq/L de un determinado elemento y el 0%



del elemento situado en el vértice siguiente según el sentido de las agujas del reloj. El valor % de la concentración de cada elemento se expresa trazando una línea paralela al borde opuesto al vértice correspondiente al 100 % del elemento considerado desde un punto del borde del triángulo que representa el % a expresar. Por uno sólo se pueden representar tres iones (tres aniones o tres cationes). análisis, pero se pueden mostrar muchos análisis en el mismo gráfico. (Martínez Alfaro, Martínez Santos , & Castaño Castaño , 2006)

Figura 8. Diagrama de Piper.

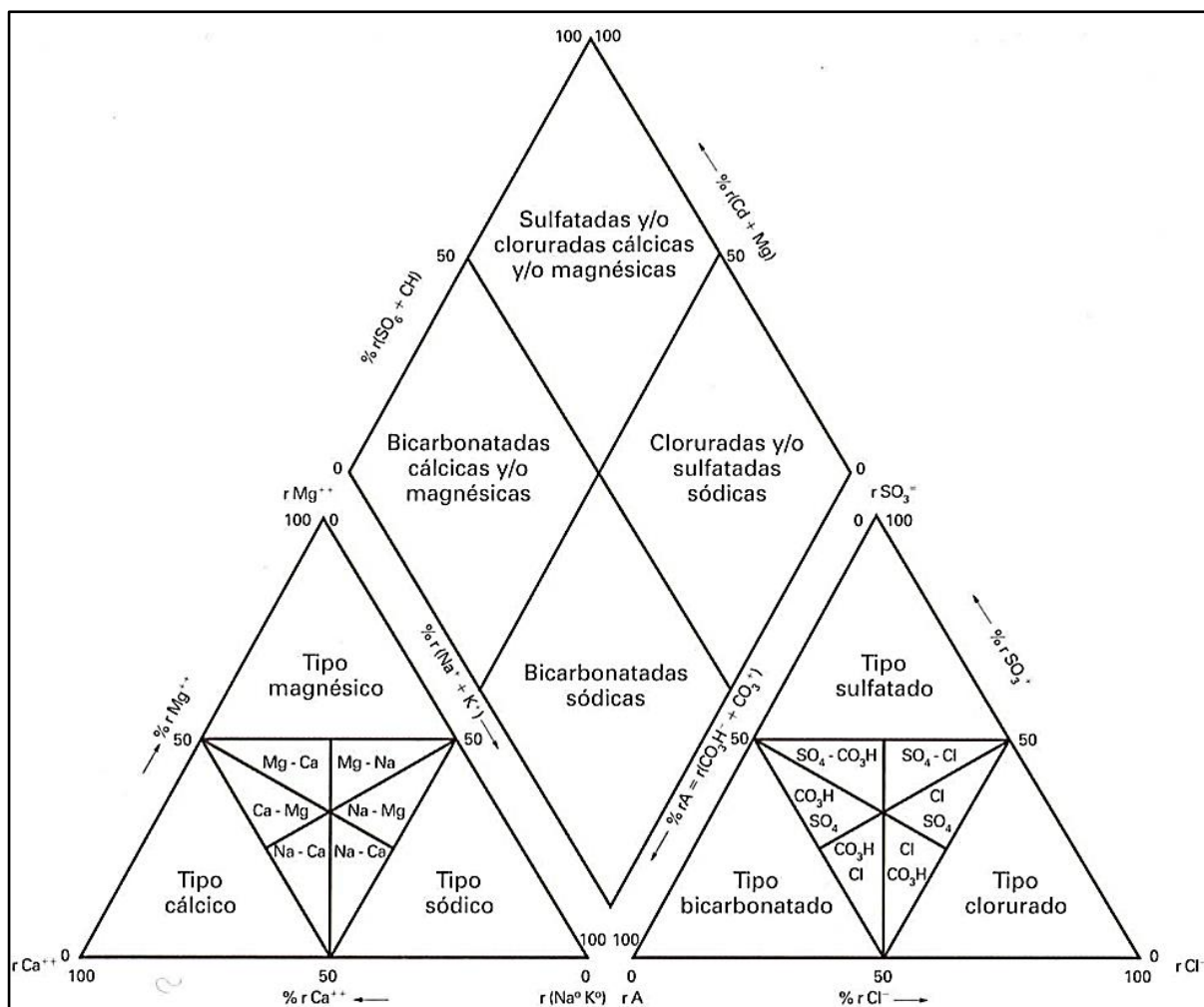


Fuente: (Martínez Alfaro, Martínez Santos , & Castaño Castaño , 2006)

Es posible utilizar un diagrama triangular para representar aniones y otro distinto para representar los cationes. Ambos están relaciones con un diagrama central en forma de rombo en el que queda definido en tercer punto que representa a aniones y cationes del mismo análisis. (Martínez Alfaro, Martínez Santos , & Castaño Castaño , 2006)

En este tipo de diagramas los puntos que quedan agrupados definen familias de aguas de características químicas semejantes en cuanto al contenido iónico. (Martínez Alfaro, Martínez Santos , & Castaño Castaño , 2006)

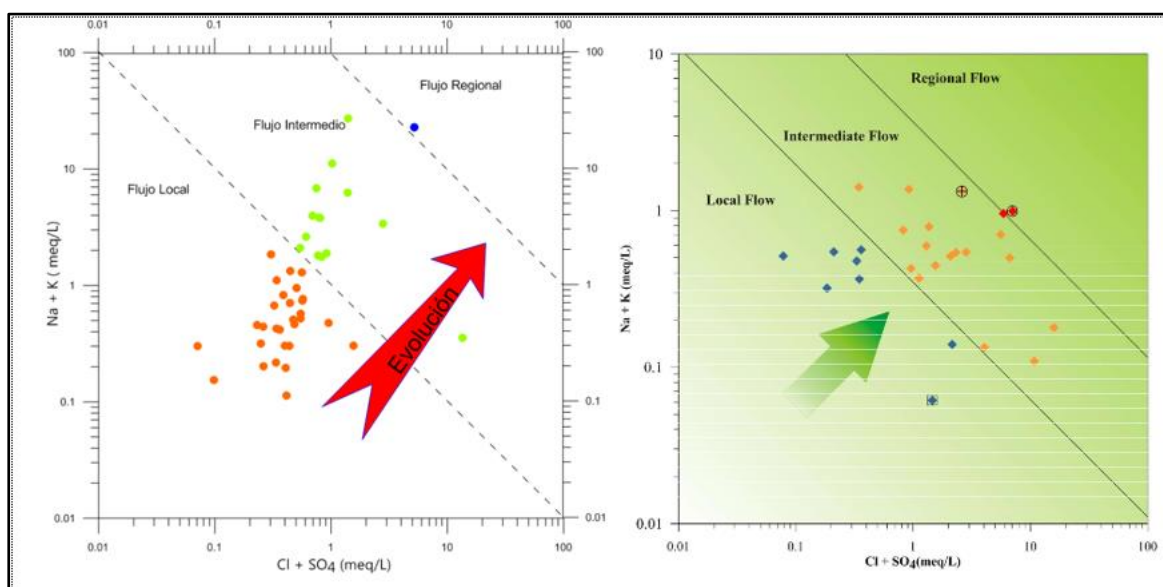
Figura 9: Diagrama de Piper para clasificación química de las aguas.



Fuente: (Martínez Alfaro, Martínez Santos , & Castaño Castaño , 2006)

Diagrama de Piper-Scater: Este diagrama denominado también como diagrama de Mifflin proporciona información sobre la evolución del agua subterránea en base a la creciente concentración de los iones Na^+ , K^+ , Cl^- y SO_4^{2-} a lo largo del flujo. El gráfico se subdivide en 3 secciones, determinando puntos de flujo local, intermedio y regional, siendo este último el más evolucionado y ligado a zonas de descarga. El diagrama se construye sumando de manera independiente cationes ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) aniones ($\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$) en meq/L, en escala logarítmica. (Martínez Alfaro, Martínez Santos , & Castaño Castaño , 2006)

Figura 10. Diagrama Piper-Scater, se muestra los flujos de acuíferos.



Fuente: (Martínez Alfaro, Martínez Santos , & Castaño Castaño , 2006)

2.5.GEOTERMÓMETROS

Son funciones relativamente sencillas donde mediante la relación de concentraciones químicas de distintos elementos minerales se puede estimar la temperatura de foco del sistema geotérmica en el que se formaron. (Aymerich Urzaiz, 2013)



La mayoría de los geotermómetros, incluyendo los más distintivos en el caso estudiado como son los que tienen en cuenta las concentraciones del Sodio (Na) y el Potasio (K) o los que tienen en cuenta el Sodio y el Litio (Li), fueron hallados de forma puramente empírica. Los primeros especialistas geotérmicos observaron un decrecimiento general de la relación de concentración entre el Sodio y el Potasio a medida que aumenta la temperatura, así como un incremento de la concentración de Sílice (SiO_2) en aguas termales a considerable temperatura. (Aymerich Urzaiz, 2013)

Para determinar la temperatura de foco del sistema geotérmico a la cual se formó en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$) se utilizarán las siguientes ecuaciones según el método a utilizar:

- Geotermómetro de Sodio y Potasio (Na-K) elaborado por Truesdell en 1976.

$$T(\text{Na} - \text{K}) = \left(\frac{855.6}{\log\left(\frac{\text{Na}}{\text{K}}\right) + 0.8573} \right) - 273.159$$

- Geotermómetro de Sodio, Potasio y Calcio (Na-K-Ca) diseñado por Truesdell y Fournier en 1976.

$$T(\text{Na} - \text{K} - \text{Ca}) = \left(\frac{1647}{\log\left(\frac{\text{Na}}{\text{K}}\right) + \frac{1}{3} \left(\log\left(\sqrt{\frac{\text{Ca}}{\text{Na}}}\right) + 2.06 \right) + 2.47} \right) - 273.159$$

- Geotermómetro de Potasio y Magnesio (K-Mg) de Giggenbach en 1983.

$$T(\text{K} - \text{Mg}) = \left(\frac{4410}{\log\left(\frac{\text{K}^2}{\text{Mg}}\right) + 13.95} \right) - 273.159$$

Fuente: (Aymerich Urzaiz, 2013)



2.6.MÉTODOS DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

Dentro de la diversidad de técnicas prospectivas destacan cuatros grupos principales; el gravimétrico, magnético, eléctrico y sísmico. Los dos primeros son de campo natural y los restantes de campo artificial (con excepción de algunas modalidades). Es decir, que en métodos gravimétrico y magnético se estudian las perturbaciones de determinadas es estructuras o cuerpos producen sobre campos preexistentes, que son el de gravedad y geomagnético, mientras que en el eléctrico y el sísmico es el propio prospector quien crea el campo físico que va a estar estudiar, lo que presenta la ventaja de que puede darle las características más adecuadas para el fin propuesto. Esto no quiere decir que puedan establecerse relaciones de superioridad entre unos y otros, pues la eficacia depende de cuál sea el problema propuesto. (Hernández, 2012)

2.5.1. Tomografía eléctrica

(Hernández, 2012) indica que la tomografía eléctrica se clasifica como un método geofísico de resistividad que emplea el uso de múltiples electrodos, se fundamenta en el modelamiento 2-D de la resistividad que ofrece en subsuelo utilizando herramientas numéricas “elementos finitos o diferencias finitas”.

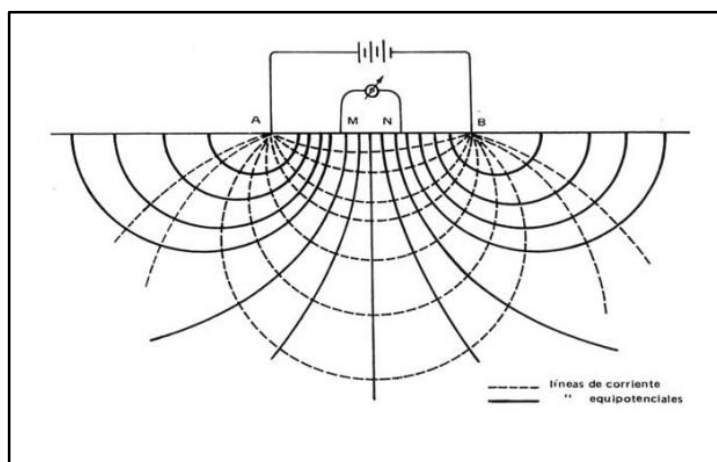
Según (Hernández, 2012), concluye que este método tiene como objetivo generar una sección bidimensional de resistividades reales del subsuelo, de la cual se puede determinar si existe posibles filtraciones de agua subterráneas. La presencia de agua subterránea se evidencia en una disminución anómala de la resistividad.

Esquema básico del funcionamiento del método

Aunque la tomografía eléctrica es una técnica en la cual se emplea múltiples electrodos, su fundamento teórico es similar a los métodos tradicionales de resistividad del terreno.



Figura 11: Esquema básico de los métodos de resistividad.

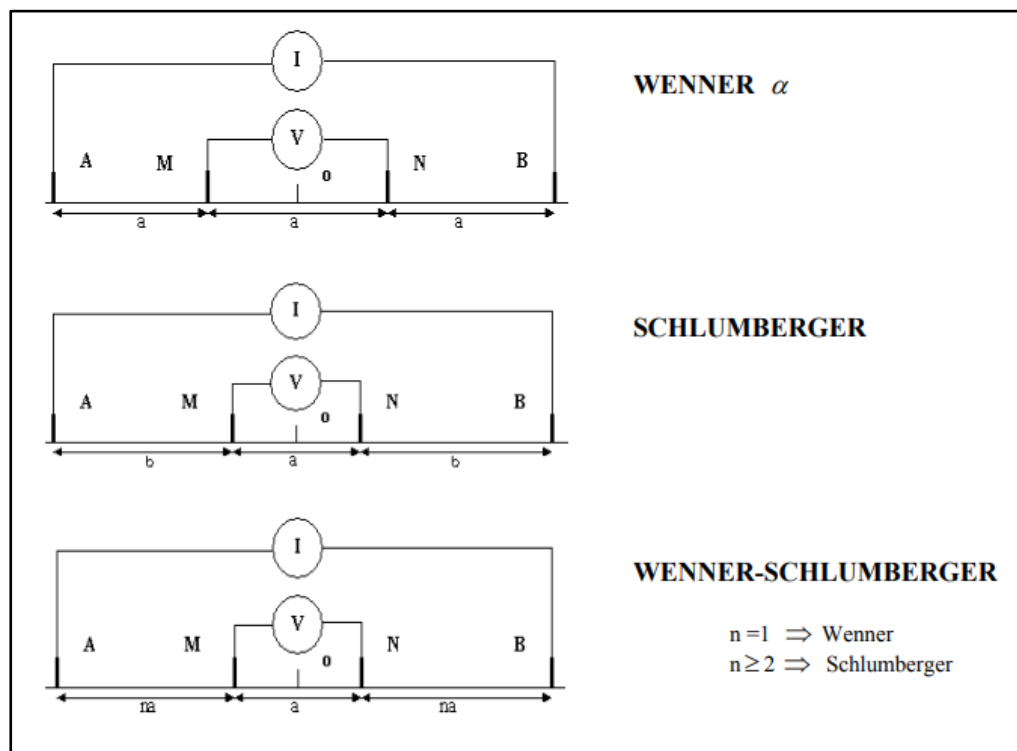


Fuente: (Hernández, 2012)

Los métodos convencionales solo precisan electrodos y se basan en introducir en el terreno, un campo eléctrico de corriente continua mediante dos electrodos de corriente (A,B) conectados a un miliamperímetro, mientras que con los otros dos electrodos (M,N) y que están conectados a un milivoltímetro, mediremos cual es la diferencia de potencial eléctrica ΔV entre esos dos puntos, parámetro a partir del cual podremos calcular el valor de la resistividad en el punto medio del dispositivo y a una profundidad determinada. (Hernández, 2012)

“La configuración de los electrodos varía, sin embargo, la más comunes la configuración Wenner (en su variante α) y la configuración Schlumberger. Además, con frecuencia es utilizado la configuración Wenner-Schlumberger, especialmente en tomografía eléctrica” (Ontiveros, 2003)

Figura 12: Esquema de los dispositivos electródicos más habituales en los métodos de resistividad.



Fuente: (Ontiveros, 2003)

2.6. CUENCAS HIDROGRÁFICA

“Una cuenca es un área del terreno, en la cual (si fuera totalmente impermeable el terreno) las precipitaciones serían drenadas y conducidas hacia un único punto de descarga” (Mijares, 1992)

“Lo definido anteriormente describe una cuenca superficial, en embargo, cada cuenca está vinculada a una cuenca subterránea, que la superficie (vista planta) se proyecta de igual manera, por ello, se especifica que la definición aplica bajo la suposición de una superficie impermeable” (Mijares, 1992).

2.7.SISTEMA DE CODIFICACIÓN PFAFSTETTER

“Es un método que asigna identificadores a las unidades de drenaje de acuerdo a la topología del terreno, es decir, se le puede asignar códigos a una cuenca para que se puede establecer su



relación con las cuencas vecinas, internar o locales” (ANA, Delimitación y codificación de unidades hidrográficas del Perú, 2012)

Proceso de codificación

El ANA (2012) en su publicación sobre “Delimitación y Codificación de unidades hidrográficas” afirma lo siguiente:

El método consiste en dividir una cuenca hidrográfica, independientemente de su tamaño, en la cual tenemos que identificar y delimitar los cuatro afluentes mayores del río principal de acuerdo al área de la unidad hidrográfica respectiva. Las cuencas generadas por estos afluentes se enumeran con los dígitos pares “2, 4, 6 y 8” desde aguas abajo a aguas arriba. Los demás afluentes se agrupan en áreas restantes llamadas “intercuencas”, las cuales se codifican con los dígitos impares “1, 3, 5, 7 y 9”, siguiendo el mismo sentido.

Cada cuenca e Intercuenca generada en la primera subdivisión puede tener nuevamente otra subdivisión siguiendo el mismo criterio. Por ejemplo, la subdivisión de la cuenca “6” genera, dentro de ella, las cuencas con código “61, 63, 65, 67 y 69”. De igual manera, las intercuencas derivadas de la primera subdivisión, por ejemplo, la Intercuenca “5”, se subdividen en cuencas con códigos “52, 54, 56 y 58”, así como las intercuencas “51, 53, 55, 57 y 58”.

BR. VANESSA VALVERDE GOYZUETA - BR. GUTIERREZ PERALTA KATHERINE



Decreto Ley N° 25533

“El otorgamiento de licencia para el uso de fuentes de agua Minero-Medicinales y el control de su explotación con fines turísticos es de su competencia MICTI (hoy MINCETUR)” (Vargas, 2010)

“Las fuentes termales también como recursos geotermales, ya que es una manifestación del calor interno de la tierra. La exploración y el uso de estos recursos están regulados por el marco legal establecido por Ministerio de Energía y Minas” (Vargas, 2010)

Ley N° 26848

“Ley Orgánica de Recursos Geotérmicos”

Decreto Supremo N° 019-2010-EM

“Reglamento de la Ley Orgánica de Recursos Geotérmicos”

Esto evidencia una falta en la coherencia respecto a las responsabilidades legales directas sobre el uso de las fuentes termales. El MINCETUR se limita a sólo en el tema balneológicos, turísticos y medicinales, sin promover estudios que fomenten la generación de conocimientos que garanticen el uso sostenible del recurso, mientras que el MINEM sólo se enfoca exclusivamente en la generación de energía eléctrica, las cuales son exclusivos de fuentes geotérmicas de alta entalpia (Vargas, 2010).

2.9.GEOMORFOLOGÍA REGIONAL

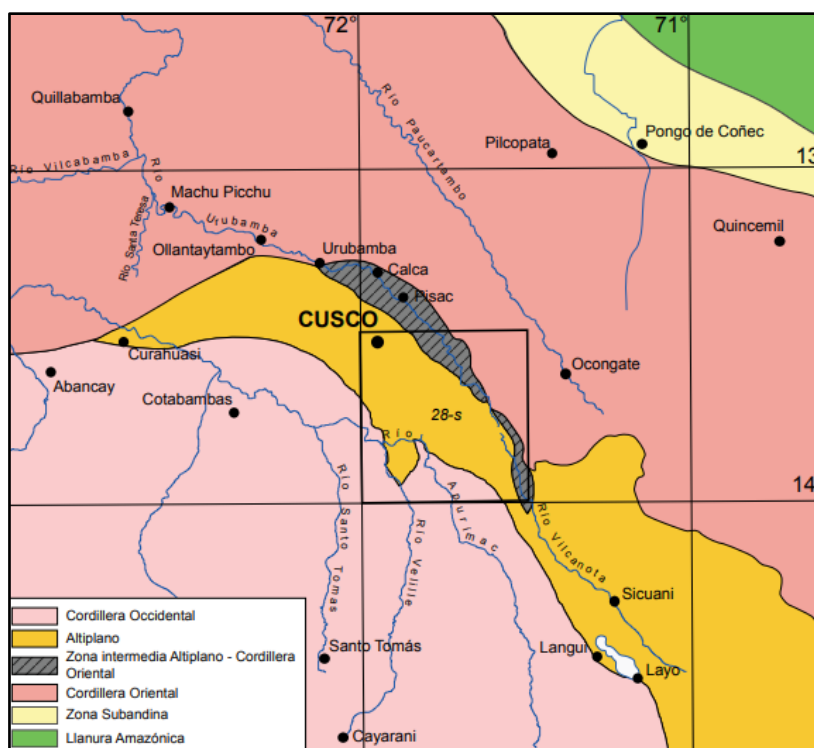
El río Vilcanota, también conocido como Urubamba, cruza la Cordillera Oriental en el sur del Perú (Cordillera Vilcabamba) dando origen al cañón de Urubamba. Las vertientes suroeste y noreste del valle son bastantes empinadas y tienen cumbres importantes, entre las que resaltan los



nevados Salcantay (6264m.s.n.m.) y Huatanay (5459 m.s.n.m.) al sureste, y los nevados Verónica (5750 m.s.n.m.) y Bonanta (5024 m.s.n.m.) al noreste. A los pies de los nevados están los glaciares y valles glaciares en U, morrenas, y evidencias de la existencia de glaciares antiguos. La zona de aguas calientes se ubica al sureste del río Urubamba, que se caracteriza por ser muy accidentada, debido principalmente a las laderas con pendientes empinadas y los grandes desniveles que originó el río, sobre el macizo de rocas intrusivas del batolito de Machupicchu. (Carlotto, Cárdenas, & Fidel, 2009)

1.15.1. Cordillera Oriental: Esta cordillera es un área morfo-estructural bien definida, que abarca casi por completo los cuadrángulos de Quillabamba y Machupicchu. Esta unidad ha sido dividida en: Cordillera de Vilcabamba, Vertiente Norte, Valles Transversales, Valles Intracordilleranos, Montañas de Mesapelada, borde sur de la Cordillera Oriental y borde norte de las Altiplanicies. (Carlotto, Cárdenas, Romero, Valdivia, & Tintaya, 1999).

Figura 14: Unidades geomorfológicas regionales.



Fuente: (Carlotto Caillaux , Cárdenas Roque, & Carlier, 2011)

1.15.2. Cordillera del Vilcabamba: Se caracteriza por presentar terrenos elevados y accidentados, formando nevados que sobrepasan los 5000 m.s.n.m., resaltando el nevado de Salcantay con 6264 m.s.n.m. Litológicamente, aquí se encuentran las rocas más antiguas y con mayor deformación de toda la región. Estructuralmente destacan fallas con orientación E-O y el anticlinal de Yamana en la misma dirección. Dentro de las principales geoformas en esta unidad incluyen morrenas, circos y valles glaciares, los valles glaciares en U tiene flujo constantemente durante todo el año provenientes de los nevados Acobamba, Sacsara y Santa Teresa principalmente. (Carlotto, Cárdenas, Romero, Valdivia, & Tintaya, 1999)

En la cordillera de Vilcabamba hemos distinguido dos cadenas de nevados:



Cadena de nevados Salcantay-Corihuayrachina: Se ubica al sureste de la cordillera Vilcabamba y está conformada por los nevados: Salcantay (6264 m.s.n.m.), Corihuayrachina (5404 m.s.n.m.), Paljay (5422 m.s.n.m.), (Tucarhuay) Tocarohuay (5910 m.s.n.m.), Amparay (5418 m.s.n.m.), Huamantay (5473 m.s.n.m.), Chaupiloma (5339 m.s.n.m.) y Padreyoc (5771 m.s.n.m.). (Carlotto, Cárdenas, Romero, Valdivia, & Tintaya, 1999)

“En esta cadena de orientación E-O, se encuentra mayormente sobre rocas metamórficas del Paleozoico inferior, excepto el nevado Salcantay que se halla sobre intrusivos permo-triásicos”. (Carlotto, Cárdenas, Romero, Valdivia, & Tintaya, 1999)

Cadena de nevados Sacsarayoc-Pumasillo: Esta cadena de dirección E-O, se localiza en la parte central de la Cordillera de Vilcabamba, está formada por los nevados: Sacsarayoc (5994 m.s.n.m.), Pumasillo (5104 m.s.n.m.) y Choquetacarpo (5512 m.s.n.m.), con una cobertura de glaciar de aproximadamente 25km. Las rocas que componen esta cadena son principalmente intrusivas del batolito de Pumasillo. (Carlotto, Cárdenas, Romero, Valdivia, & Tintaya, 1999)

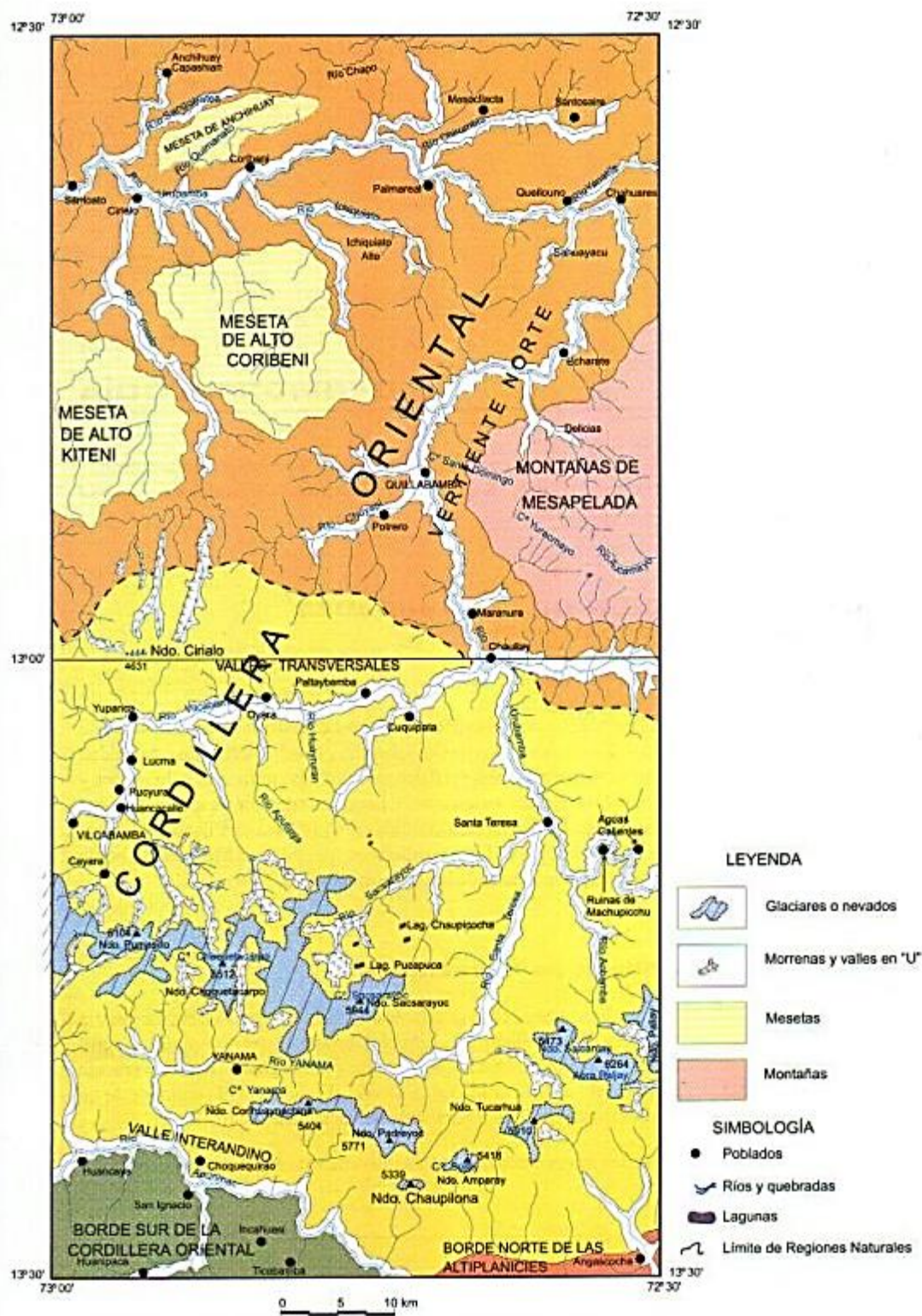
Valles Intracordilleranos: “Se denominan valles Intracordilleranos a aquellos que cruzan la Cordillera Oriental, extendiéndose tanto en la vertiente norte como la vertiente sur” (Carlotto, Cárdenas, Romero, Valdivia, & Tintaya, 1999)

Valle del río Apurímac: Es el principal valle interandino, atraviesa el suroeste del cuadrángulo de Machupicchu con una dirección general SE a NO con aproximadamente 40 km de longitud en esta zona. El río se encuentra entre los 1900 a 1400 m.s.n.m., a lo largo de su recorrido, el río permanece encajonado, desarrollando un valle muy profundo con ladera empinadas, sin terrazas. No obstante, evolutivamente, este valle en la zona del cuadrángulo es clasificado como maduro. (Carlotto, Cárdenas, Romero, Valdivia, & Tintaya, 1999)



Valle del río Urubamba: Reconocido como el más amplio y con una significativa extensión en la vertiente norte de la Cordillera Oriental. En el cuadrángulo de Machupicchu atraviesa la parte noroccidental entre los 2200 m.s.n.m. y 1200 m.s.n.m., es una longitud aproximada de 45 km. En general, el tramo del río se puede dividir en dos segmentos: el primero con dirección aproximada E-O comprendido entre Cedrobamba y la quebrada de Aobamba, denominado Cañón del Urubamba, que presenta paredes empinadas y abruptas cortando el macizo de Machupicchu; en tanto que el segundo va con dirección SSE-NNO comprendido entre Aobamba Y Chaullay sobre rocas intrusivas y del Paleozoico inferior. (Carlotto, Cárdenas, Romero, Valdivia, & Tintaya, 1999)

Figura 15: Mapa Geomorfológico de los cuadrángulos de Quillabamba (26-q) y Machupicchu (27-q).



Fuente: (Carlotto, Cárdenas, Romero, Valdivia, & Tintaya, 1999)

2.10. GEOLOGIA REGIONAL

“Se han identificado unidades estratigráficas que van del Paleozoico inferior al cuaternario. La mayor parte de las unidades poseen columnas estratigráficas, lo que ha permitido establecer la columna estratigráfica regional”. (Carlotto, Cárdenas, & Fidel, 2009).

2.10.1. *Formación Ollantaytambo.*

Son una serie de rocas metamórficas pertenecientes al Cámbrico por su composición estratigráfica, al que denomina Serie Ollantaytambo. En el Cuadrángulo de Urubamba, esta unidad aflora al pie de las ruinas incas de Ollantaytambo y se extiende al norte hasta cerca del Abra de Málaga. Lateralmente sigue al este, hasta proximidades del valle del río Patacancha, al oeste hasta el nevado Bonanta. El límite inferior aparece cabalgando sobre la Formación San José (Arenigiano – Llanvirniano) que se observa en Sisllajasa y quebrada de Silque. (Ramos Cabrera & Minaya Encarnación, 2021)

Figura 16. Vista de la formación Ollantaytambo, detalle de las cuarcitas gris verdosas.



Fuente: (Ramos Cabrera & Minaya Encarnación, 2021)

2.10.2. Formación Málaga

Unidad reconocida y definida en el abra Málaga por Sanchez, A. y Zapata, A. (2003). Esta unidad ha sido reconocida cerca de las localidades de Quillabamba, Pavayoc y en las inmediaciones de Madreselva; se observan formando pliegues (anticlinales y sinclinales). En la localidad de Madreselva se compone de pizarras gris a gris azulinas con micas, hacia el techo se intercalan con areniscas cuarzosas de tonalidad gris clara de grano fino, presentan sulfuros diseminados. Las areniscas cuarzosas se presentan en estratos de 10 cm a 15 cm de espesor y en ellas se observan estructuras tipo flaser. En las localidades de Quillabamba y Pavayoc esta unidad se compone de areniscas cuarzosas blanquecinas y gris claras de grano fino a medio, moderadamente seleccionadas; presentan laminación ondulada, intercalada con niveles delgados de pizarras gris azulinas que ocasionalmente muestran micas. (Ramos Cabrera & Minaya Encarnación, 2021)

Figura 17. Vista de las pizarras de la Formación Málaga.

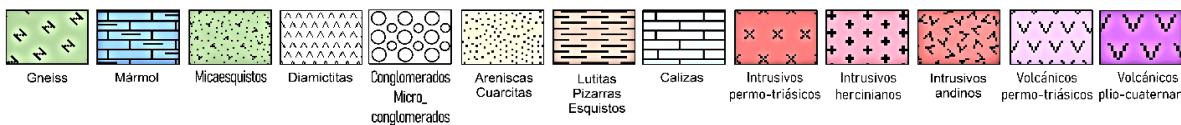


Fuente: (Ramos Cabrera & Minaya Encarnación, 2021)



Figura 18. Columna Estratigráfica regional de los Cuadrángulos de Quillabamba (26-q) y Machupicchu (27-q).

ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRAFICAS	GROSOR Aprox. en (m.)	LITOLOGÍA	DESCRIPCIÓN	MAGMATISMO	
							VULCANISMO	PLUTONISMO
CENOZOICA	Cuaternario		Depósitos fluvio-aluviales y deslizamientos			Gravas, arenas y limos		
			Depósitos morrénicos			Bloques, gravas, en matriz areno - arcillosa.		
	Paleógeno	Eliocena Eocena	Formación Collpaccasa	> 700		Conglomerados en la base, areniscas cuarzosas feldespáticas pardas intercaladas con limolitas de color rojo		
		Paleocena	Formación Quilque-Chilca	± 170		Lutitas de color rojo ladrillo, areniscas feldespáticas y escasos niveles de conglomerados.		
MESOZOICA	Cretáceo	Superior	Grupo Yuncaypata	> 100		Intercalación de areniscas con lutitas verdes, rojas y negras, yesos y calizas.		
		Inferior	Formación Huancané	< 100		Areniscas cuarzosas de color blanco, rosado con laminaciones oblicua curva, conglomerados y delgados niveles de lutitas rojas		
	Jurásico		Formación Huambutio	± 300		Conglomerados, microconglomerados y areniscas feldespáticas de color rojo		
	Triásico		Grupos Mito	< 1200		Volcánicos, bancos de conglomerados, intercalados con areniscas cuarzosas pardas, limolitas rojas, a veces algunas capas lenticulares de calizas		
PALEOZOICA	Permiano	Sup.	Grupos Tarma - Copacabana	< 1000		Calizas bien estratificadas con fósiles y localmente brechas calcáreas.		
		Inferior				Areniscas en delgados bancos intercalados con lutitas negras		
	Pensilvaniano		Grupo Ambo	> 300		Conglomerados con clastos de cuarcitas, esquistos, cuarzo, etc. Cuarcitas, areniscas y pizarras negras		
	Devoniano					Pizarras, esquistos grises y negros intercalados con niveles delgados de cuarcitas grises y blancas sin estratificación visible, calizas en la base.		
		Siluriano	Formación Quillabamba	± 1000		Intercalación de pizarras, diamictitas cuarcitas y microconglomerados al techo.		
	Ordoviciano	Superior	Formación San Gabán	500		Pizarras con nódulos calcáreos, areniscas cuarcíticas blancas y grises, localmente negras.		
			Formación Sandía	± 1000		Pizarras, esquistos verdes, grises a negros con pirita, cuarcita y lutitas bandeadas; exudación de azufre.		
		Medio	Grupo San José	> 2000				
Inferior								
Cambriano?				> 2000		Cuarcitas blanca y grises, mármoles, gneises micaesquistos y localmente anfibolitas.		



Nota: Modificado de (Carlotto, Cárdenas, Romero, Valdivia, & Tintaya, 1999)



2.10.3. Macizo de Machupicchu.

Datado su origen en el permo-triásico, se localiza en la zona oriental del cuadrángulo de Machupicchu, y se extiende hacia el cuadrángulo vecino de Urubamba. Presenta una forma alargada con orientación N-S y una superficie aprox. de 244 km². En el norte se corta con el Grupo San José, mientras que en el oeste y sur instruyen a rocas metamórficas del cámbrico del Grupo San José.

En muestra de mano, poseen una textura fanerítica (a veces megmatítica), leucocráticas. Composición predominante de ortoclasas, plagioclasas, cuarzo y hornblenda. Muchas veces se puede evidenciar presencia de xenolitos de dioritas.

En este macizo se identifica diferentes composiciones petrográficas que pueden ser diferenciadas macroscópicamente, estas son principalmente: “sienogranitos, monzogranitos, granodioritas, cuarzomonzodioritas, y con menor frecuencia cuarzosienitas y granitos alcalinos”. (Carlotto, Cárdenas, Romero, Valdivia, & Tintaya, 1999)

2.10.4. Depósitos Aluviales:

“Estos depósitos son los conos aluviales, las cuales se ubican principalmente ubicados en las desembocaduras de las quebradas principales adyacentes al valle del río Urubamba (formado en su mayoría por antiguos huaycos)”. (Carlotto, Cárdenas, Romero, Valdivia, & Tintaya, 1999).

“Están compuestos por bloques y gravas provenientes de macizo rocoso, en una matriz areno-arcilloso. Cubren extensas áreas, como el valle del río Santa María (Lúcuma), entre las quebradas Cordorma y Shihuaymarca. En el valle del río Urubamba, numerosos poblados se han asentado sobre estos depósitos” (Carlotto, Cárdenas, Romero, Valdivia, & Tintaya, 1999).



2.10.5. Depósitos Fluviales:

“Estos depósitos se ubican en la base de los valles en especial del Vilcanota – Urubamba, donde están constituidos por bancos de gravas y arenas, formando una o varias terrazas”. (Ramos Cabrera & Minaya Encarnación, 2021)

Figura 19. Columna Estratigráfica de la Zona de estudio.

ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	ABREV.	LITOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO	Depósito fluvial	Qh-fl		Cantos, gravas y arenas de granulometría variada.
			Depósito aluvial	Qh-al		Gravas y arenas mal seleccionadas en matriz limoarenosa y materiales residuales.
MESOZOICO	TRIÁSICO		Unidad Machupicchu	PET-mach-gr		Granito
	PERMICO	SUPERIOR				
PALEOZOICO	ORDOVÍCIO	INFERIOR	Formación Malaga	Oi-m-cct		Cuarcitas, areniscas grises intercaladas con esquistos filitas en estratos gruesos a medianos.
				Oi-m-pz,esq		Pizarra, esquisto-sericita y arenisca gris verdosa.
		SUPERIOR	Grupo Ollantaytambo	CaOi-o-esq		Esquisto-sericita carbonosos, filitas grises.
	CAMBRICO			CaOi-o-esq,pz		Esquisto-sericita, cuarzo, pizarra limolíticas grises.

Conglomerado fluvial

Conglomerado aluvial

Granito

Arenisca

Cuarcita

Lutita, Pizarras, Esquistos

Nota: Modificado de (Carlotto, Cárdenas, Romero, Valdivia, & Tintaya, 1999)

2.11. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL REGIONAL

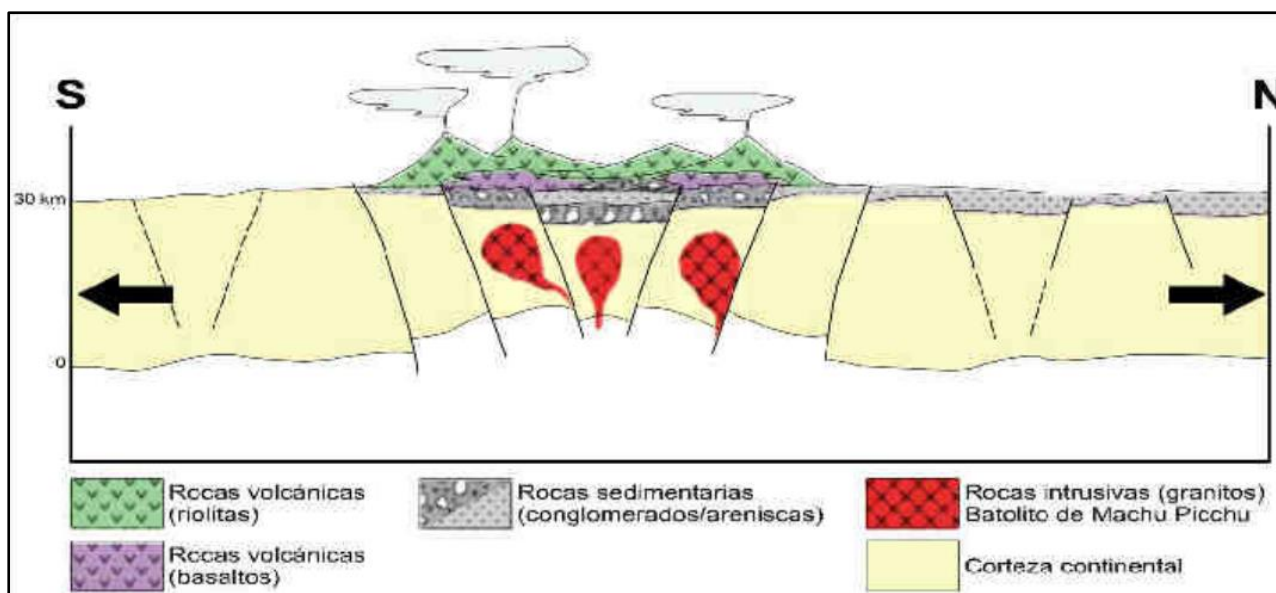
2.11.1. Evolución Geotectónica:

Los análisis petrográficos y geoquímicos revelan que el batolito se originó hace aproximadamente 246 millones de años, en un ambiente de rift continental caracterizado por esfuerzos distensivos que fracturaron la corteza. Es probable que los movimientos sinestrales

estuvieran vinculados a estos esfuerzos de extensión y hayan influido en el control de la ubicación de los cuerpos graníticos. Asimismo, el emplazamiento del magma parece haber sido parcialmente sintectónico, como lo evidencian las estructuras de foliación y blastomilonita presentes en las rocas en campo. Posteriormente, “durante la evolución andina y particularmente en el Eoceno-Oligoceno, entre 43 y 30 millones de años, las fallas NO-SE actuaron como fallas inversas e indican un esfuerzo compresivo regional NE-SO, como es bien conocido en la región de Cusco” (Carlotto, 1998). “Durante esta época ocurrió el mayor levantamiento de los Andes acompañado de una intensa erosión en las partes superiores de la corteza continental. Estos procesos facilitaron la exposición de los granitos” (Carlotto, Cárdenas, & Fidel, 2009).

“El río Urubamba se originó durante el levantamiento andino y la erosión asociada a esta. Su configuración y desarrollos de meandros han sido controlados por la intersección de fallas NO-SE y NE-SO, el cual evidencia un claro control tectónico” (Kalafatovich, 1963).

Figura 20. Modelo de formación del batolito de Machupicchu en un contexto de rift durante el Permo-Triásico



Fuente: (Carlotto, Cárdenas, & Fidel, 2009)



Las diaclasas originadas por contracciones debidas al enfriamiento del magma o roca fundida, durante su consolidación dentro de la corteza terrestre. “Durante las deformaciones tectónicas posteriores al emplazamiento de los granitos, los esfuerzos principales compresivos se han distribuido por las diaclasas y, por eso, es frecuente ver, en la mayoría de ellas, estrías de fallas en los diferentes planos”. (Carlotto, Cárdenas, & Fidel, 2009)

“El análisis estructural de las fallas permite identificar varios eventos tectónicos, destacando uno compresivo de orientación NE-SO. Este evento afecta tanto intrusivos con rocas del paleozoico inferior, vinculado al proceso de evolución de los Andes”. (Carlotto, Cárdenas, Romero, Valdivia, & Tintaya, 1999)

2.11.2. Deflexión de Abancay:

Andes estrechos y los Andes Anchos del sur, siendo una anomalía litosférica excepcional” (Gerard, y otros, 2018).

“Esta zona arqueada, de transición geológica, se extiende por 200 aproximadamente, y muestran fallas geológicas con orientaciones E-O, que cruzan el eje de elongación de la cordillera” (Gerard, y otros, 2018).

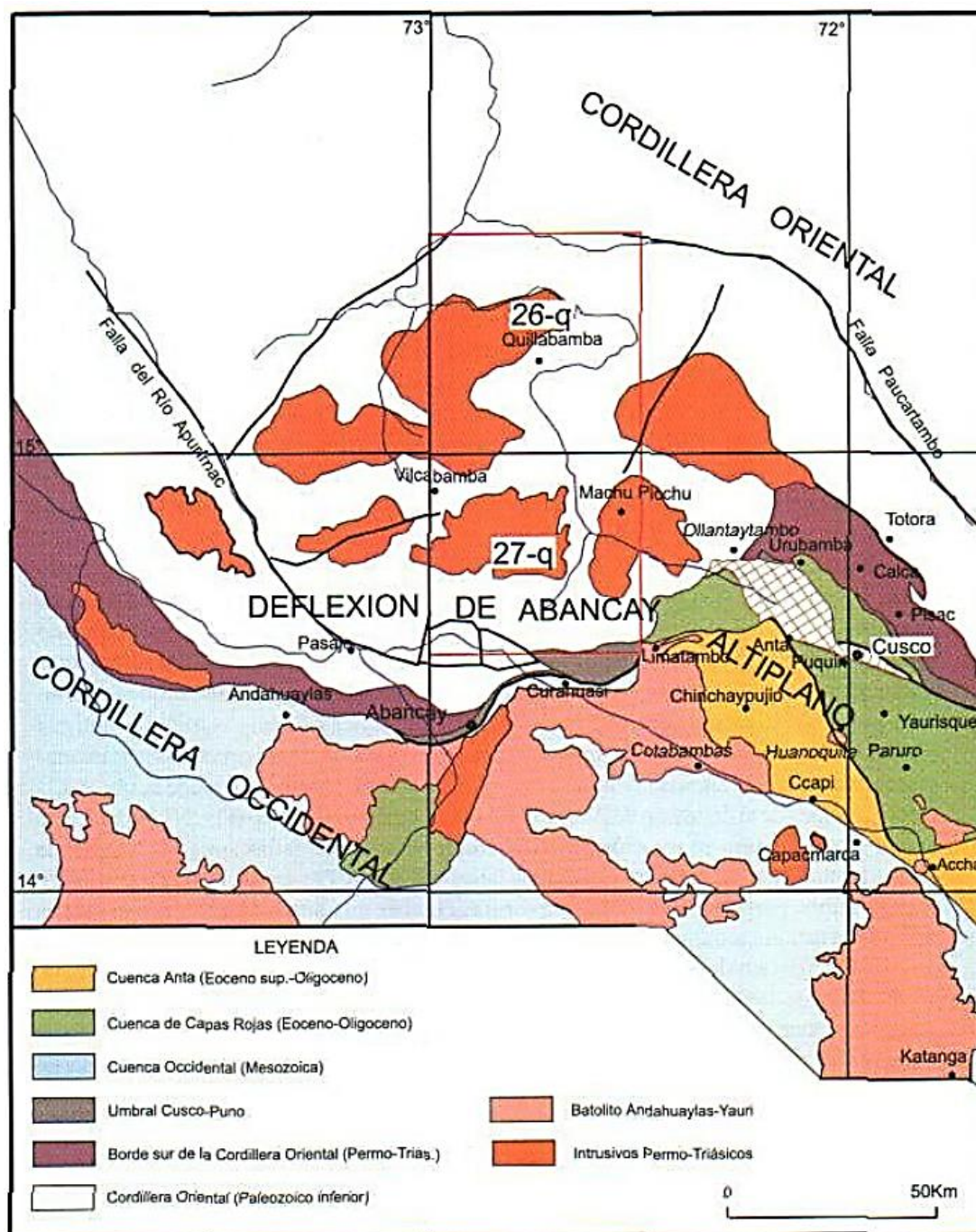
Para el análisis estructural, se ha considerado el análisis de pliegues, fallas y diaclasas, para lo cual se ha tomado medidas de rumbos y buzamientos de estratos (SO), esquistosidades (S1 y S2), estrías de fallas.

2.11.3. Pliegues.

“El análisis estructural en pliegues presente en el Grupo San José, al sur de la falla Marampata-Amparay, revela una orientación casi E-O, de igual manera, el sinclinal de Vilcabamba presenta la misma orientación” (Gerard, y otros, 2018).

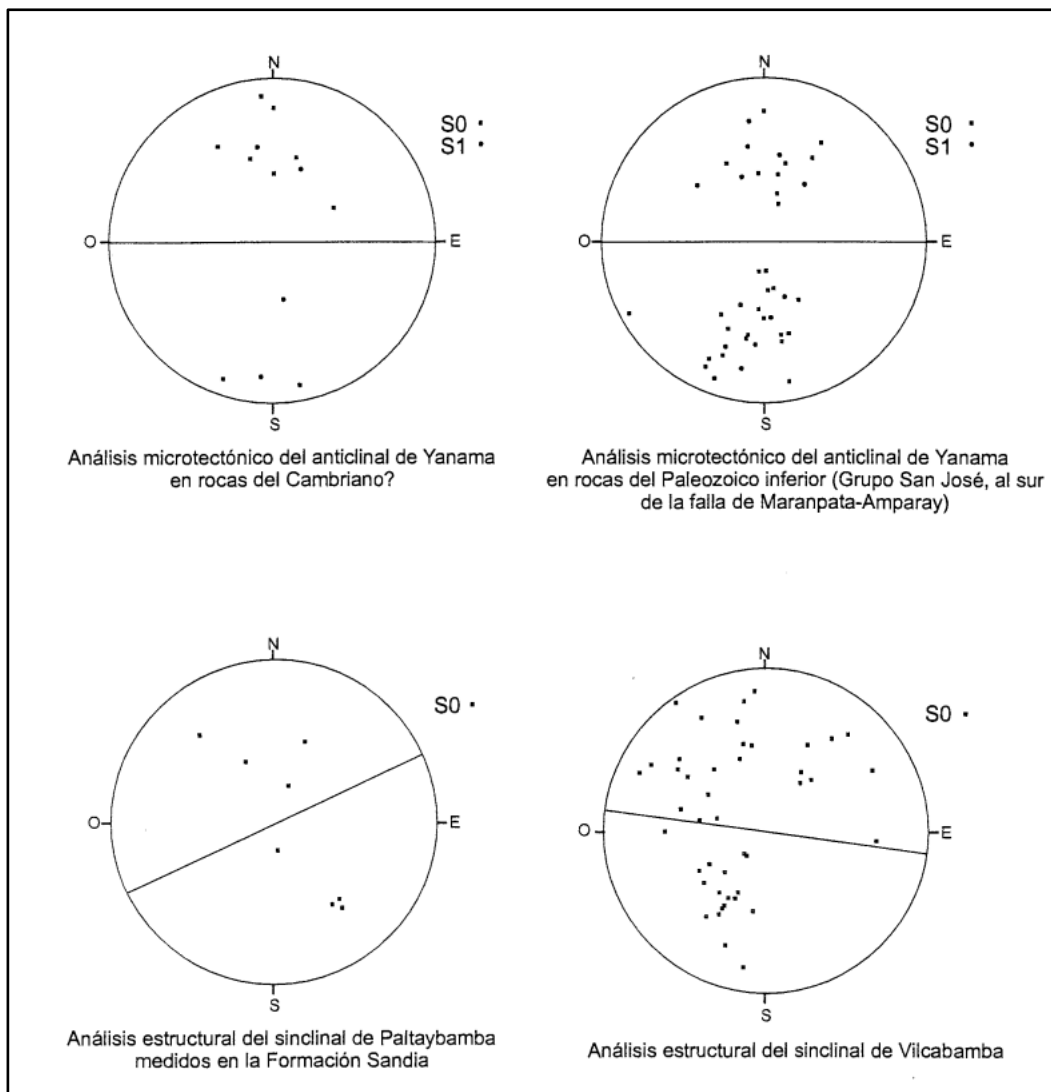
“El sinclinal de Paltaybamba varía entre E-O a ENE-OSO, que es corroborado por el análisis estructural. La Fm. Sandia (en Paltaybamba) muestra una dirección de los pliegues de N65° con un eje axial que buza levemente hacia el sur” (Gerard, y otros, 2018).

Figura 21. Esquema estructural de la deflexión de Abancay.



Fuente:(Tomado de Carlotto, 1998)

Figura 22. Análisis microtectónico de pliegues de los cuadrángulos de Quillabamba (26-q) y Machupicchu (27-q).



Fuente: (Carlotto, Cárdenas, Romero, Valdivia, & Tintaya, 1999)

2.11.4. Fallas.

Los estudios geológicos realizados a cabo por diferentes autores (Carlotto, Cárdenas, Romero, Valdivia, & Tintaya, 1999), identifican la presencia de dos fallas regionales que influyen en la configuración morfológica del cuadrángulo de Machupicchu. La primera falla, de orientación NO-SE y de escala kilométrica, fue nombrado como falla Urubamba por Vilimek et al. (2005), esta falla atraviesa parte del valle y tiene papel crucial en la configuración del meandro del río



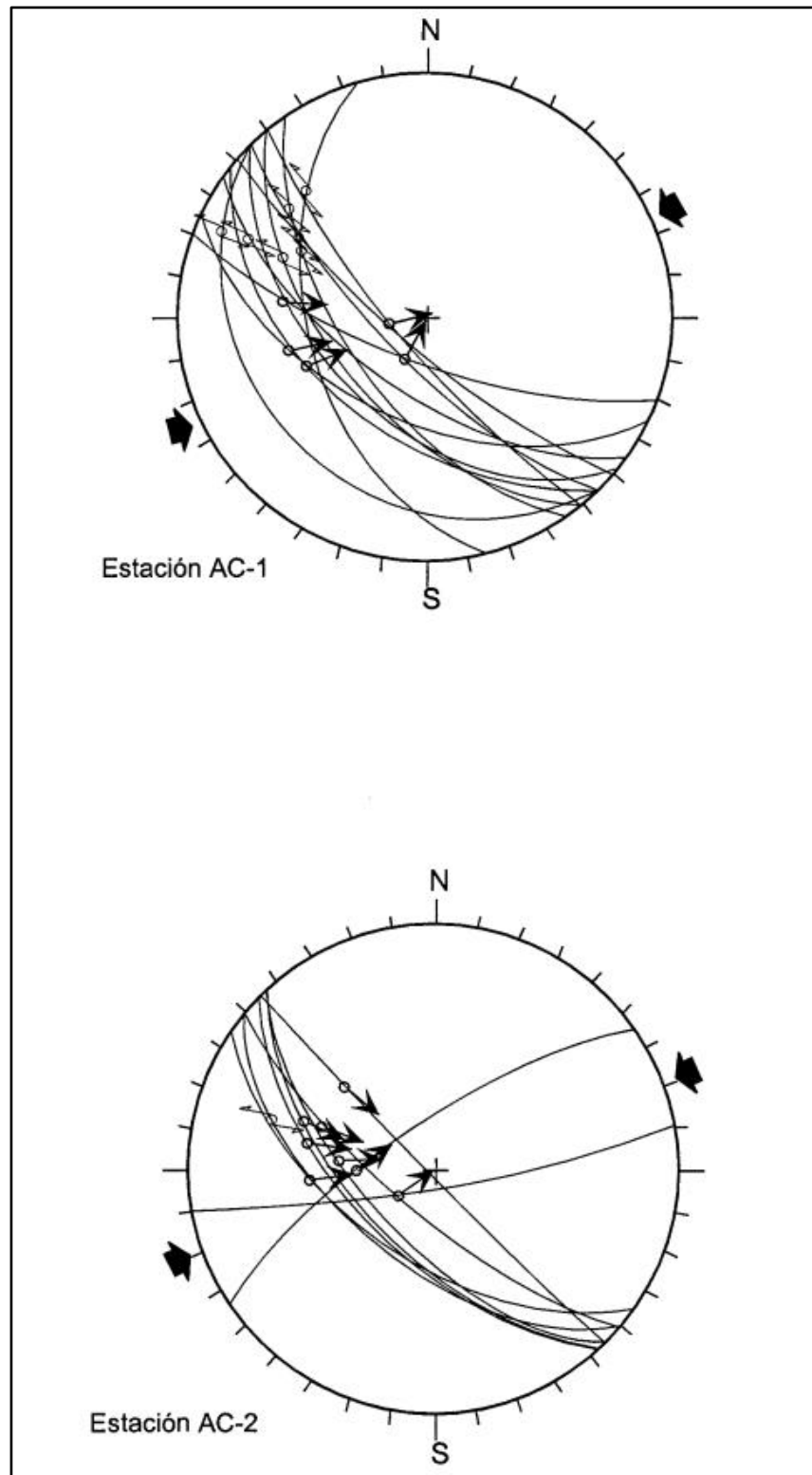
Urubamba. “La segunda falla, también de escala kilométrica y con una dirección NO-SE, es conocida como Central Hidroeléctrica Machupicchu (CHM), esta se encuentra ligeramente al sur de la primera y afecta igualmente la forma del meandro” (Carlotto et al. 1999,2007). Por otro lado, Kalafatovich (1963) describe un sistema de fallas con orientación NE-SO que atraviesa la ciudad de Machupicchu, y unas conocidas como Foso Seco, que corresponde a una depresión que separa la zona urbana con la zona agrícola. según Kalafatovich (1963), las fallas con orientación NE-SO forman una minifosa que abarca gran parte del poblado de Machupicchu pueblo.

“Del análisis microtectónico, las fallas ubicadas en Aguas Calientes revelan un sistema principal de orientación NO-SE. Además, se observa la presencia de fallas de rumbo siniestral. Se concluir que la deformación fue originada por un esfuerzo de acortamiento NE-SO” (Carlotto, Cárdenas, Romero, Valdivia, & Tintaya, 1999).

La falla Ollantaytambo-Vilcabamba-Quimbiri, es una estructura geológica importante en el sur del Perú, esta es una estructura que se extiende por más de 400 km, desde la región del cusco hasta la región de Apurímac; es una falla tipo inversa dextral (movimiento horizontal y vertical), está orientado al NE-SO, tiene una profundidad de 15 km es de edad del cretácico al paleozoico; esta estructura controla la cordillera del Vilcabamba, además está relacionada con la deformación de la cuenca de Urubamba; e influencia en la mineralización de cobre, oro y plata en la región. (Carlotto, Cárdenas, Romero, Valdivia, & Tintaya, 1999)



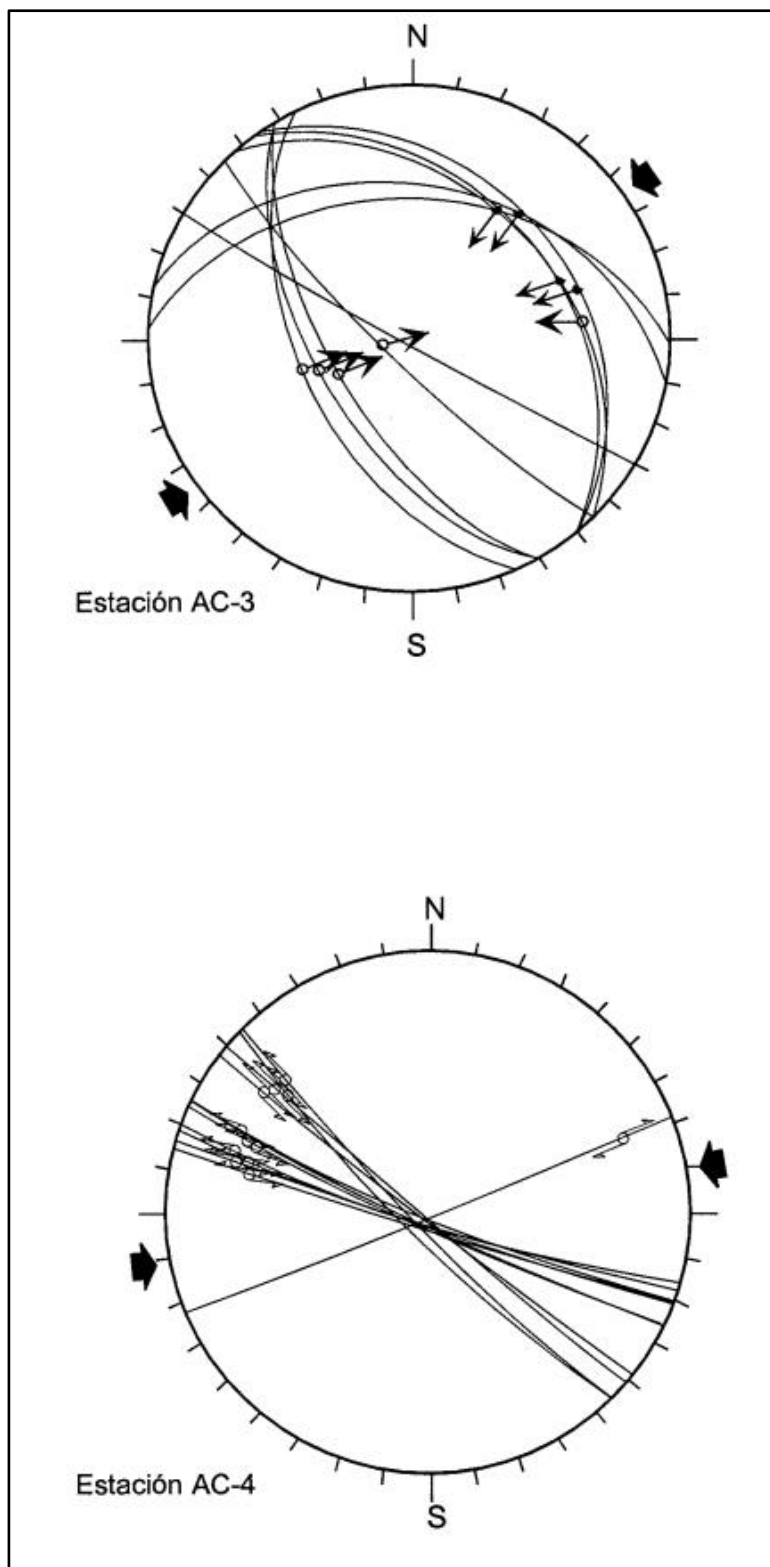
Figura 23. Análisis microtectónico de fallas (Estaciones AC-1 y AC-2), en el sector de Aguas Calientes.



Fuente: (Carlotto, Cárdenas, Romero, Valdivia, & Tintaya, 1999)



Figura 24. Análisis microtectónico de fallas (Estaciones AC-3 Y AC-4) en el sector Aguas Calientes.



Fuente: (Carlotto, Cárdenas, Romero, Valdivia, & Tintaya, 1999)



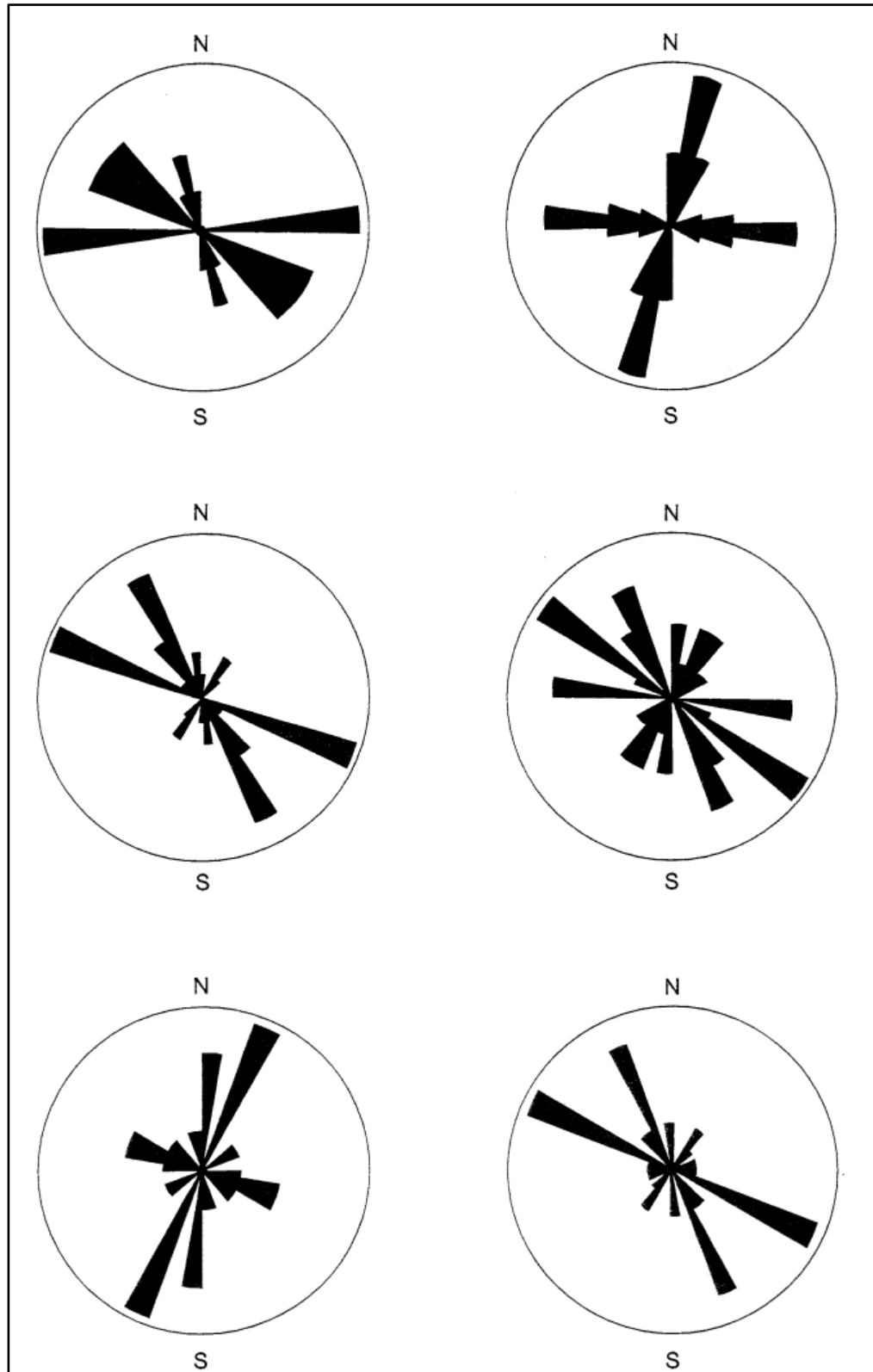
2.11.5. Diaclasas.

Las diaclasas se clasifican como fracturas en la cual no hay desplazamiento, formada en el enfriamiento del magma debido a sus contracciones. Se ha identificado numerosos sistemas de diaclasas que afectan directamente a las rocas intrusivas del macizo de Machupicchu. Las mediciones realizadas en Aguas Calientes revelan la presencia de diferente familia de diaclasas, de los cuales se distingue principalmente el sistema NO-SE, seguido de los sistemas E-O y NE-SO.

“La interacción entre las fallas y las diaclasas contribuyen a la inestabilidad de los intrusivos, especialmente en áreas de pendiente muy abrupta. Estos fenómenos facilitan la ocurrencia de procesos de geodinámica externa, por ejemplo, en la quebrada Aguas Calientes” (Carlotto, Cárdenas, Romero, Valdivia, & Tintaya, 1999).



Figura 25. Diagrama de diaclasas del Batolito de Machupicchu, en el sector de Aguas Calientes.



Fuente: (Carlotto, Cárdenas, & Fidel, 2009)



2.12. CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO.

“Proporcionan una alternativa para evaluar las propiedades de los macizos rocosos a gran escala. Los sistemas de clasificación geomecánica buscan resumir en un solo valor numérico las características de resistencia de un macizo rocoso, facilitando su análisis y comprensión” (OSINERGMIN, 2017).

2.12.1. Sistema RMR.

El sistema Rock Mass Rating (RMR), desarrollado por Bieniawski, clasifica los macizos rocosos en una escala de 0 a 100 puntos, donde 0 corresponde a una roca de muy mala calidad y 100 para roca muy buena calidad. Las versiones más comunes de este sistema son el RMR76 y el RMR89. Ambas incluyen la valoración de parámetros como:

- Resistencia de la Roca Intacta.
- RQD.
- Espaciamiento de discontinuidades.
- Condición de discontinuidades.
- Agua subterránea.

Figura 26. Interpretación de los valores de RMR.

Descripción	RMR	Clase de Macizo Rcoso
Roca Muy Buena	81-100	I
Roca Buena	61-80	II
Roca Regular	41-60	III
Roca Mala	21-40	IV
Roca Muy Mala	0-20	V

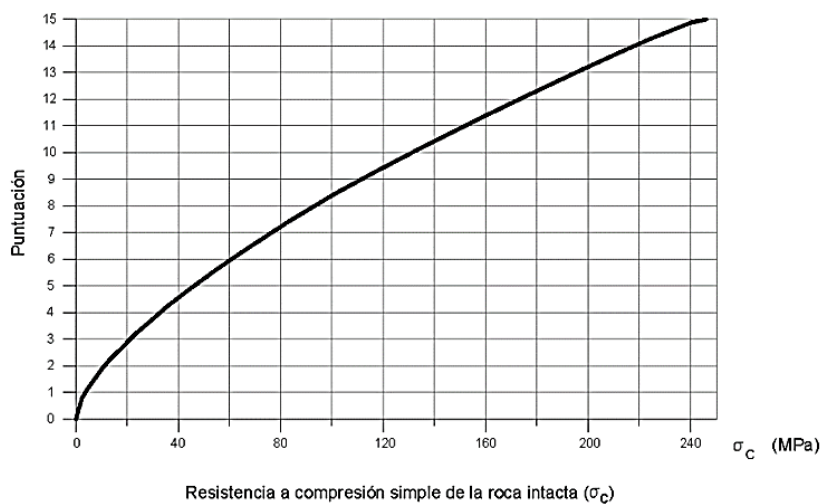
Fuente: (Bienawski, 1989)



El puntaje total del RMR está definido por: $RMR = (i) + (ii) + (iii) + (iv) + (v) - \text{Ajuste por orientación de discontinuidades}$.

i) Resistencia a compresión uniaxial de la roca intacta.

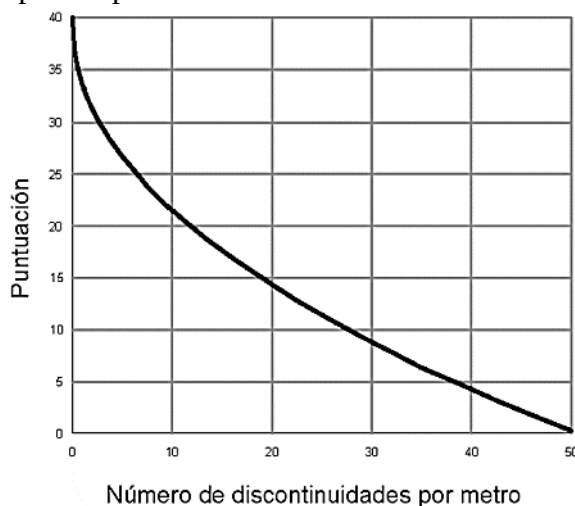
Figura 27. Gráfico para la puntuación de la resistencia a la compresión simple de la roca intacta (σ_c)



Fuente: (OSINERGMIN, 2017)

ii) Número de juntas por metro.

Figura 28. Gráfico para la puntuación del número de discontinuidades por metro.



Fuente: (OSINERGMIN, 2017)



iii) Efecto del agua.

Figura 29. Valoración de la presencia de agua en el frente.

Estado del macizo rocoso	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Flujo de agua
Valoración	15	10	7	4	0

Fuente: (OSINERGMIN, 2017)

iv) Resistencia de las discontinuidades.

Figura 30. Criterios para la valoración de la resistencia de discontinuidades.

Continuidad	< 1 m	1 – 3 m	3 – 10 m	> 10 m
	5	4	2	0
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Suave	Superficies de deslizamiento
	5	3	1	0
Relleno	Duro		Blando	
	< 5 mm	> 5 mm	< 5 mm	> 5 mm
	5	2	2	0
Alteración	Sin alteración	Poco alterado	Muy alterado	Descompuesto
	5	3	1	0

Fuente: (OSINERGMIN, 2017)

v) Alterabilidad de la matriz rocosa por efecto del agua.

Este parámetro se evalúa mediante los resultados de ensayos de sequedad – humedad.

Figura 31. Criterios para la evaluación de la alterabilidad de la matriz rocosa por el agua.

Alterabilidad I_{d2} (%)			
< 85	60 – 85	30 – 60	< 30
10	8	4	0

Fuente: (OSINERGMIN, 2017)



Figura 32. Parámetros de Clasificación Geomecánica RMR.

1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10-4	4-2	2-1	Compresión simple (MPa)		
		Compresión simple	> 250	250-100	100-50	50-25	25-5	5-1	< 1
		Puntuación	15	12	7	4	2	1	0
2		RQD	90 %-100 %	75 %-90 %	50 %-75 %	25 %-50 %	< 25 %		
		Puntuación	20	17	13	6	3		
3		Separación entre diaclasas	> 2 m	0,6-2 m	0,2-0,6 m	0,06-0,2 m	< 0,06 m		
		Puntuación	20	15	10	8	5		
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	> 20 m		
		Puntuación	6	4	2	1	0		
		Abertura	Nada	< 0,1 mm	0,1-1,0 mm	1-5 mm	> 5 mm		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando < 5 mm	Relleno blando > 5 mm		
		Puntuación	6	4	2	2	0		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
5	Agua freática	Caudal por 10 m de túnel	Nulo	< 10 litros/min	10-25 litros/min	25-125 litros/min	> 125 litros/min		
		Relación: Presión de agua/Tensión principal mayor	0	0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	> 0,5		
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
		Puntuación	15	10	7	4	0		

Corrección por la orientación de las discontinuidades

Dirección y buzamiento		Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables
Puntuación	Túneles	0	- 2	- 5	- 10	- 12
	Cimentaciones	0	- 2	- 7	- 15	- 25
	Taludes	0	- 5	- 25	- 50	- 60

Clasificación

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy buena	Buena	Medía	Mala	Muy mala
Puntuación	100-81	80-61	60-41	40-21	< 20

Fuente: (Bieniawski, 1989)



2.12.2. Sistema de Clasificación SMR.

El índice SMR lo cual se utiliza para la clasificación de taludes se determina a partir del RMR básico sumándole a este un factor de ajuste, que depende de la orientación de las discontinuidades (y producto de tres factores) y un factor de excavación que depende del método utilizado: $SMR = RMR + (F_1 * F_2 * F_3) + F_4$. (Gonzales de Vallejo, Ferrer, Ortuno, & Oteo, 2002)

Figura 33. Factores de Clasificación Geomecánica de taludes SRM.

Factores de ajuste por la orientación de las juntas (F_1 , F_2 y F_3)						
Caso		Muy favorable	Favorable	Normal	Desfavorable	Muy desfavorable
P	$ \alpha_j - \alpha_i $	$> 30^\circ$	$30^\circ - 20^\circ$	$20^\circ - 10^\circ$	$10^\circ - 5^\circ$	$< 5^\circ$
T	$ \alpha_j - \alpha_i - 180^\circ $					
P/T	F_1	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
P	$ \beta_j $	$< 20^\circ$	$20^\circ - 30^\circ$	$30^\circ - 35^\circ$	$35^\circ - 45^\circ$	$> 45^\circ$
	F_2	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
T	F_2	1	1	1	1	1
P	$\beta_j - \beta_i$	$> 10^\circ$	$10^\circ - 0^\circ$	0°	$0 - (-10^\circ)$	$< -10^\circ$
T	$\beta_j + \beta_i$	$< 110^\circ$	$110^\circ - 120^\circ$	$> 120^\circ$	—	—
P/T	F_3	0	-6	-25	-50	-60
Factor de ajuste por el método de excavación (F_4)						
Método	Talud natural	Precorte	Voladura suave	Voladura o excavación mecánica	Voladura deficiente	
F_4	+ 15	+ 10	+ 8	0	- 8	
Clases de estabilidad						
Clase	V	IV	III	II	I	
SMR	0 - 20	21 - 40	41 - 40	61 - 80	81 - 100	
Descripción	Muy mala	Mala	Normal	Buena	Muy buena	
Estabilidad	Totalmente inestable	Inestable	Parcialmente estable	Estable	Totalmente estable	
Roturas	Grandes roturas por planos continuos o por masa	Juntas o grandes cuñas	Algunas juntas o muchas cuñas	Algunos bloques	Ninguna	
Tratamiento	Reexcavación	Corrección	Sistemático	Ocasional	Ninguno	
P: rotura plana T: rotura por vuelco α_i : dirección del talud α_j : dirección de las juntas β_i : buzamiento del talud β_j : buzamiento de las juntas						

Fuente: (Romana, 1997)



CAPITULO III GEOMORFOLOGÍA

El estudio de la geomorfología respecto a las fuentes termales es importante, debido a que nos permite entender como las características del relieve, como montañas, zonas bajas (fondo de quebradas y valles) entre otras geoformas, influyen en la ubicación de las fuente: la diferencia de altitudes (relieve) afecta directamente a la gradiente hidráulico (zona de recarga y descarga, etc.) esta diferencia de altura crea una gradiente hidráulico fuerte, impulsando el flujo desde el acuífero profundo hacia la superficie en forma de fuentes termales.

3.1. CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS DEL BALNEARIO.

La zona de estudio comprende parte de la quebrada de aguas calientes, Alcamayo y el río Urubamba, comprende una depresión encerrada por montañas altas que sus flancos van en dirección por el Este y Oeste, con sus respectivas salidas para el Sur-Oeste, hacia el río Urubamba (Cuenca de Urubamba). Las dos quebradas presentan forma de V y una base muy estrecha, con pendientes muy fuertes en el río.

3.1.1. Pendientes

Para obtener el mapa de pendientes en la zona de estudio se ha usado un Modelo de Elevación digital (DEM) con una precisión de 12m, generando de ellas las curvas topográficas cada 20m, y luego se generó las pendientes como gradiente de elevación, los rangos se establecieron según el Reglamento de Clasificación de Tierras por su Capacidad de Uso Mayor, como muestra en la siguiente tabla:



Tabla 6: Clasificación de pendientes

Término Descriptivo	Rango (%)
Plano o casi a nivel	0-2
Ligeramente inclinada	2-4
Moderadamente inclinada	4-8
Fuertemente inclinada	8-15
Moderadamente empinada	15-25
Empinada	25-50
Muy empinada	50-75
Extremadamente empinada	>75

Fuente: (Ministerio de agricultura, 2009)

Para este estudio de evidencio cinco tipos de pendientes (Fuertemente inclinada, Moderadamente Empinada, Empinada, Muy Empinada y Extremadamente Empinada), el cual se muestra en la siguiente tabla, así como en el mapa de pendientes adjuntado.

Tabla 7: Pendientes y sus áreas correspondientes en la zona de trabajo.

Rango (%)	Descripción	Área (ha)	Área (%)
8-15	Fuertemente inclinada	1.58	0.55
15-25	Moderadamente empinada	7.67	2.66
25-50	Empinada	47.42	16.47
50-75	Muy empinada	65.46	22.74
>75	Extremadamente empinada	165.73	57.57
Total		287.85	100.00

Nota: Modificado de (Ministerio de agricultura, 2009).

Por las piscinas de aguas termales de Aguas Caliente, se tienen terrenos con pendientes fuertemente inclinada 8-15% pendientes bajas, Pero en alrededores se tiene pendientes empinadas 25-50% pendientes altas debiéndose esto a que sobreyace sobre material ígneo tipo granítico que al a ver sido accidentado por la falla forma una depresión abrupta que a la larga se generó una quebrada de tipo V.



A) Pendiente Fuertemente Inclinada (8-15%)

La zona de estudio comprende zonas muy pequeñas de este tipo de pendiente, como por ejemplo parte del centro poblado de aguas calientes y parte del río Urubamba.

B) Pendiente Moderadamente Empinada (15-25%)

La zona de estudio comprende algunas áreas justamente donde desemboca las quebradas Aguas Calientes y Alcamayo.

C) Pendiente Empinada (25-50%)

Las zonas de pendiente Empinada se encuentran distribuidas en las quebradas de aguas calientes y Alcamayo, en los lados de los ríos, y en la zona del río Urubamba alrededor de la población de aguas calientes.

D) Muy empinada (50-75%)

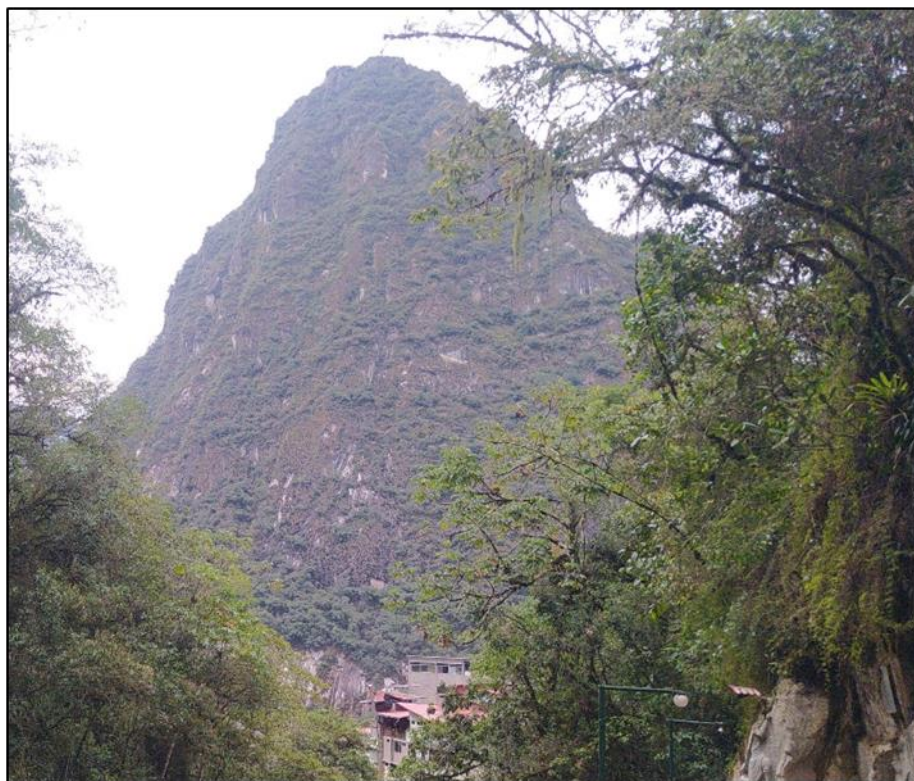
Las zonas con esta pendiente se ubican en la montaña en las zonas de media a alta de las montañas alrededor del poblado de Aguas Calientes.

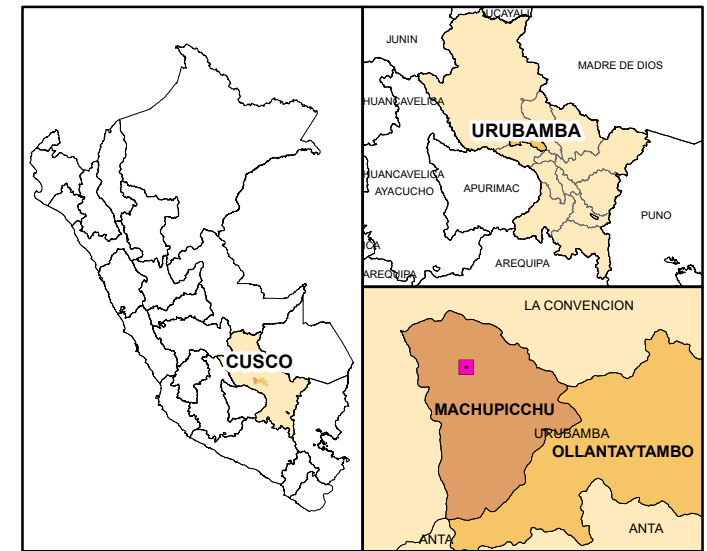
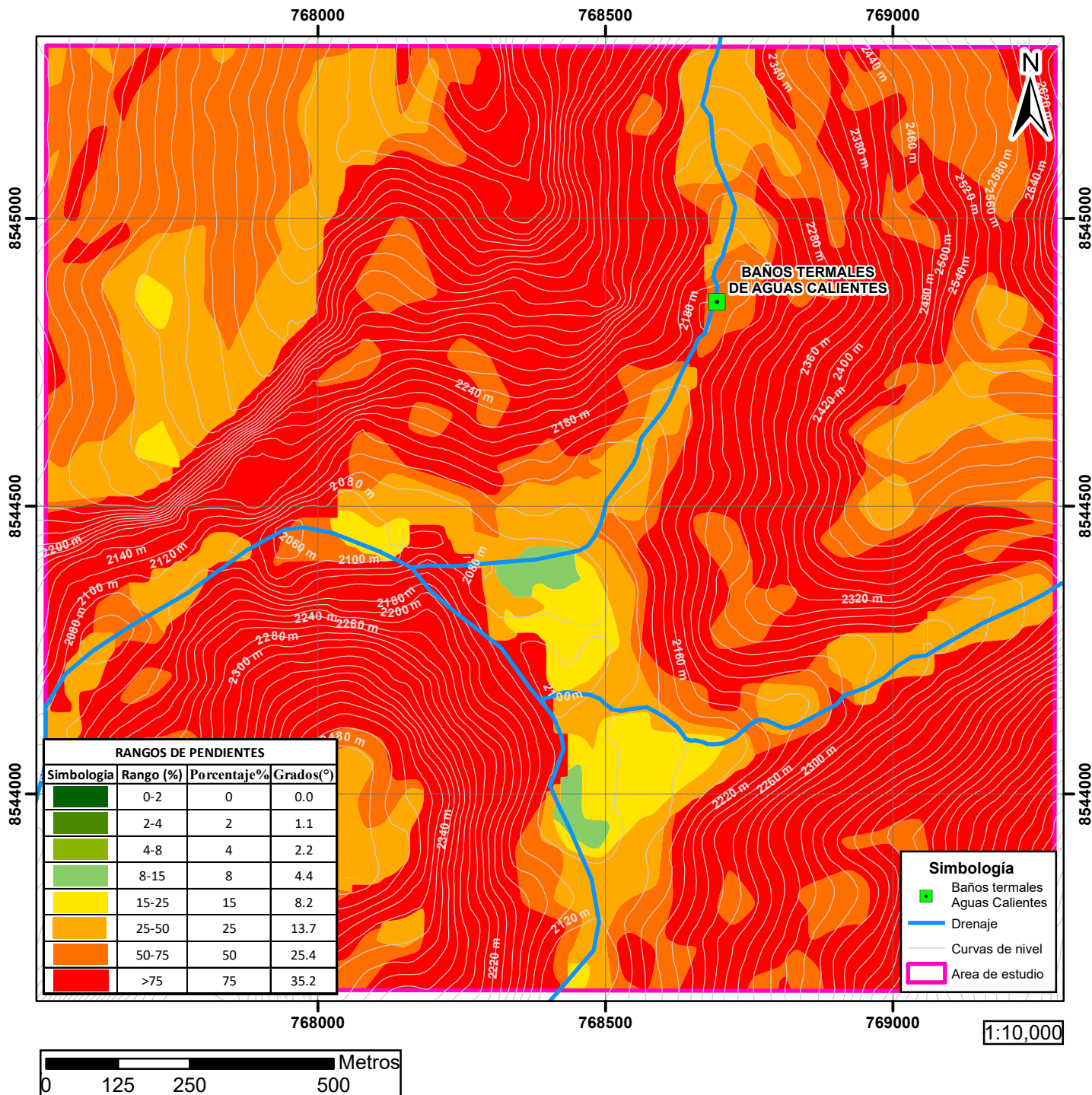
E) Extremadamente Empinada (mayor a 75%)

Se ubica en los flancos de las montañas alrededor de la población de aguas calientes debido a que la litología es ígneo granítico el cual presenta una resistencia a ser erosionado.

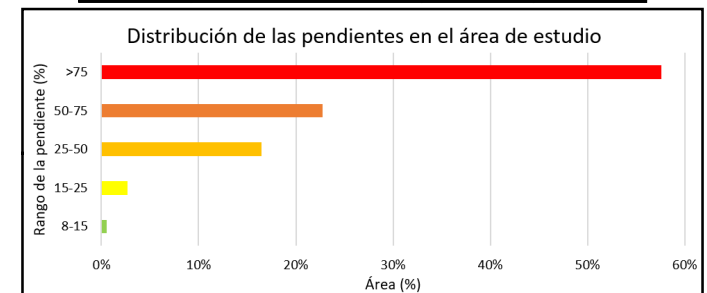


Figura 34. Geoforma con pendiente extremadamente Empinada





DISTRIBUCIÓN DE ÁREAS SEGÚN LA PENDIENTE			
Rango (%)	Descripción	Área (ha)	Área (%)
8-15	Fuertemente inclinada	1.5837	0.5502%
15-25	Moderadamente empinada	7.6696	2.6644%
25-50	Empinada	47.4154	16.4722%
50-75	Muy empinada	65.4560	22.7395%
>75	Extremadamente empinada	165.7268	57.5737%
Total		287.8515	100%



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

TESIS: "CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y GEOMECANICA DE LOS BAÑOS TERMALES DE AGUAS CALIENTES DEL DISTRITO DE MACHUPICCHU, PROVINCIA DE URUBAMBA, REGION CUSCO"

MAPA: MAPA DE PENDIENTES

ELABORADOR POR: KATHERINE GUTIERREZ PERALTA - VANESSA I. VALVERDE GOYZUETA

FUENTE DE DATOS: ING. LÓPEZ ZAPANA RONALD LUIS

ESCALA: INDICADA

DATUM: WGS 1984_UTM_ZONA_18S

MAPA N° 03



3.1.2. Geomorfología

Para elaborar el mapa geomorfológico en la zona de estudio, se utilizó la información litológica, y la información de pendientes descrita anteriormente, imagen satelital recopilación de datos en campo. Se identificaron las siguientes unidades: Montañas baja y media, laderas, abanico aluvial y los valles fluvial y aluvial; para la clasificación de la unidad geomorfológica montaña se utilizó la siguiente tabla considerando como nivel de base al río Urubamba en el punto de desfogue.

Tabla 8: Clasificación de montañas según su altitud respecto al punto base de referencia.

Término Descriptivo	Rango (m)
Montaña Baja	0-1000
Montaña Media	1000-2500
Montaña Alta	2500

Fuente: (Núñez, 2022)

Se muestra a continuación las unidades geomorfológicas reconocidas en campo y las áreas que abarcan en la zona de estudio.

Tabla 9. Unidades geomorfológicas en el área de estudio

Descripción	Área (ha)	Área (%)
Cauce fluvial	8.02	2.79
Abanico Aluvial	21.25	7.38
Ladera de montaña baja extremadamente empinada	40.12	13.94
Ladera de montaña media empinada	25.51	8.86
Ladera de montaña media extremadamente empinada	117.06	40.66
Ladera de Montaña media muy empinada	38.47	13.36
Pie de Monte	5.87	2.04
Quebrada	3.22	1.12
Taludes escarpados	28.35	9.85
Total	287.87	100

Cauce Fluvial: Ubicado en el valle del río Urubamba, se ubica a 2050 m.s.n.m. Se ubica en la zona más baja de la zona de estudio, tiene un ancho promedio de 60m; presenta una pendiente

empinada a extremadamente empinada, litológicamente está compuesto por material cuaternarios fluviales como gravas y arenas. Comprende 8.02 ha correspondiente al 2.79% del área total.

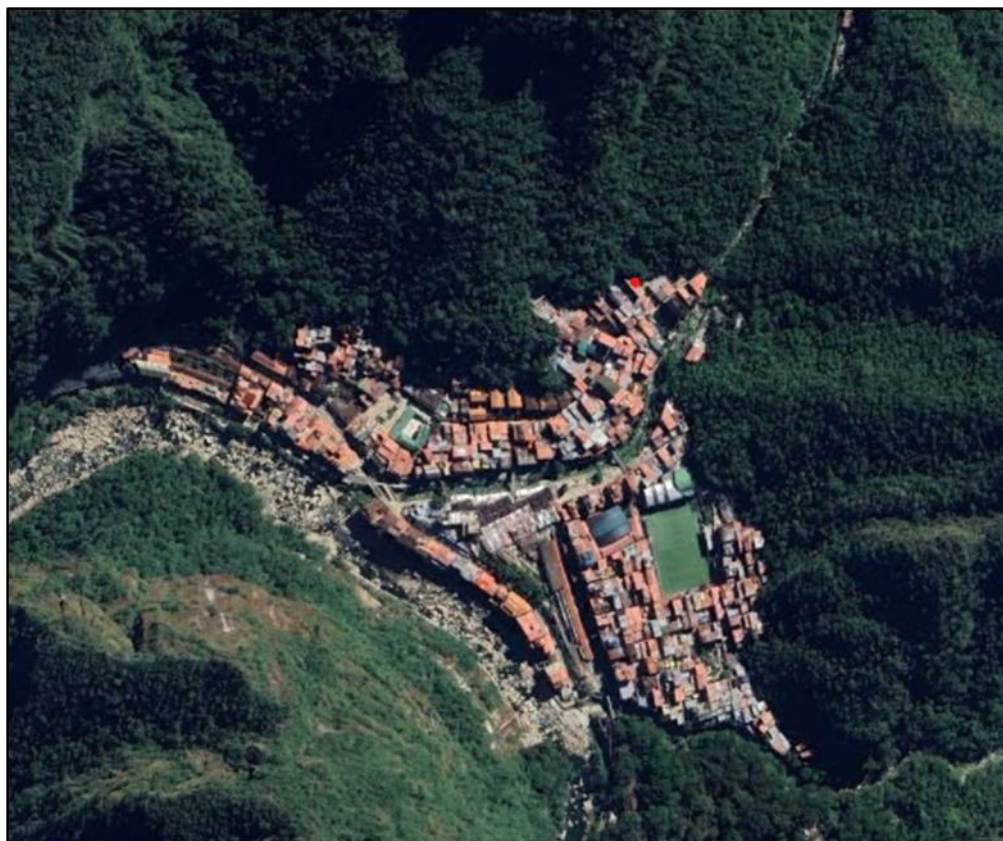
Figura 35. Cauce Fluvial.



Abanico Aluvial: Esta unidad geomorfológica está conformada por la acumulación de varios depósitos de huaycos o aluviones antiguos que descendieron de las quebradas Aguas Calientes y Alcamayo conformada por bloques, cantos, gravas, arenas, dispuestos de manera heterogénea, es aquí donde se ubica la población de aguas calientes, presenta una pendiente moderadamente empinada a empinada. Comprende 21.25 ha correspondiente al 7.38% del área total.



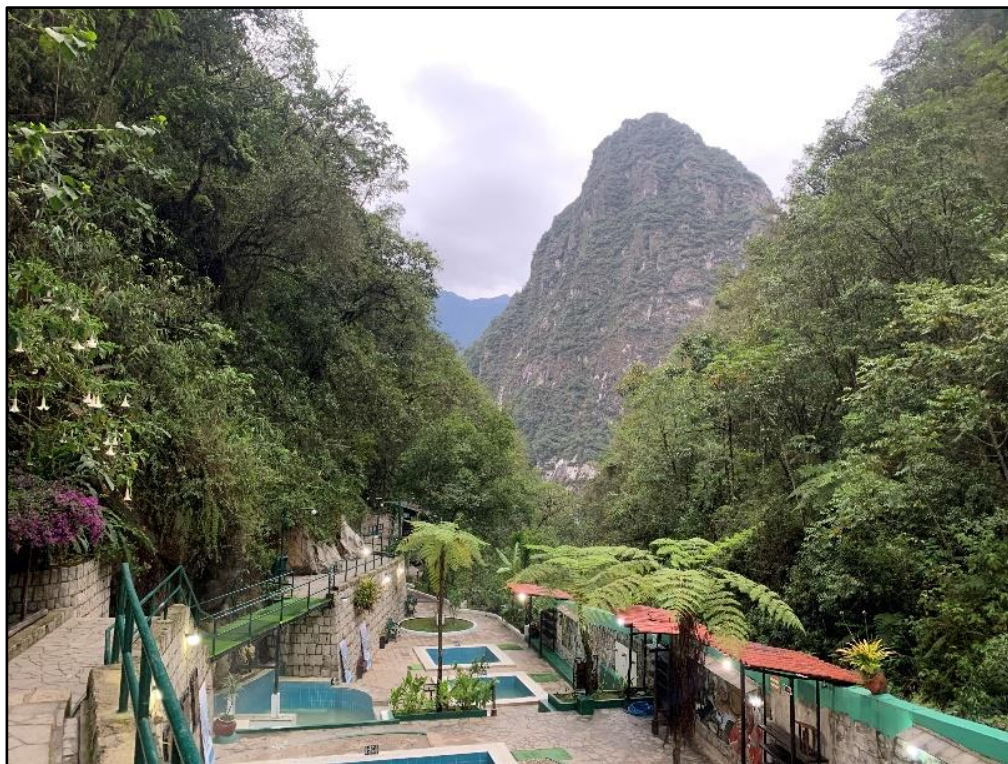
Figura 36.Abanico Aluvial.



Ladera de montaña baja extremadamente empinada: Ubicado en la montaña al frente de la población de aguas calientes, presenta una pendiente que va de empinada a extremadamente empinada, litológicamente está compuesto por granitos del batolito de Machupicchu. Comprende 40.12 ha correspondiente al 13.94% del área total.



Figura 37. Ladera de montaña baja extremadamente empinada.



Ladera de montaña media empinada: Ubicado a los extremos del río aguas calientes y del río Urubamba, presenta una pendiente empinada a muy empinada, litológicamente este compuesto por material cuaternario aluvial, y rocas ígneas del batolito de Machupicchu. Comprende 4.33 ha correspondiente al 1.50% del área total.

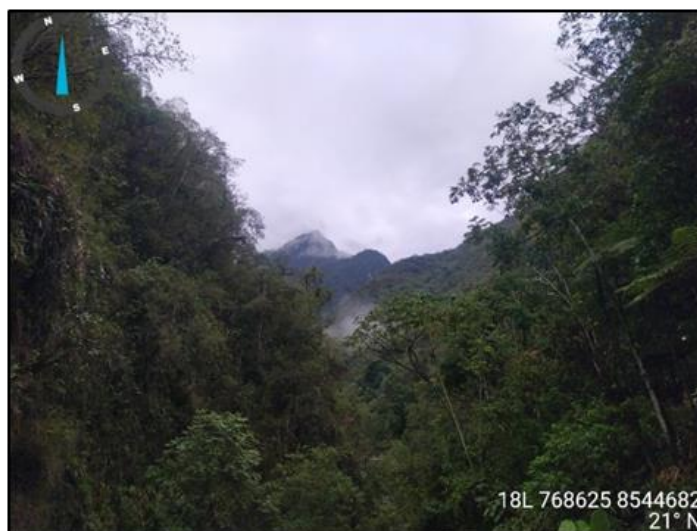


Figura 38. Ladera de montaña media empinada.



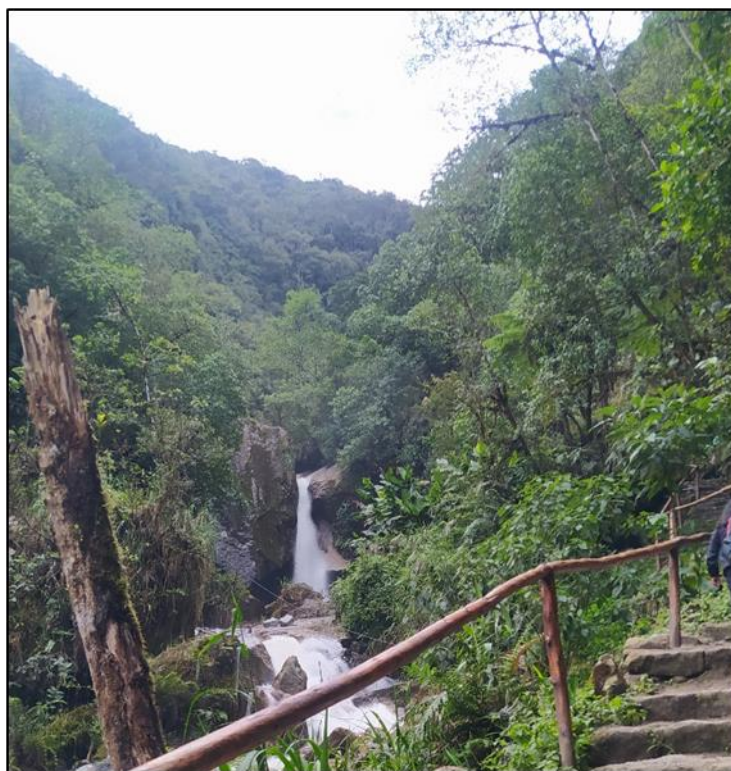
Ladera de montaña media extremadamente empinada: Esta unidad comprende el 60.80% del área de estudio, ubicados en los flancos de las montañas adyacentes, presenta una pendiente empinada a muy empinada, litológicamente comprende material ígneo del batolito Machupicchu por ello las pendientes altas ya que son material con resistencia fuerte a ser alterados. Comprende 175.02 ha correspondiente al 60.80% del área total.

Figura 39. Ladera de montaña media extremadamente empinada.



Ladera de montaña media muy empinada: Ubicada a los lados del río aguas calientes, presenta una pendiente muy empinada, litológicamente está compuesto por material ígneo y un poco de material aluvial. Comprende 1.67 ha correspondiente al 0.58% del área total.

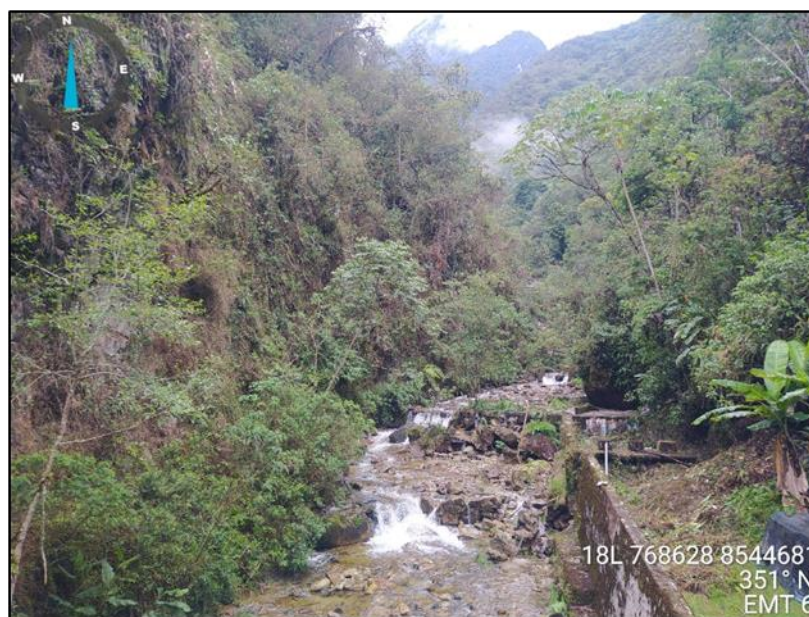
Figura 40. Ladera de montaña media muy empinada.



Pie de monte: Ubicado en la parte baja de las montañas, presenta una pendiente extremadamente empinada, litológicamente está compuesto por material cuaternario Comprende 5.87 ha correspondiente al 2.04% del área total.



Figura 41. Pie de Monte

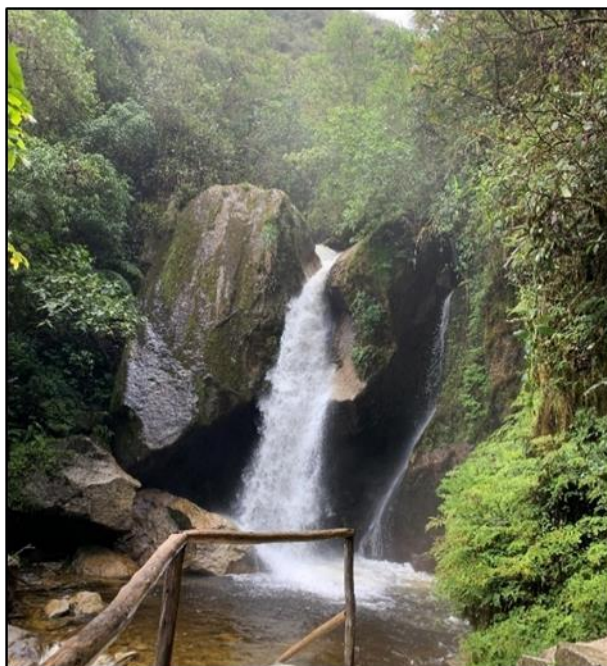


Quebrada: Ubicado en el trayecto del río Aguas Calientes y río Alcamayo, presenta pendientes altas empinada a fuertemente empinada, litológicamente está compuesto por material cuaternario de origen fluvial como arenas y gravas. Comprende 3.22 ha correspondiente al 1.12% del área total.

Además, cabe resaltar que el balneario de aguas calientes se ubica en esta unidad que por razones recreacionales han sido modificado la geomorfología, para poder condicionar el lugar y las piscinas del balneario.

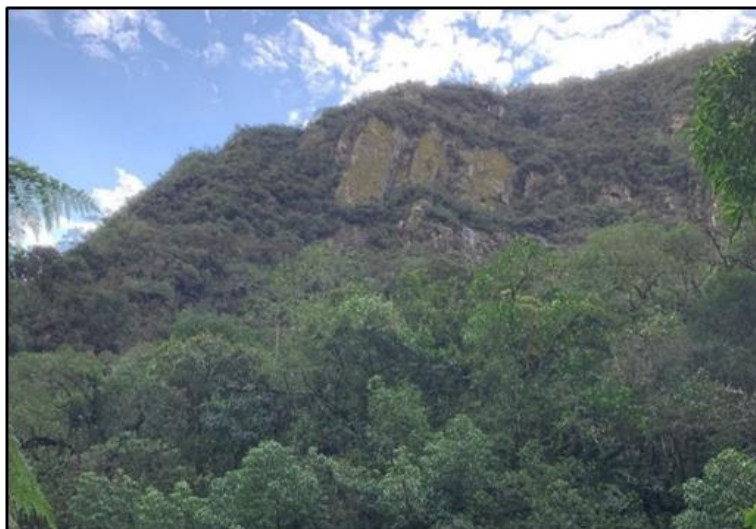


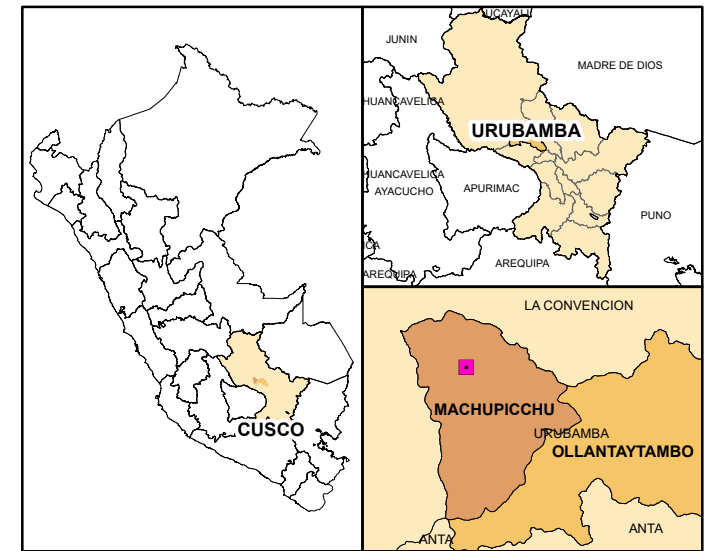
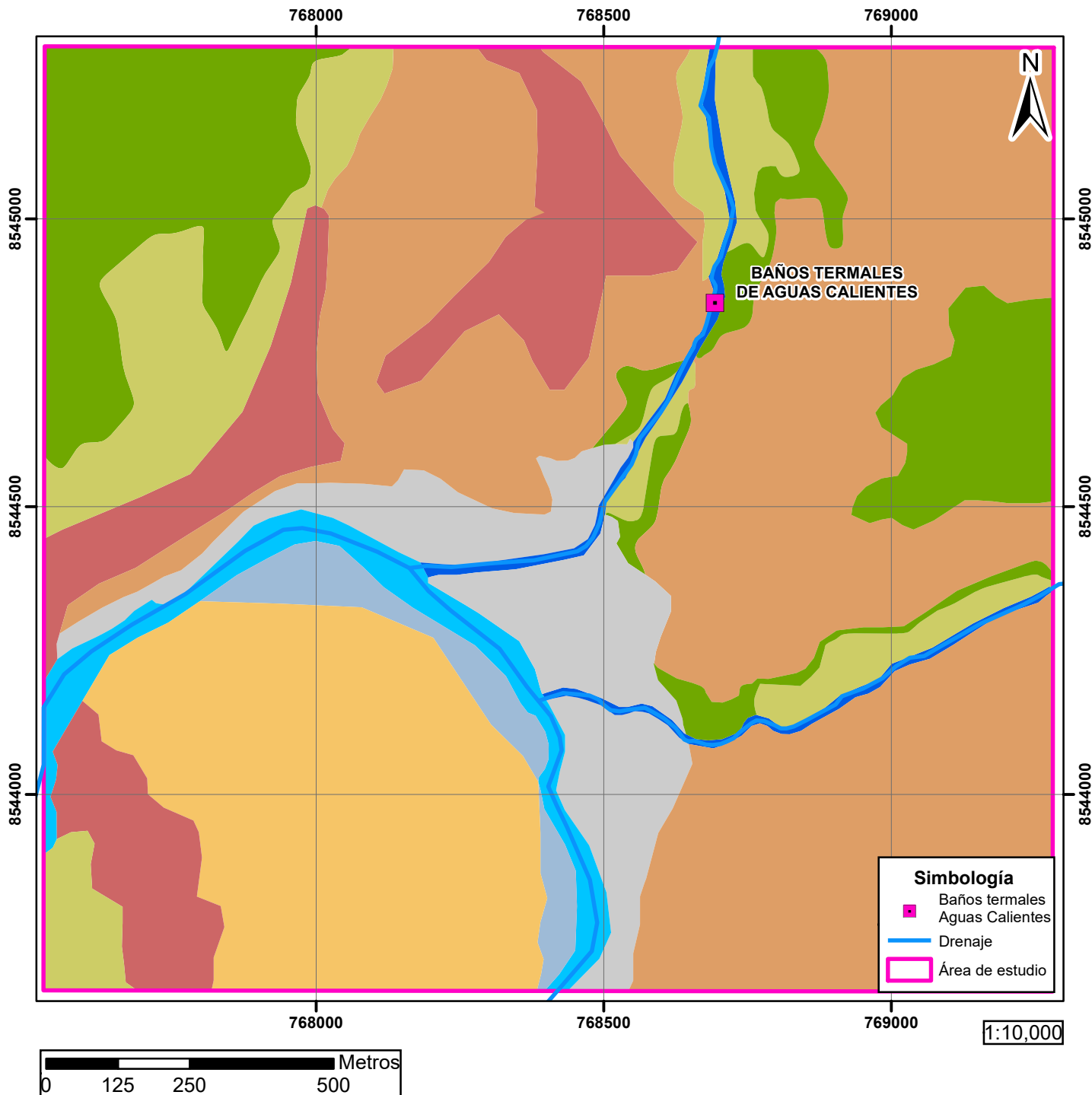
Figura 42.Quebrada.



Taludes escarpados: Son áreas en los flancos de las montañas que presentan pendiente extremadamente empinada, esto debido a la composición litológica que es granitos del batolito, que por fracturamiento se reconocen escarpas en la parte alta de montañas, Comprende 28.35 ha correspondiente al 9.85% del área total.

Figura 43.Taludes Escarpados.





UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS			
Simbología	Descripción	Área (ha)	Área (%)
	Abanico aluvial	8.02	2.7862
	Fondo de valle fluvial	21.25	7.3823
	Ladera de montaña baja extremadamente empinada	40.12	13.9378
	Ladera de montaña media empinada	4.33	1.5043
	Ladera de montaña media extremadamente empinada	175.02	60.8025
	Ladera de Montaña media muy empinada	1.67	0.5802
	Pie de Monte	5.87	2.0393
	Quebrada	3.22	1.1186
	Taludes escarpados	28.35	9.8489
Total		287.85	100

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO	
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA	
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA	
TESIS: "CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y GEOMECANICA DE LOS BAÑOS TERMALES DE AGUAS CALIENTES DEL DISTRITO DE MACHUPICCHU, PROVINCIA DE URUBAMBA, REGION CUSCO"	
MAPA:	MAPA GEOMORFOLÓGICO
ELABORADOR POR:	KATHERINE GUTIERREZ PERALTA - VANESSA I. VALVERDE GOYZUETA
FUENTE DE DATOS:	ING. LÓPEZ ZAPANA RONALD LUIS
ESCALA:	INDICADA
DATUM:	WGS 1984_UTM_ZONA_18S
MAPA N°	04



CAPÍTULO IV: GEOLOGÍA LOCAL

Es importante el estudio de la geología tanto en la zona de recarga, zona de descarga y zona de tránsito de las aguas subterráneas, ya que la litoestratigráfica (tipo de roca) determina las propiedades hidráulicas como la permeabilidad. Las rocas permeables, como las cocas fracturadas, permiten que el agua se desplace fácilmente, mientras que las rocas más compactas pueden formar barreras que retienen el agua hasta que haya una fractura o una de zona de descarga.

Además, la geología es importa porque influye en la composición química del agua termal, ya que el flujo subterráneo de las aguas termales tiene contacto con diferentes rocas de diferentes composiciones mineralógicas y esto afecta directamente en la composición química del agua termal por adición de cationes y aniones provenientes de la disolución de minerales.

La geología local está conformada por material ígneo permo-triásico y por material cuaternarios depósitos de origen aluvial y fluvial. Como se muestra en el mapa de geología local.

El levantamiento andino conjuntamente a la erosión del río ha generado el valle en el que está localizado la ciudad de Machupicchu. También le ha dado sus particulares características geomorfológicas, los valles incisados que forman meandros y las pendientes abruptas. Las abundantes precipitaciones que caen en las laderas empinadas sumando a la gravedad juegan un papel importante en los procesos geodinámicos y geológicos recientes, tales como los deslizamientos y derrumbes.

4.1. Batolito de Machupicchu:

La zona de estudio está compuesta por rocas ígneas intrusivas del batolito de Machupicchu, estas se presentan de forma maciza y en muchas zonas se encuentran muy fracturadas por ello se ubican bloques caídos y deslizamientos. Se trata del macizo rocoso granítico constituye la roca



más abundante, de color blanco o gris, con textura granular holocristalina Hipabisal, compuesta por cuarzo, microclina, ortoclasa, plagioclasa, biotita. Los granitos alcalinos, tienen una textura granular subhedral de grano grueso, con granos equidimensionales de microclina subhedral. La plagioclasa sódica (oligoclasa) es subhedral, a veces con textura mirmequítica y se encuentran parcialmente sericitizadas. También encontramos la Microdiorita en la zona alta de la quebrada aguas calientes compuesto básicamente cuarzo, plagioclasa y minerales máficos como hornblenda y biotita, que usualmente la plagioclasa se encuentra alterada a epidota tomando la roca una coloración verdosa.

Figura 44. Afloramiento de Granito en la zona de estudio.



Se tomaron dos muestras de roca de la zona de estudio para realizar la descripción macroscópica que se muestra a continuación:

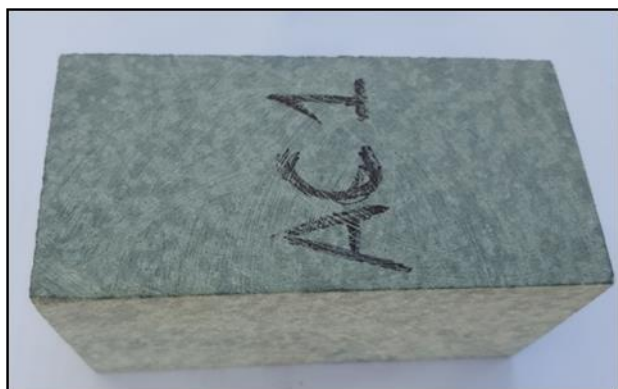


Código de Muestra 01: AC1

Lugar de muestreo: Quebrada Aguas Calientes aguas arriba del balneario

Textura: Afanítica. holocristalina, alotriomorfo en toda la muestra (cuarzo- feldespatos- plagioclasa y minerales Máficos). Su coloración es gris típico de una roca intermedia por la presencia de plagioclasas calco-sódicas y por el buen porcentaje de minerales ferromagnesianos.

Figura 45. Muestra Aguas Calientes 1.



Composición Mineralógica:

Minerales Principales:

- Cuarzo 4%
- Plagioclasa50%
- Máficos (anfíboles, micas).....30%
- Minerales Secundarios:
- Epidota.....16%

Tipo y Nombre de la roca:

Tipo: Ígnea-Intrusivo Hipabisal

Nombre: Microdiorita

Alteraciones:

Presencia de mineral secundario epidota posiblemente de la alteración de la plagioclasa.



Código de Muestra 02: AC2

Lugar de muestreo: Quebrada de Aguas Calientes aguas abajo del balneario

Textura: Fanerítica. holocrystalina, hipidiomorfo (cuarzo, feldespato- plagioclasas, feldespato potásico y mineral máfico). Es una roca leucocrata típica de una roca ácida.

Figura 46. Muestra Aguas Calientes 2.



Composición Mineralógica:

Minerales Principales:

- Cuarzo 38%
- Plagioclasa 35%
- Feldespato (K)..... 30%

Minerales Accesorios:

- Micas (biotita)..... 7%

Tipo y Nombre de la roca:

Tipo: Ígnea-Intrusivo

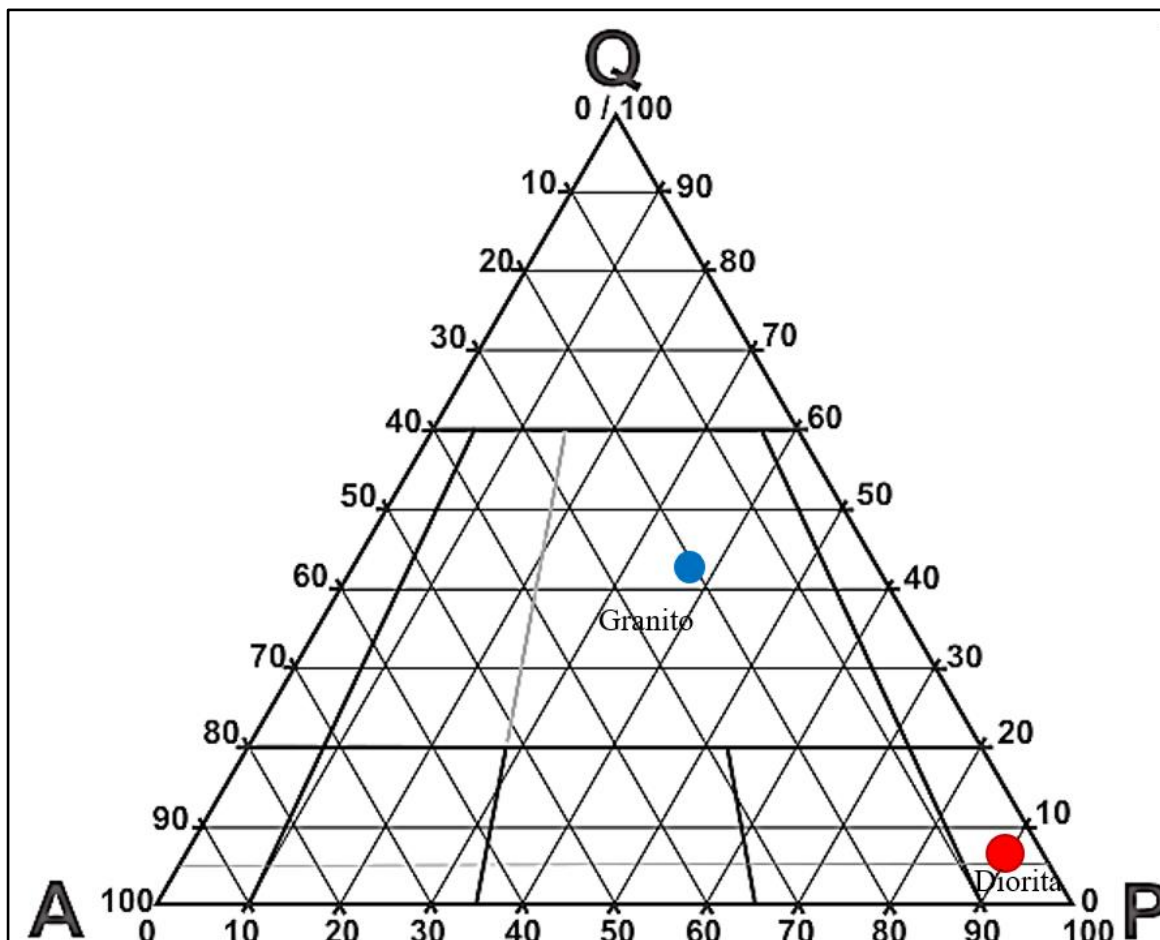
Nombre: Granito

Alteraciones:

No presenta ningún tipo de alteración toda la muestra.



Figura 47. Diagrama de STRECKEISEN, con la cual se clasifica la roca según su composición mineralógica de cuarzo, plagioclasa y feldespatos alcalinos.



Nota: Modificado de (Martínez Alfaro, Martínez Santos , & Castaño Castaño , 2006)



DESCRIPCION PETROGRAFICA MICROSCÓPICA

MUESTRA: AC3

1. **TEXTURA:** Subhedral granular de grano grueso a medio. Predominancia de cristales con caras medianamente desarrolladas. Como texturas especiales la microclina presenta la textura pertítica y esporádicamente la gráfica.

2. MINERALOGIA:

- **Cuarzo (SiO_2).** - Anhedral, intercrecido, granular e intersticial, con fracturas irregulares.
- **Microclina pertítica (KAlSi_3O_8).** - Subhedral > Anhedral, tabular, débilmente poiquilitica (contiene listones de plagioclasa y láminas de biotita).
- **Plagioclasa Na – Ca (oligoclasa) ($(\text{Na},\text{Ca})(\text{Si},\text{Al})_3\text{O}_8$).** - Euhedral a subhedral, tabular, con diferentes tipos de maclas, a veces zonada. Moderada a fuertemente alterada a sericita – arcilla, esté libre o incluida en la microclina.
- **Biotita ($\text{K}(\text{Mg},\text{Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$).** - Euhedral a subhedral, laminar, a veces contiene circón. Alterada moderadamente a óxidos de hierro (magnetita – hematita > clorita).

3. COMPOSICION MINERALOGICA

- **Cuarzo.....33%**
- **Microclina pertítica39%**
- **Plagioclasa Na-Ca.....19%**
- **Biotita..... 7%**
- **Otros (opacos, circón)..... 2%**

Total 100.00%

4. ORIGEN Y CLASIFICACIÓN DE LA ROCA

4.1. **Origen:** Ígnea – Intrusiva

4.2. **Clasificación:** Granito de biotita.

Figura 48. Sección Pulida de Granito.

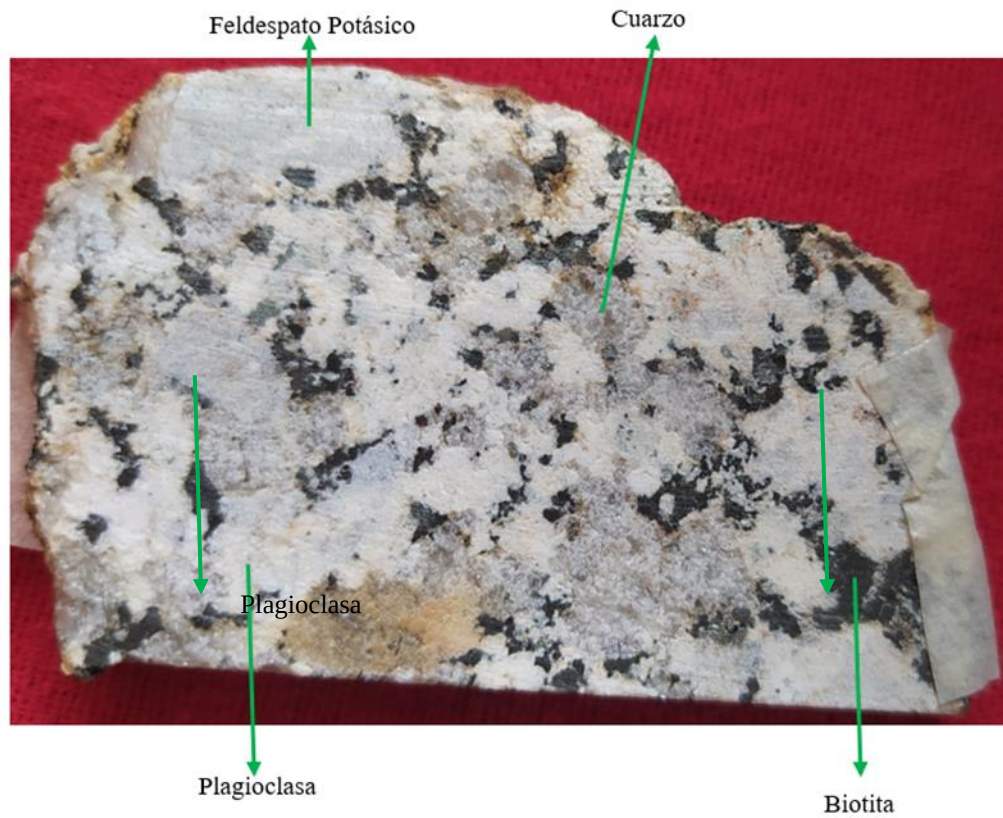




Figura 49. Microclina poiquilitica.

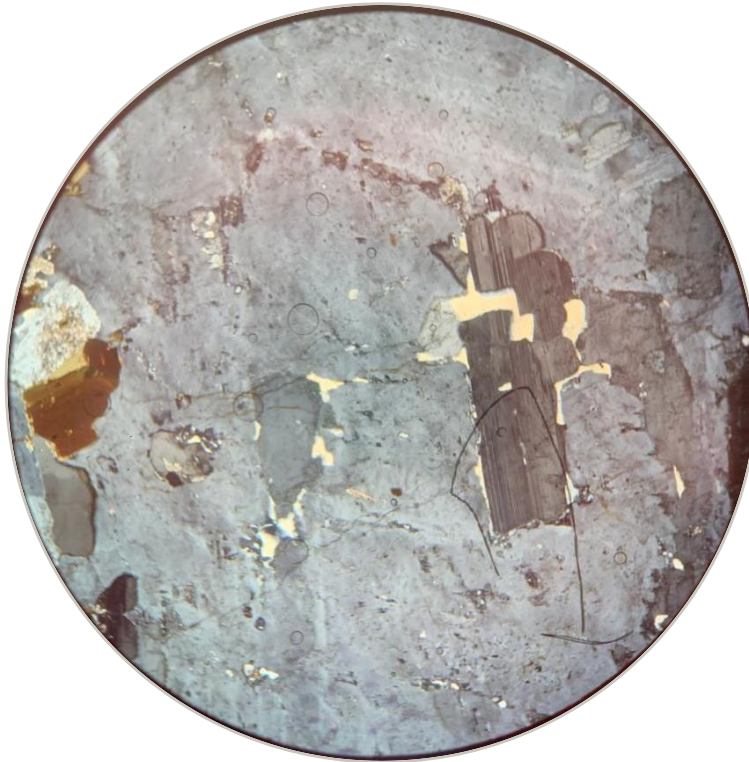


Figura 50. Biotitas aglomeradas con alteración a clorita.

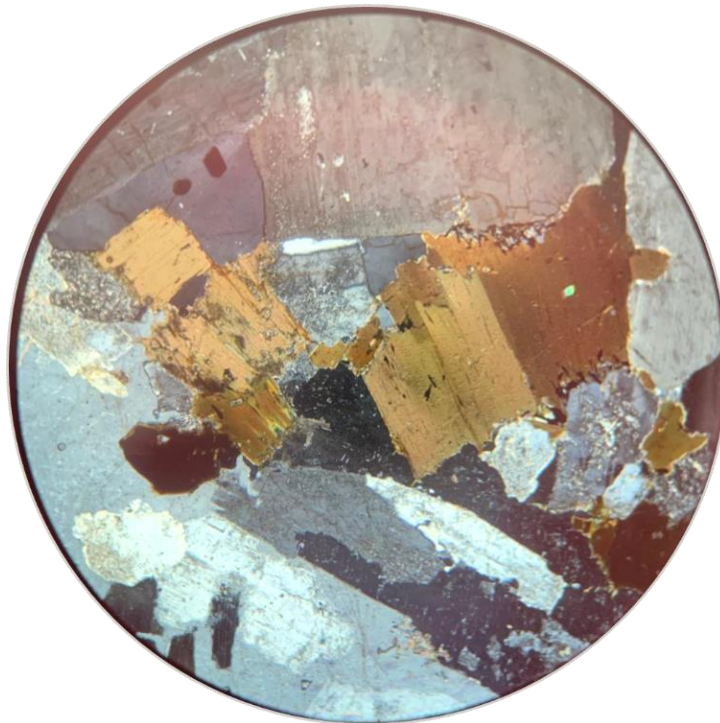


Figura 51. Plagioclasa alterada a sericita y circón.

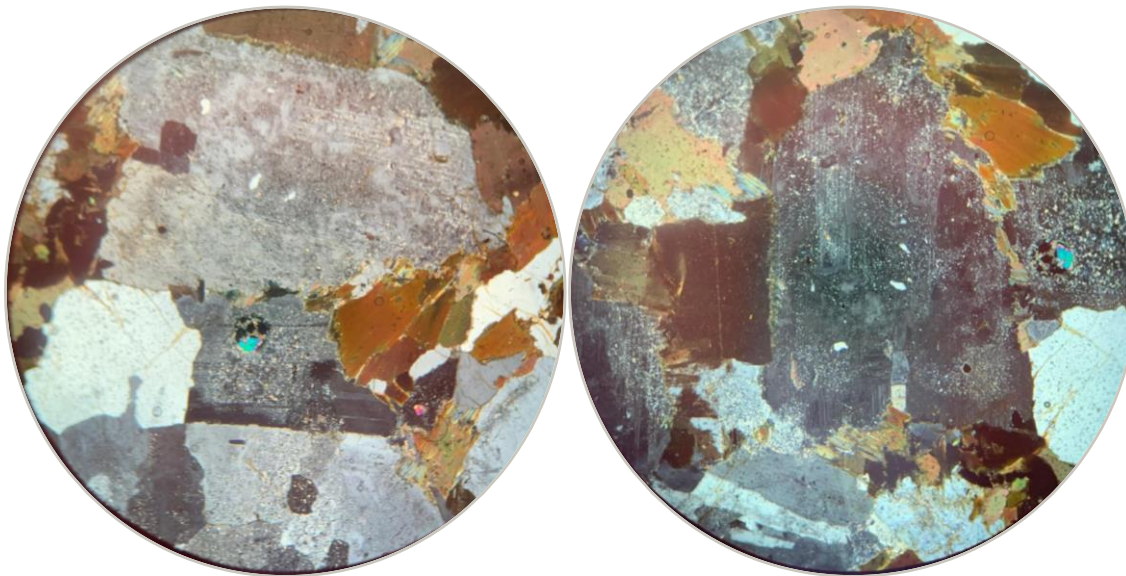
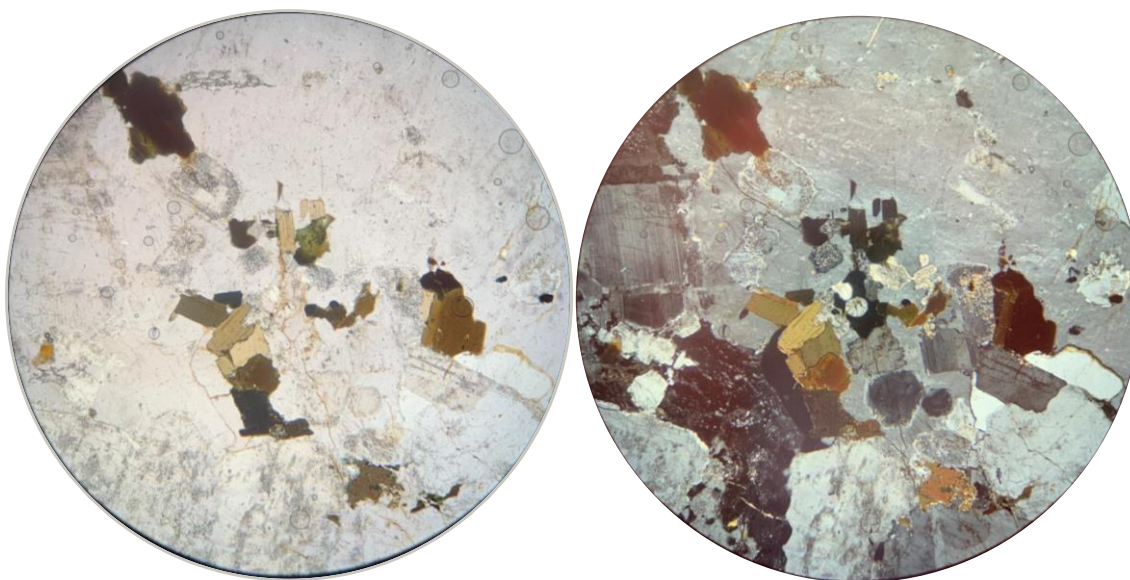


Figura 52. Cuarzo con fracturas irregulares.



4.2. Depósitos Coluviales:

Estas se han generado por deslizamiento y derrumbes antiguos ubicados en las laderas, donde el granito se encuentra erosionado y con formas angulares. Se encuentran algunos bloques de granitos, así como también se ha ubicado material descompuesto de rocas en gravas y bloques que con la gravedad han caído, también las zonas con abundante vegetación.

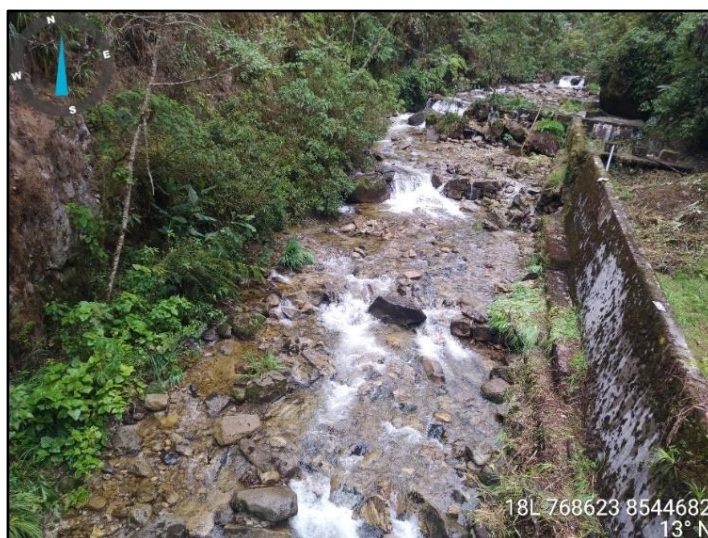
Figura 53. Depósito Coluvial.



4.3. Depósitos Fluviales:

Son depósitos cuaternarios ubicados a lo largo del trayecto del rio aguas calientes, Alcamayo, pero sobre todo en las márgenes del rio Urubamba que a lo largo de su trayecto erosiona y va depositando materiales sedimentarios como cantos, grava, y arena de granulometría variada.

Figura 54. Depósito Fluvial.

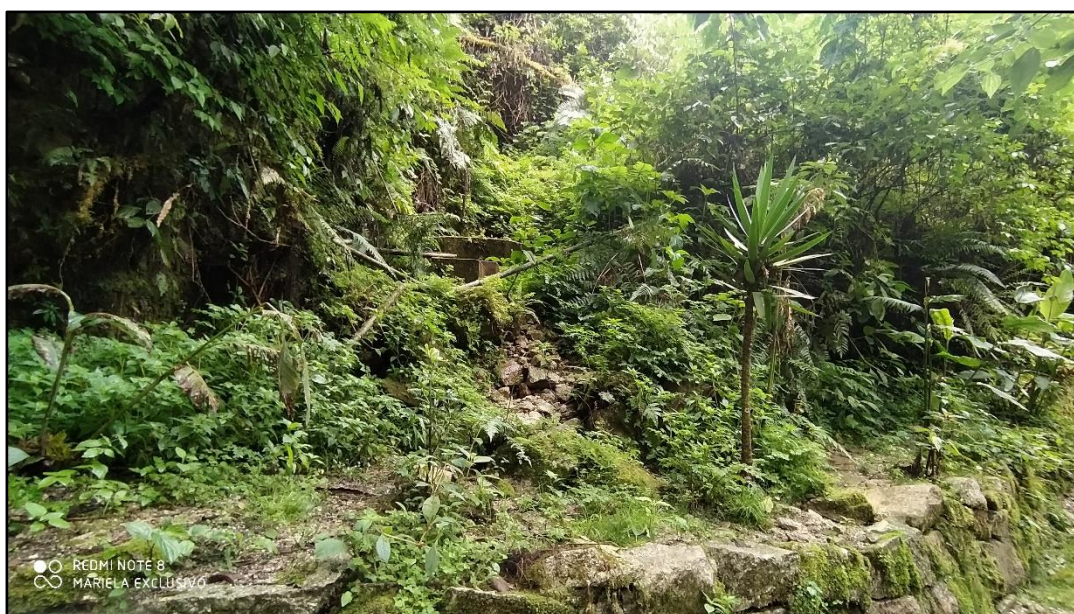


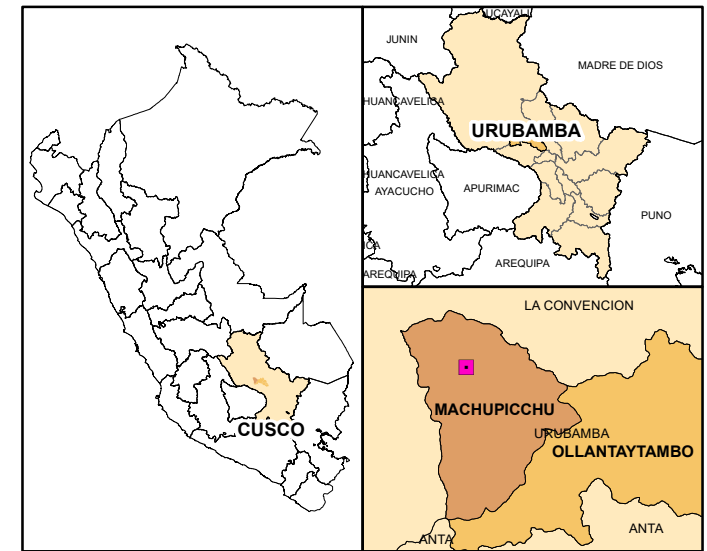
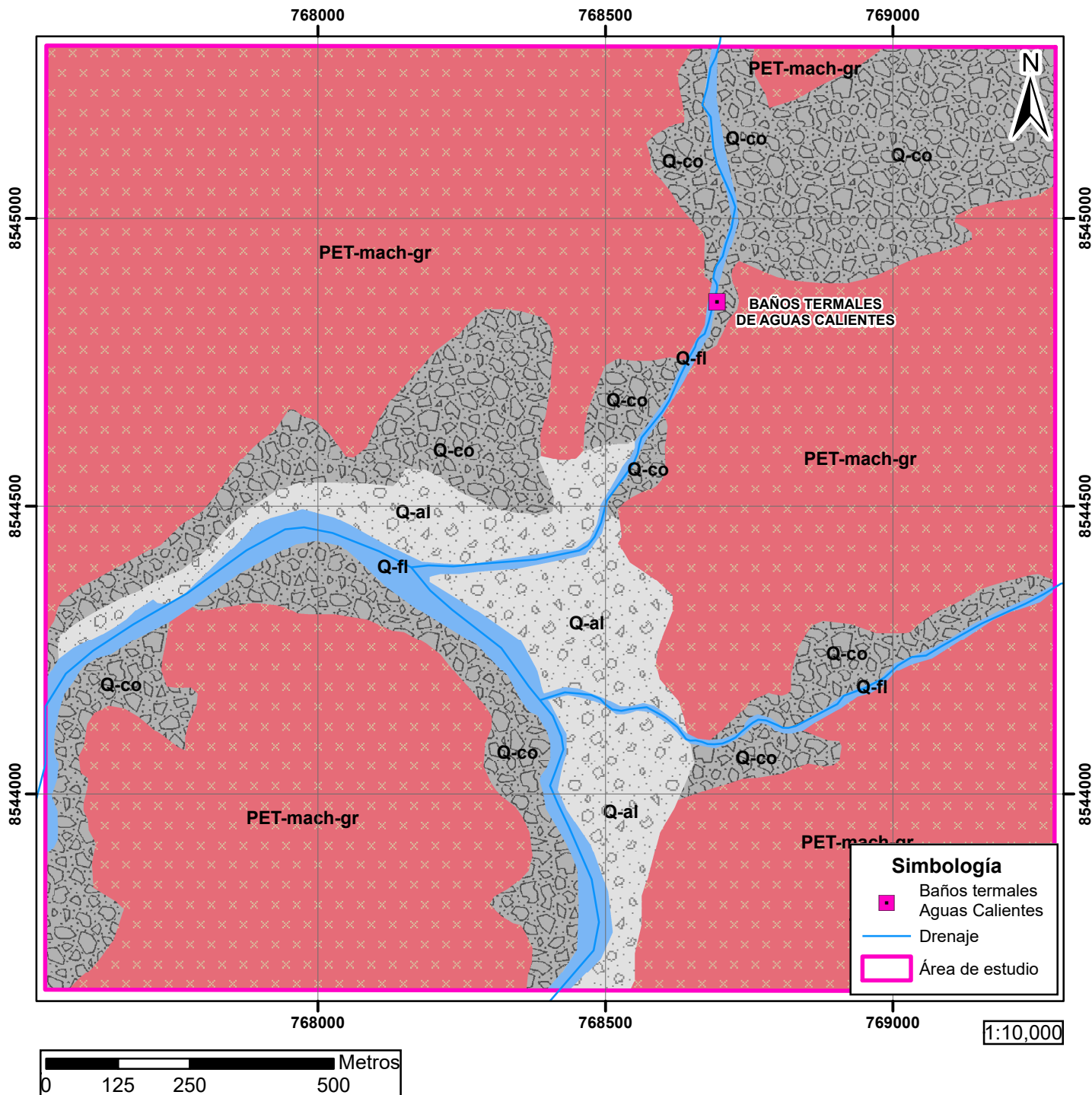


4.4. Depósitos Aluviales:

Estos depósitos están asociados a conos aluviales correspondientes principalmente a la desembocadura de los ríos de Aguas Calientes y Alcamayo adyacentes al valle del río Urubamba, específicamente donde se emplazó la población de aguas calientes se encuentra el abanico aluvial. Constituidas por bloques de material ígneo granítico con metros de diámetro aproximadamente, en una matriz areno arcillosa, los cuales son consecuencia de aluviones antiguos.

Figura 55.Depósito Aluvial.





ERATEMA	SISTEMA	SIMBOLOGÍA		UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	
CENOZOICO	CUATERNARIO		Qh-fl	Depósito fluvial	Cantos, gravas y arenas de granulometría variada.
			Qh-co	Depósito coluvial	Bloques de granito y gravas.
			Qh-al	Depósito aluvial	Bloques de material ígneo granítico de varios metros de diámetro.
MESOZOICO	CRETÁCICO		PET-mach-gr	Batolito de Machupicchu	Macizo rocoso granítico color blanco o gris. En algunas zonas microdiorita de coloración verdosa.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA			
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA			
TESIS: "CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y GEOMECANICA DE LOS BAÑOS TERMALES DE AGUAS CALIENTES DEL DISTRITO DE MACHUPICCHU, PROVINCIA DE URUBAMBA, REGION CUSCO"			
MAPA:	MAPA GEOLÓGICO LOCAL		ESCALA: INDICADA
ELABORADOR POR:	KATHERINE GUTIERREZ PERALTA - VANESSA I. VALVERDE GOYZUETA		MAPA N° 05
FUENTE DE DATOS:	ING. LÓPEZ ZAPANA RONALD LUIS		DATUM: WGS 1984_UTM_ZONA_18S



CAPITULO V: GEOLOGIA ESTRUCTURAL Y GEOMECANICA

La geología Estructural es crucial en el estudio de las aguas termales porque las estructuras geológicas como fallas, fracturas, plegamientos, etc. controlan el movimiento de agua subterránea, su recarga, aumento de temperatura y surgencia de las aguas termales. En las zonas de recarga (a gran altitud), las discontinuidades facilitan la infiltración del agua hacia zonas profundas, además, las fallas son los conductos principales para que las aguas alcancen grandes profundidades para tener mayor temperatura por el gradiente geotérmico. En las zonas de descarga la presencia de discontinuidades facilita el ascenso de las aguas hacia la superficie.

La geomecánica de rocas es importante en la surgencia de las aguas termales, debido a que en este capítulo podemos mostrar el grado de fracturamiento (RQD), condición de las discontinuidades para el flujo de aguas subterráneas (apertura, relleno, persistencia), presencia de agua, orientación de las discontinuidades en relación a la orientación de las principales estructuras geológicas locales y regionales.

5.1. CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES DEL BALNEARIO.

5.1.1. *Sistema de Fallas*

Como se ha visto en las características tectónicas, el batolito de Machupicchu en el que se encuentra los baños termales de aguas calientes, ha estado sometido a varios eventos tectónicos importantes, asociados a la subducción de la placa de Nasca ya la deflexión de Abancay, por lo cual en la zona de estudio se visualiza por lo menos tres sistemas de fallas con direcciones N-S, NO-SE Y E-O.



5.1.1.1. El sistema de fallas Norte – Sur (N-S):

Este sistema de fallas tiene una dirección preferente Norte-Sur, y su variación esta entre azimut 350°N a 10°N , cuyas inclinaciones son sub verticales hacia el oeste y hacia el este e indistintamente con valores superiores a los 70° en su mayoría. Este sistema está vinculada a la formación de la quebrada Aguas calientes.

Los dos taludes de la quebrada constituyen la zona de falla, es decir la amplitud de la quebrada constituye los límites de la falla, por ende, el curso del rio durante su socavación ha aprovechado áreas de debilidad y facilidad de erosión por el fuerte fracturamiento que presentan las zonas de falla, en este caso con la formación de bloques, cuñas caóticas que se han ido desmoronando paulatinamente, sea por los súbitos y violentos aluviones o por la erosión constante del río.

La evidencia de la dirección de este sistema de fallas es el resultado obtenido en la roseta de vientos, de las medidas tomadas en cada una de las estaciones microtectónicas seleccionada en cada lado de la quebrada



Figura 56. La roseta muestra la dirección preferencial NNE-SSO, de la EMT 1 ubicado en la margen derecha de la quebrada Aguas Calientes.

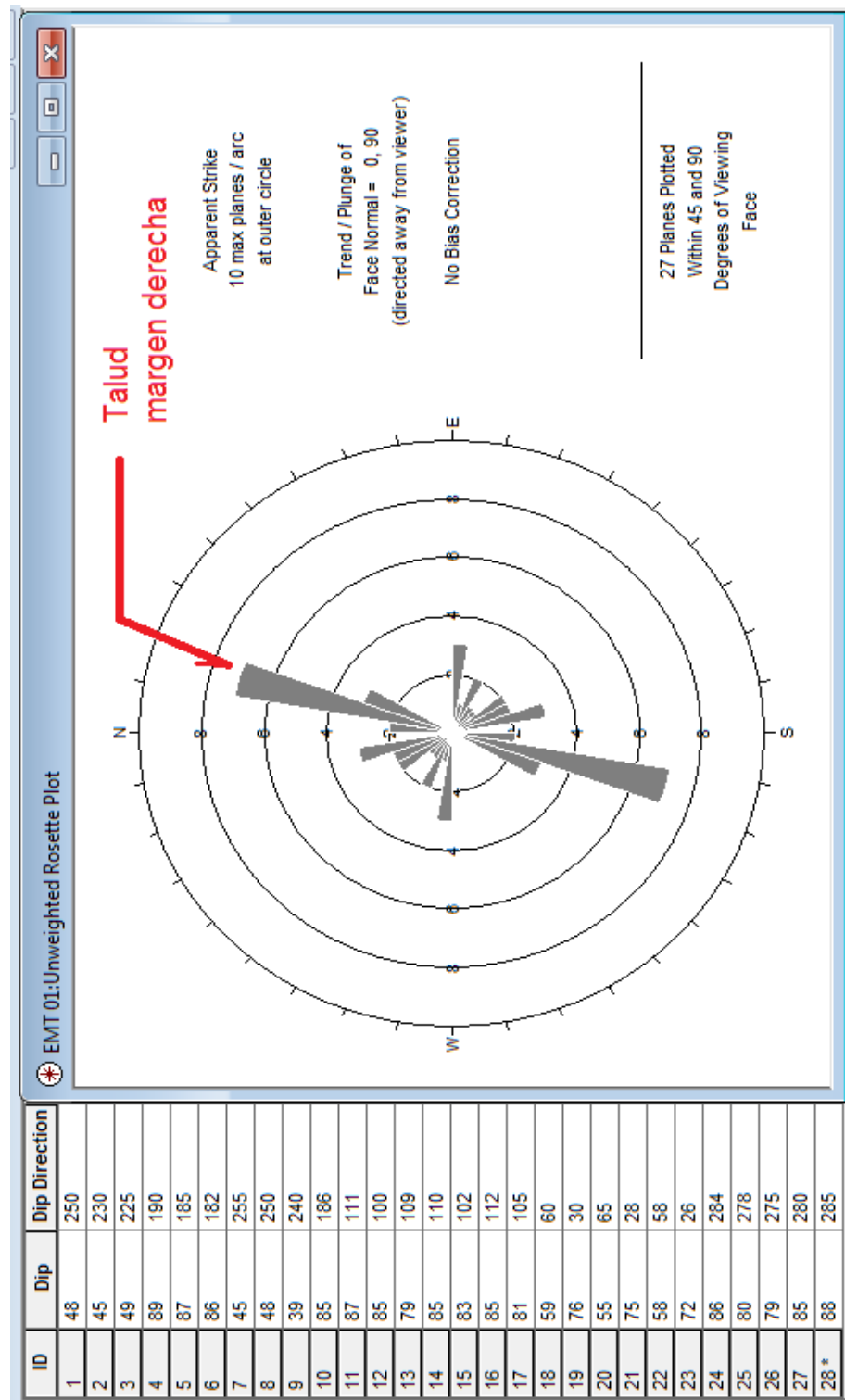
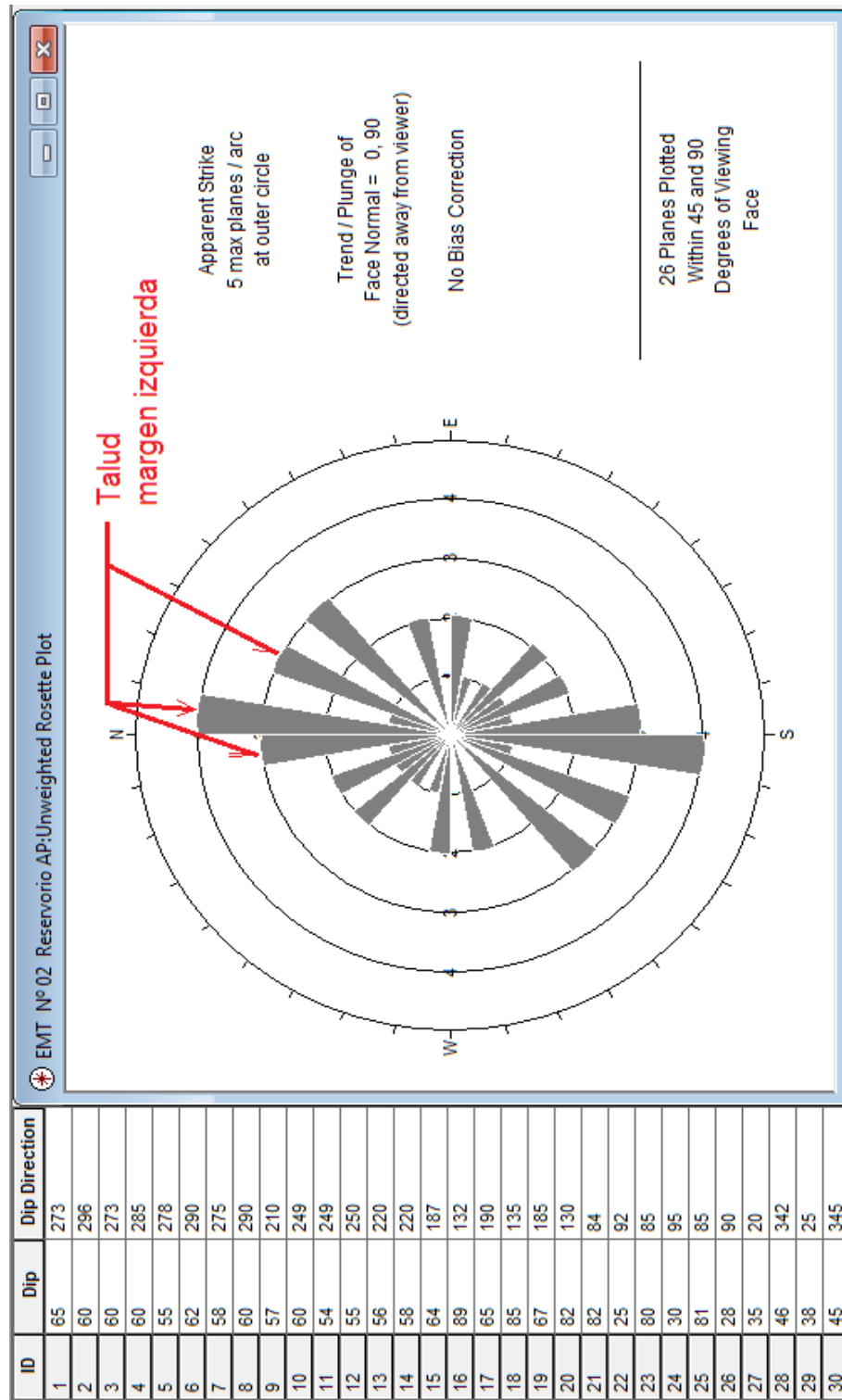




Figura 57. La roseta muestra la dirección preferencial N-S, de la EMT 2 ubicado en la margen izquierda de la quebrada Aguas Calientes.





5.1.1.2. El sistema de fallas Este – Oeste (O-E):

Este sistema de fallas tiene una dirección preferente O-E, siendo más precisos ONO-ESE, y su variación azimutal varía entre 90° N a 110° N, cuyas inclinaciones están en el rango de 50° a 80° en un 80%, y menores a 50° en un 20%, estas mediciones han sido realizadas en las proximidades del talud de la margen izquierda (EMT 3), encima del reservorio de agua potable, a la altura de la piscina N°4 (EMT 4) y en la zona de la pasarela de madera camino a la ciudad de Machupicchu (EMT 5).

Este sistema tiene una dirección perpendicular a la dirección de la quebrada, tienen la particularidad que conforman los saltos o pequeñas cascadas que se observan a lo largo de la quebrada.

A la altura de los baños termales, se evidencia que estas estructuras son las responsables de la surgencia de las aguas termales, tanto en la piscina N.º 4 y en el exterior del muro de gaviones, por donde existe sumideros identificados. Por tanto, se puede afirmar que este sistema de fallas son los que dan origen a la presencia de aguas termales en el balneario de aguas calientes. Estos sistemas son los que favorecen la circulación de los flujos subterráneos.



Figura 58. Esta Roseta muestra la dirección preferencial ONO-ESE en la EMT 3 ubicada en la margen izquierda encima del reservorio de agua potable.

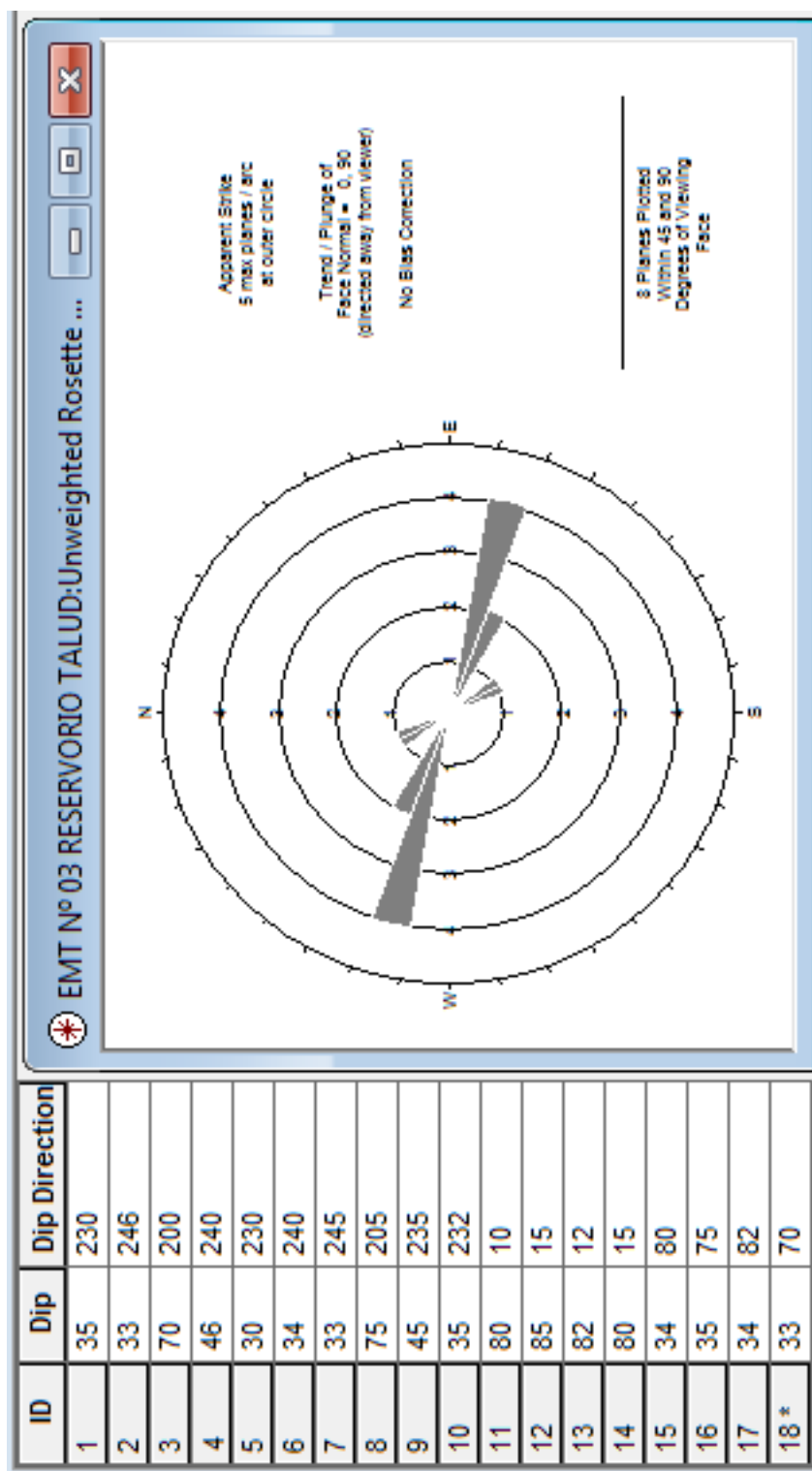




Figura 59. Esta Roseta muestra la dirección preferencial O-E en la EMT 4 ubicada en la
margen izquierda a la altura de la piscina N°4.

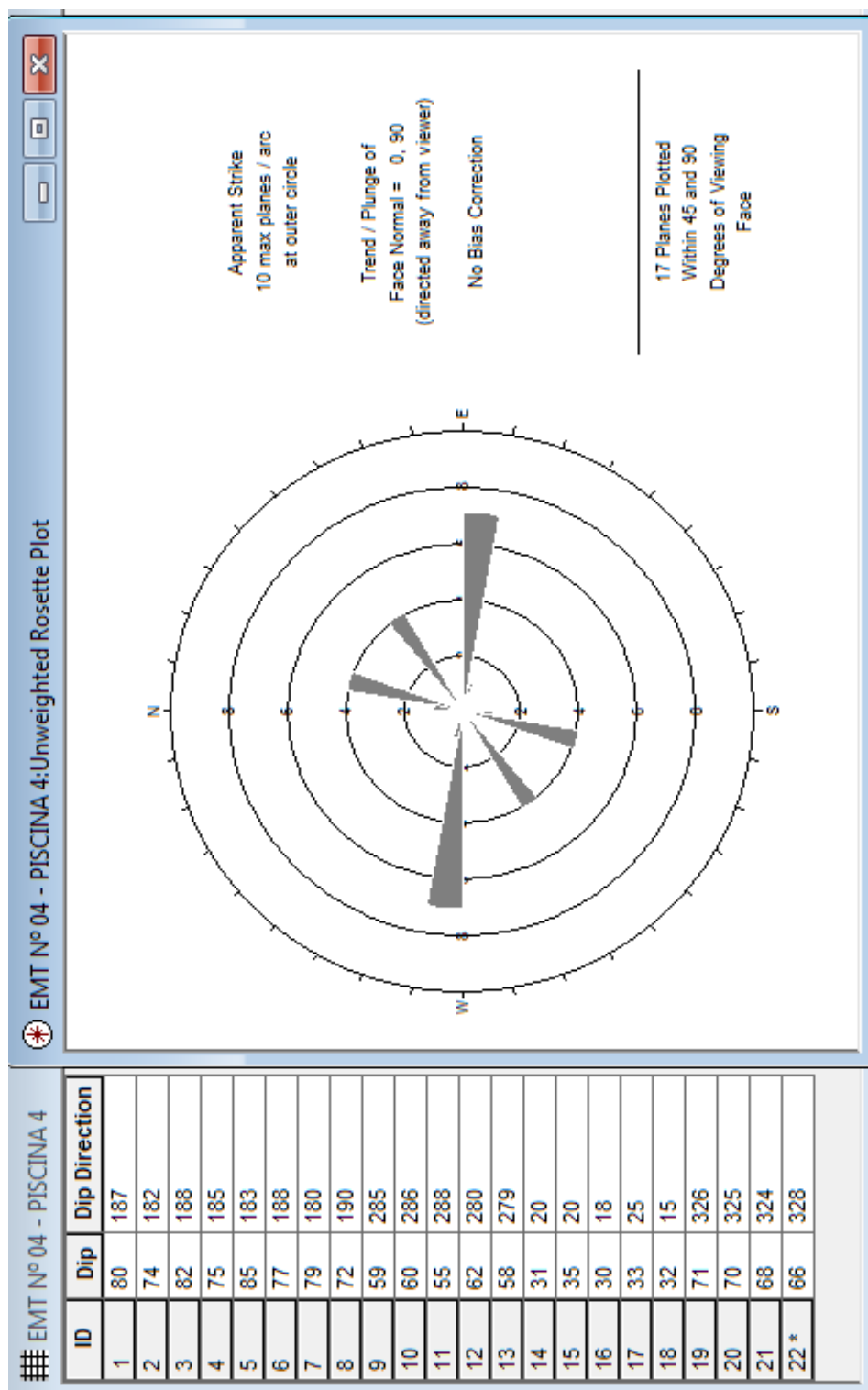
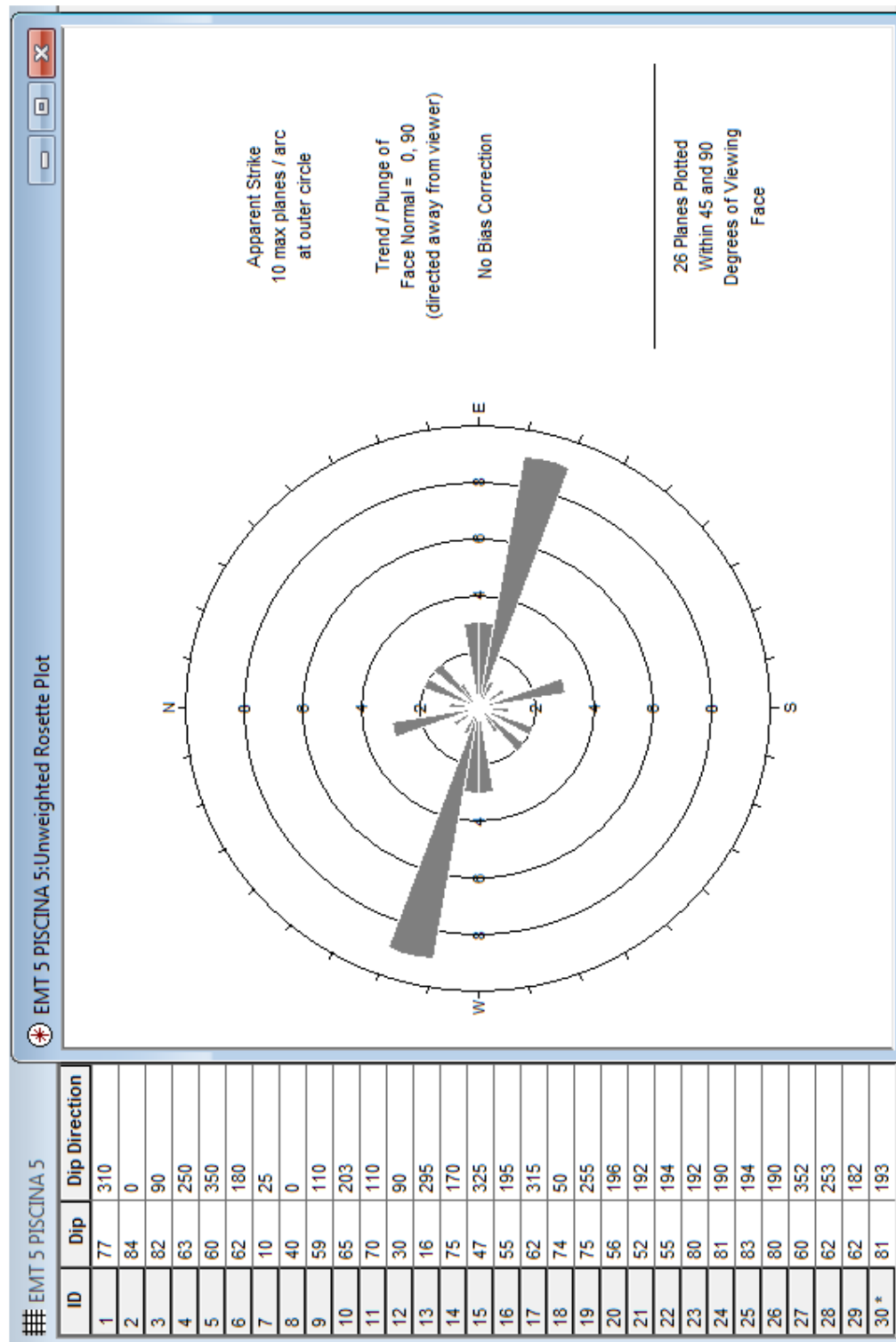


Figura 60. Esta Roseta muestra la dirección preferencial ONO-ESE en la EMT 5 ubicada en la margen izquierda en la pasarela de madera camino a Machupicchu.



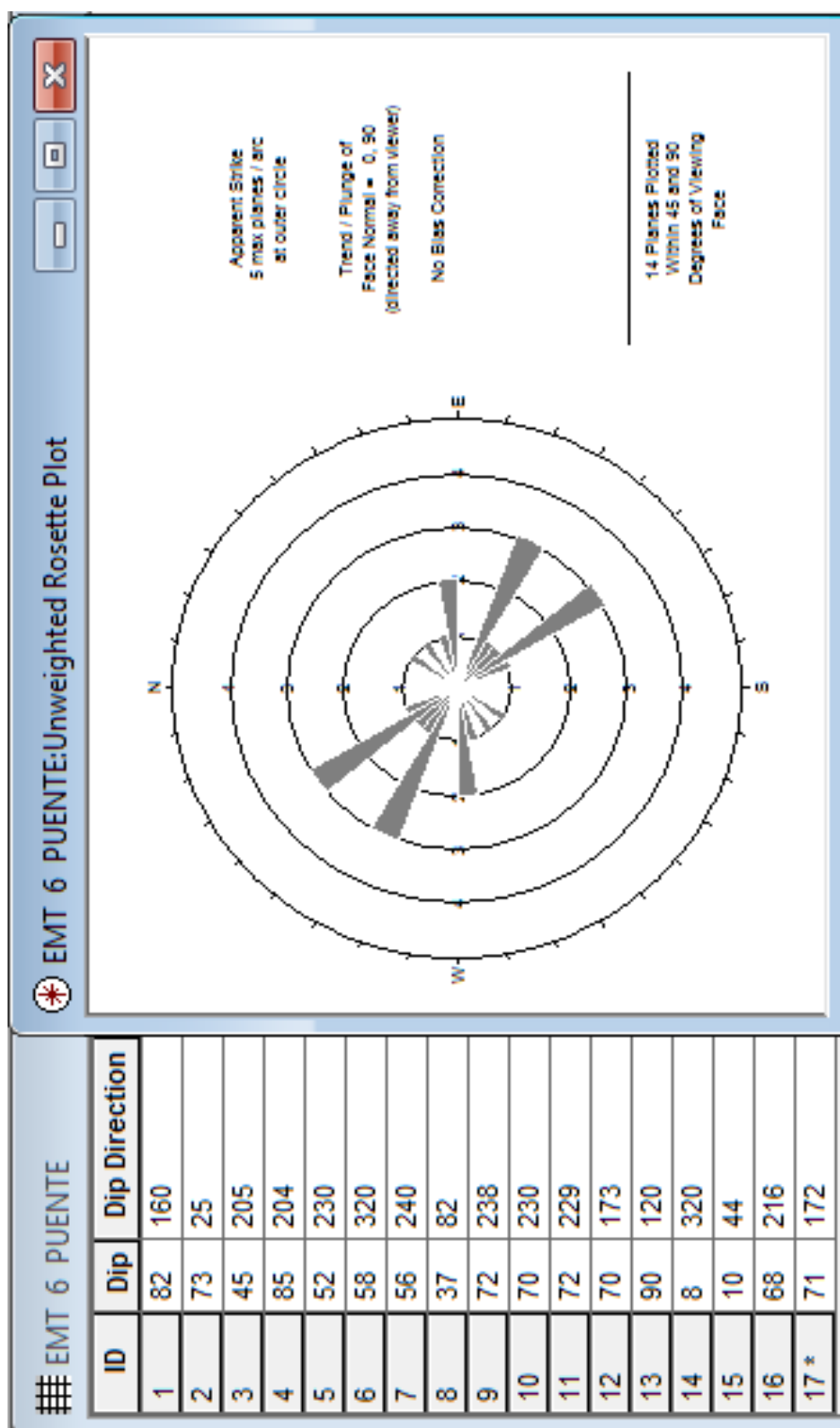


5.1.1.3. El sistema de fallas Noroeste – Sureste (NO-SE):

Este sistema de fallas tiene una dirección preferente Noroste – Sureste, y su variación azimutal esta entre 110°N a 140°N , con inclinaciones de alto grado, que oscilan entre 46° a 85° , están de alguna manera asociadas a las fallas ONO-SES, es decir son las que atraviesan el curso del río. Las mediciones han sido realizadas en la zona del puente de ingreso al balneario de aguas calientes, donde se observan estructuras que forman cuñas, este sistema de fallas son tipo normales.



Figura 61. Diagrama de roseta que muestra una dirección preferencial NO-SE en la EMT 6 ubicada en la zona del puente.



5.1.2. Sistema de Diaclasas

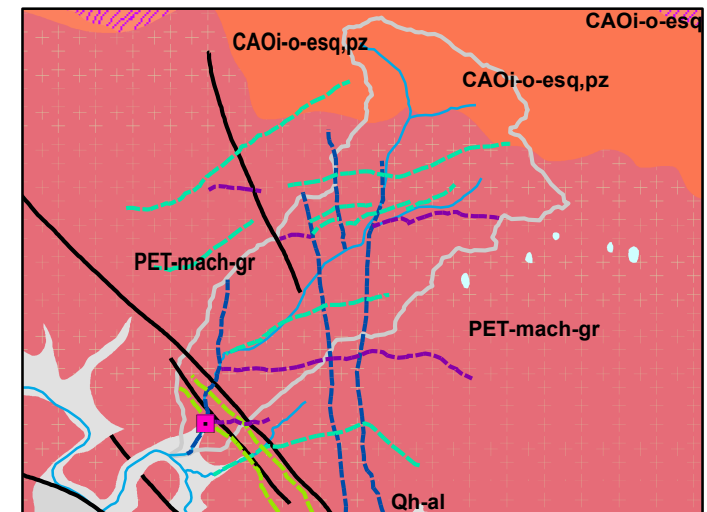
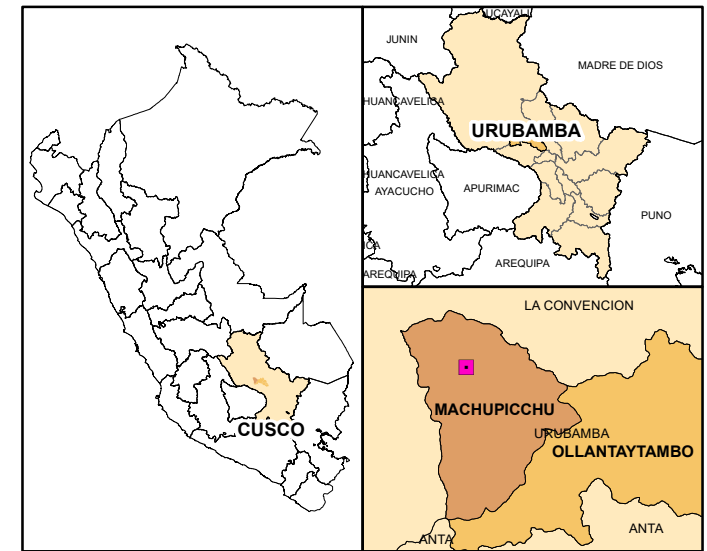
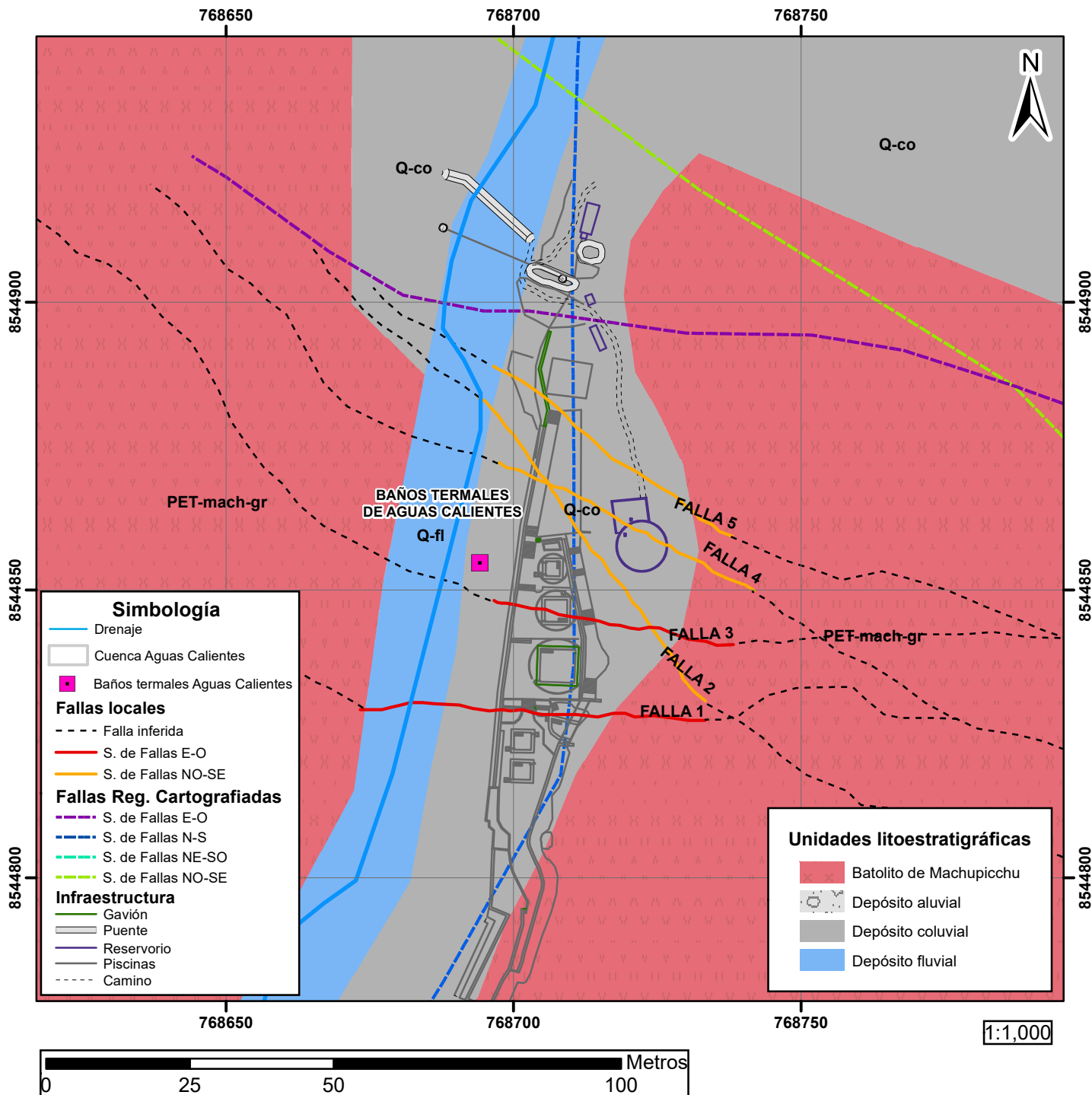
Los sistemas de diaclasas están relacionadas a los sistemas de fallas, estas se diferencian de las fallas porque no presentan movimiento o desplazamiento evidente, generalmente se observan en los planos de falla y en otras zonas por donde se asocia a la dirección de estructuras mayores (fallas) sin aberturas importantes, por ende, tienen direcciones similares.

La surgencia de aguas termales del balneario de Aguas Calientes, está asociado principalmente al sistema de fallas de dirección preferente O-E, y NO-SE, con buzamiento de alto grado superiores a los 50° en un 80% de los casos, estas inclinaciones pueden ser hacia el norte o sur de manera indistinta, es decir este sistema atraviesa perpendicular a la dirección del río aguas calientes.

El sistema de fallas N-S es un sistema posterior a los sistemas O-E y NO-SE, ya que se evidenció que corta a estas estructuras y sugiere límites de bloques estructurales que de alguna manera limitaría la presencia de las aguas termales al este, y el sistema más importante es la dirección de la falla O-E que parece ser la que beneficia la surgencia de aguas termales.

Figura 62. El S.F. N-S corta a las S.F. E-O, lo que significa que esta última es antecesor.





UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

TESIS: "CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y GEOMECANICA DE LOS BAÑOS TERMALES DE AGUAS CALIENTES DEL DISTRITO DE MACHUPICCHU, PROVINCIA DE URUBAMBA, REGION CUSCO"

MAPA: MAPA ESTRUCTURAL LOCAL

ESCALA: INDICADA

ELABORADOR POR:
KATHERINE GUTIERREZ PERALTA - VANESSA I. VALVERDE GOYZUETA

MAPA N°

FUENTE DE DATOS:
ING. LÓPEZ ZAPANA RONALD LUIS

DATUM:
WGS 1984_UTM_ZONA_18S

07



5.3. CARACTERÍSTICAS GEOMÉCANICAS

Se ha identificado Estaciones Micro-Tectónicas (EMT) ubicados en zonas estratégicas, tomando valores necesarios para valorar el macizo rocoso, con ello se calculó el coeficiente de permeabilidad secundaria indirecta.

5.3.1. Resistencia a la compresión simple para el macizo rocoso.

Para la determinación de la resistencia se ha realizado el ensayo de compresión simple (uniaxial) y se ha hecho uso de los códigos americano y del ISRM, cuyos resultados se muestra en el siguiente cuadro:

Figura 63. Resistencia a la compresión simple del macizo rocoso.

MUESTRA	CARGA (kg)	ÁREA (cm ²)	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (kg/cm ²)		RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Mpa
			CÓDIGO AMERICANO	ISRM	
AC-1	8085.65	25	323.43	289.92	31.66 Mpa

La resistencia a la compresión del macizo es de 31.66 Mpa.

5.3.2. Módulo de Elasticidad

El módulo de elasticidad estático del Granito es 1.7 a 7.7 x 10⁵ kg/cm². y el Coeficiente de Poisson 0.1 a 0.4 tal como se aprecia en la siguiente figura.



Figura 64. Resumen de Módulos de Elasticidad y de Poisson.

ROCA INTACTA	Modulo de elasticidad estatico(E kg/cm2	Modulo de elasticidad dinamico Ed Kg/cm2	Coefficiente de Poisson
Granito	(1,7-7,7)*10E5	(1,0-8,4)x1,0E5	0,1 -0,4

Fuente: (Gonzales de Vallejo, Ferrer , Ortuno, & Oteo, 2002)

5.3.3. Valoración del Macizo Rocosó (RMR)

Para determinar las características físicas mecánicas del terreno de fundación en la quebrada de Aguas Calientes se ha realizado la valoración del macizo rocoso, en seis estaciones micro-tectónicas. La primera estación (EMT 1), ubicada en la margen derecha del rio, específicamente a 200 m del puente de madera que se encuentra aguas arriba de los baños termales, la segunda (EMT 2) en el camino hacia el reservorio, la tercera encima del talud del reservorio (EMT 3), la cuarta a la altura de la piscina N.º 4 (EMT4), la quinta entre la piscina 4 y la piscina 6 (EMT 5) y la sexta en el puente de acceso al balneario de aguas calientes.

Estas han consistido en toma de datos de parámetros geomecánicas necesarios para la valoración del macizo rocoso por el método de RMR, los que se han pasado al Software DIP para su análisis. Se ha realizado un ensayo de resistencia uniaxial para lo cual se ha procedido al tallado de muestra para la rotura, valores que se han considerado para la valoración del macizo rocoso. La muestra ha sido obtenida en la zona de la EMT 3, cuyo valor ha sido considerado para todos los casos, dado que es un parámetro valido en el rango respectivo de valoración y que no influye en el resultado final.



Figura 65. Macizo rocoso en la entrada a la quebrada de aguas calientes, en la ETM 6, en las coordenadas UTM (Zona: 18L, Este: 768713, Norte: 8544850)

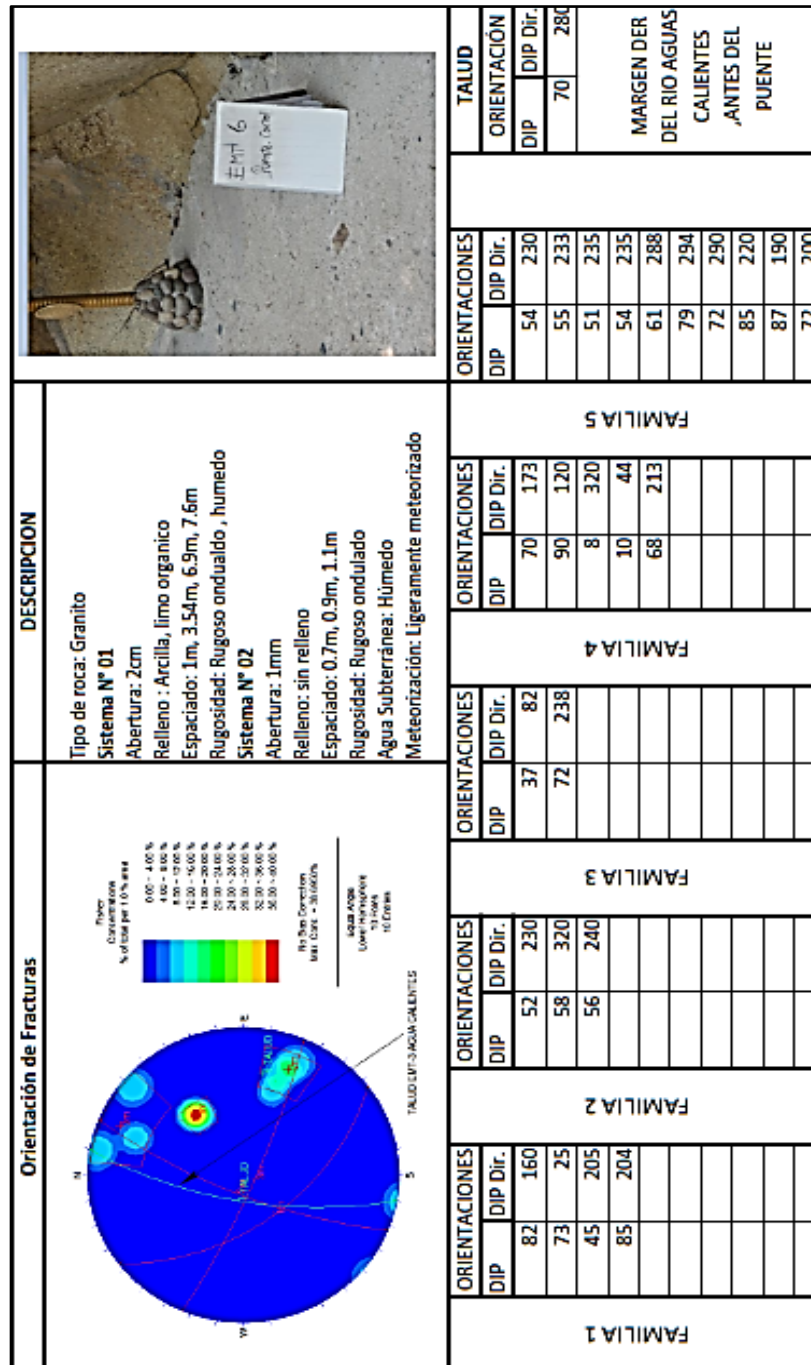




Figura 66. Clasificación del macizo rocoso en la EMT 1 según RMR.

EMT - 1		AGUAS CALIENTES				
Parámetros de Clasificación						
1	Resistencia de la matriz rocosa	Ensayo de carga puntual	Mpa			
		Compresión simple	31.7166	Mpa		
		Puntuación	4			
2		RQD	90-100%			
		Puntuación	20			
3		Separacion entre diaclasas	> 2m			
		Puntuación	20			
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de discontinuidad	1-3 m			
		Puntuación	4			
		Abertura	> 5 mm			
		Puntuación	0			
		Rugosidad	rugosa			
		Puntuación	5			
		Relleno	Relleno blando > 5mm			
		Puntuación	0			
		Alteración	lig alterada			
		Puntuación	5			
5	Agua freática	Caudal por 10 m de tunel				
		Relación presión de agua	0.1			
		Estado general	Lig Humedo			
		Puntuación	10			
Corrección por la orientación de las discontinuidades						
Direccion de buzamiento		Muy favo	Favo	Medias	Desfav	
Puntuación	Túneles			-5		
	Cimentaciones		-2			
	Taludes		-5			
Clasificación						
Clase		I	II	III	IV	V
Calidad		Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy Mala
Puntuación		100-81	80-61	60-41	40-21	< 20
			Túneles	Cimentac.	Taludes	
Puntuación del macizo			63	66	63	
			RMR		68	BUENA
			Para Cimentación		66	Buena
			Para Taludes		63	Buena

Figura 67. Se visualiza la estación Microtectónica EMT-1.





Figura 68. Clasificación del macizo rocoso en la EMT 2 según RMR.

EMT - 2		AGUAS CALIENTES				
Parámetros de Clasificación						
1	Resistencia de la matriz rocosa	Ensayo de carga puntual	Mpa			
		Compresión simple	31.7166 Mpa			
		Puntuación	4			
2		RQD	75-90%			
		Puntuación	17			
3		Separacion entre diaclasas	0.6-2m			
		Puntuación	15			
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de discontinuidad	1-3m			
		Puntuación	4			
		Abertura	> 5 mm			
		Puntuación	0			
		Rugosidad	Lig rugosa			
		Puntuación	3			
		Relleno	Relleno blando > 5mm			
		Puntuación	0			
		Alteración	lig alterada			
		Puntuación	5			
5	Agua freática	Caudal por 10 m de tunel				
		Relación presión de agua				
		Estado general	Humedo			
		Puntuación	7			
Corrección por la orientación de las discontinuidades						
Direccion de buzamiento		Muy favo	Favo	Medias	Desfav	
Puntuación	Túneles			-10		
	Cimentaciones		-2			
	Taludes		-5			
Clasificación						
Clase		I	II	III	IV	V
Calidad		Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy Mala
Puntuación		100-81	80-61	60-41	40-21	< 20
			Túneles	Cimentac.	Taludes	
Puntuación del macizo			45	53	50	
			RMR		55	MEDIA
			Para Cimentación		53	Media
			Para Taludes		50	Media



Figura 69. Se visualiza la estación Microtectónica EMT-2.





Figura 70. Clasificación del macizo rocoso en la EMT 3 según RMR.

EMT - 3		AGUAS CALIENTES				
Parámetros de Clasificación						
1	Resistencia de la matriz rocosa	Ensayo de carga puntual		Mpa		
		Compresión simple	31.7166	Mpa		
		Puntuación	2			
2		RQD	50-75 %			
		Puntuación	13			
3		Separacion entre diaclasas	0.6-0,2m			
		Puntuación	10			
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de discontinuidad	3-10m			
		Puntuación	2			
		Abertura	> 5 mm			
		Puntuación	0			
		Rugosidad	rugosa			
		Puntuación	5			
		Relleno	Relleno duro > 5mm			
		Puntuación	4			
		Alteración	lig alterada			
		Puntuación	5			
5	Agua freática	Caudal por 10 m de tunel				
		Relación presión de agua				
		Estado general	lig humedo			
		Puntuación	10			
Corrección por la orientación de las discontinuidades						
Direccion de buzamiento		Muy favo	Favo	Medias	Desfav	
Puntuación	Túneles			-5		
	Cimentaciones		-2			
	Taludes		-5			
Clasificación						
Clase		I	II	III	IV	V
Calidad		Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy Mala
Puntuación		100-81	80-61	60-41	40-21	< 20
			Túneles	Cimentac.	Taludes	
Puntuación del macizo			46	49	46	
			RMR		51	MEDIA
			Para Cimentación		49	Media
			Para Taludes		46	Media



Figura 71. Se visualiza la estación Microtectónica EMT-3.





Figura 72. Clasificación del macizo rocoso en la EMT 4 según RMR.

EMT - 4		AGUAS CALIENTES				
Parámetros de Clasificación						
1	Resistencia de la matriz rocosa	Ensayo de carga puntual	Mpa			
		Compresión simple	31.7166 Mpa			
		Puntuación	2			
2		RQD	50-75%			
		Puntuación	13			
3		Separacion entre diaclasas	0.2-0.06m			
		Puntuación	8			
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de discontinuidad	3-10m			
		Puntuación	2			
		Abertura	> 5 mm			
		Puntuación	0			
		Rugosidad	rugosa			
		Puntuación	5			
		Relleno	Relleno blando < 5mm			
		Puntuación	2			
		Alteración	lig alterada			
		Puntuación	5			
5	Agua freática	Caudal por 10 m de tunel				
		Relación presión de agua				
		Estado general	humedo			
		Puntuación	7			
Corrección por la orientación de las discontinuidades						
Direccion de buzamiento		Muy favo	Favo	Medias	Desfav	
Puntuación	Túneles			-5		
	Cimentaciones		-2			
	Taludes		-5			
Clasificación						
Clase		I	II	III	IV	V
Calidad		Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy Mala
Puntuación		100-81	80-61	60-41	40-21	< 20
			Túneles	Cimentac.	Taludes	
Puntuación del macizo			39	42	39	
			RMR		44	MEDIA
			Para Cimentación		42	Media
			Para Taludes		39	Mala



Figura 73. Se visualiza la estación microtectónica EMT-4.





Figura 74. Clasificación del macizo rocoso en la EMT 5 según RMR.

EMT - 5		AGUAS CALIENTES				
Parametros de Clasificación						
1	Resistencia de la matriz rocosa	Ensayo de carga puntual	Mpa			
		Compresión simple	31.7166 Mpa			
		Puntuación	12			
2		RQD	50-75%			
		Puntuación	13			
3		Separacion entre diaclasas	0.6-2,00 m			
		Puntuación	10			
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de discontinuidad	3-10m			
		Puntuación	2			
		Abertura	> 5 mm			
		Puntuación	0			
		Rugosidad	rugosa			
		Puntuación	5			
		Relleno	Relleno duro > 5mm			
		Puntuación	4			
		Alteración	lig alterada			
		Puntuación	5			
5	Agua freática	Caudal por 10 m de tunel				
		Relación presión de agua				
		Estado general	Humedo			
		Puntuación	7			
Corrección por la orientación de las discontinuidades						
Direccion de buzamiento		Muy favo	Favo	Medias	Desfav	
Puntuación	Túneles			-5		
	Cimentaciones		-2			
	Taludes		-5			
Clasificación						
Clase		I	II	III	IV	V
Calidad		Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy Mala
Puntuación		100-81	80-61	60-41	40-21	< 20
		Túneles	Cimentac.	Taludes		
Puntuación del macizo		53	56	53		
		RMR		58	MEDIA	
		Para Cimentación		56	Media	
		Para Taludes		53	Media	



Figura 75. Se observa la estación microtectónica EMT-5.





Figura 76. Clasificación del macizo rocoso en la EMT 6 según RMR.

EMT - 6		AGUAS CALIENTES				
Parámetros de Clasificación						
1	Resistencia de la matriz rocosa	Ensayo de carga puntual	Mpa			
		Compresión simple	31.7166 Mpa			
		Puntuación	4			
2		RQD	75 - 90 %			
		Puntuación	13			
3		Separacion entre diaclasas	0,6 2,0 m			
		Puntuación	15			
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de discontinuidad	3-10m			
		Puntuación	2			
		Abertura	> 5 mm			
		Puntuación	0			
		Rugosidad	Lig rugosa			
		Puntuación	3			
		Relleno	Relleno duro > 5mm			
		Puntuación	4			
		Alteración	lig alterada			
		Puntuación	5			
5	Agua freática	Caudal por 10 m de tunel				
		Relación presión de agua				
		Estado general	lig humedo			
		Puntuación	10			
Corrección por la orientación de las discontinuidades						
Direccion de buzamiento		Muy favo	Favo	Medias	Desfav	
Puntuación	Túneles			-5		
	Cimentaciones		-2			
	Taludes		-5			
Clasificación						
Clase		I	II	III	IV	V
Calidad		Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy Mala
Puntuación		100-81	80-61	60-41	40-21	< 20
			Túneles	Cimentac.	Taludes	
Puntuación del macizo			51	54	51	
			RMR		56	MEDIA
			Para Cimentación		54	Media
			Para Taludes		51	Media

Figura 77 Se observa la estación microtectónica EMT-6.



En el siguiente cuadro se resume los valores del macizo rocoso en la quebrada de Aguas Calientes, habiéndose obtenido valores para la cimentación y para el comportamiento del talud, calificando en la mayoría de casos como una roca de calidad buena y media, de clase II y Clase III, a excepción de la EMT 4 que tiene mala calidad para taludes. La valoración de acuerdo al método RMR de Bieniawski se encuentra entre 42 y 66 puntos.



Figura 78. Resumen de la calidad del macizo rocoso en las seis EMT.

ESTACIONES MICRO-TECTÓNICAS	CALIDAD DEL MACIZO ROCOSO	CLASE	VALORACIÓN
EMT 1	BUENA	II	68
EMT 2	MEDIA	III	55
EMT 3	MEDIA	III	51
EMT 4	MEDIA	III	44
EMT 5	MEDIA	III	58
EMT 6	MEDIA	III	56

Figura 79. Calidad del Macizo rocoso en relación al RMR.

Clase	Calidad	Valoración RMR	Cohesión	Ángulo de rozamiento
I	Muy Buena	100-81	$> 4 \text{ kg/cm}^2$	$> 45^\circ$
II	Buena	80-61	$3-4 \text{ kg/cm}^2$	$35^\circ-45^\circ$
III	Media	60-41	$2-3 \text{ kg/cm}^2$	$25^\circ-35^\circ$
IV	Mala	40-21	$1-2 \text{ kg/cm}^2$	$15^\circ-25^\circ$
V	Muy mala	< 20	$< 1 \text{ kg/cm}^2$	$< 15^\circ$

Fuente: (Gonzales de Vallejo, Ferrer , Ortuno, & Oteo, 2002)

De la figura anterior podemos decir que para el macizo rocoso que se presenta en el Balneario de Aguas Calientes el ángulo de fricción va de 25° a 35° para el macizo de clase III y de 35° a 45° para el macizo de clase II.



5.3.4. Valoración del Macizo rocoso mediante el Slope Mass Rating (SMR)

El sistema de clasificación geomecánica “Slope Mass Rating (SMR)” es la adaptación del RMR de Bieniawski con aplicación a los taludes mediante la siguiente fórmula:

$$\text{SMR} = \text{RMR} + (\text{F}_1 * \text{F}_2 * \text{F}_3) + \text{F}_4$$

Siendo F1, F2, F3 y F4 factores de ajuste de las juntas (discontinuidades).

F1: Este factor depende de la dirección de buzamiento del talud y la dirección de buzamiento de las juntas (discontinuidades). Este factor me indica que tan paralelo se encuentran estas direcciones. Cuando ambas direcciones son completamente paralelas (0° de diferencia) tiene un valor de 1.00.

F2: Este valor es el buzamiento de la junta) discontinuidad en la rotura plana. Mientras el buzamiento sea mayor el valor se aproxima a 1.00.

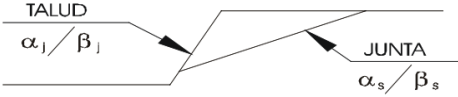
F3: en roturas planas es un valor que se deriva de la diferencia entre los buzamientos de la junta (discontinuidad) y del talud, generalmente son valores negativos, y en roturas tipo vuelco es la suma de los buzamientos.

F4: Es el factor de ajuste que se emplea de acuerdo al método de excavación de talud, dentro de los cuales tenemos: talud natural, precorte, voladura suave, voladura o excavación mecánica y voladura deficiente.

En la Figura X. podemos observar todos los casos en la cual varía los datos de los factores de ajuste de las juntas (discontinuidades), en la que se resalta dos mecanismos de rotura: rotura planar y rotura en vuelco.



Figura 80. Factores de ajuste de la Clasificación SMR.

SMR = RMR_b + (F₁ x F₂ x F₃) + F₄ (ROMANA, 1985)					
FACTORES DE AJUSTE DE LAS JUNTAS (F ₁ , F ₂ , F ₃)			α_j = DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO DE LA JUNTA α_s = DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO DEL TALUD β_j = BUZAMIENTO DE LA JUNTA β_s = BUZAMIENTO DEL TALUD		
	MUY FAVORABLE	FAVORABLE	NORMAL	DESFAVORABLE	MUY DESFAVORABLE
ROTURA PLANA $ \alpha_j - \alpha_s =$	> 30°	30° - 20°	20° - 10°	10° - 5°	< 5°
VUELCO $ \alpha_j - \alpha_s - 180° =$	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
VALORES					
AJUSTE ANALÍTICO	$F_1 = (1 - \sin \alpha_j - \alpha_s)^2$				
VALORES	$ \beta_j =$	< 20°	20° - 30°	30° - 35°	35° - 45°
	ROTURA PLANA	0.15	0.40	0.70	0.85
VUELCO					1.00
VALORES					
AJUSTE ANALÍTICO	$F_2 = \lg^2 \beta_j$				
ROTURA PLANA $\beta_j - \beta_s =$	> 10°	10° - 0°	0°	0° - (-10°)	< (-10°)
VUELCO $\beta_j + \beta_s =$	< 110°	110° - 120°	> 120°	-	-
VALORES	0	- 6	- 25	- 50	- 60
AJUSTE ANALÍTICO	$F_3 =$ (SE MANTIENEN LOS VALORES PROPUESTOS POR BIENIAWSKI, 1976 / 79)				
FACTOR DE AJUSTE POR EL MÉTODO DE EXCAVACIÓN	$F_4 =$ VALORES EMPÍRICOS ESTABLECIDOS PARA CADA MÉTODO DE EXCAVACIÓN				
	TALUD NATURAL	PRECORTE	VOLADURA SUAVE	VOLADURA ó MECÁNICO	VOLADURA DEFICIENTE
	+ 15	+ 10	+ 8	0	- 8

Fuente: (Romana, 1997)

Figura 81. Valores del SRM para cada forma de rotura.

VALORES DEL SMR PARA CADA FORMA DE ROTURA (EMPÍRICOS)																				
ROTURAS PLANAS					MUY GRANDES				IMPORTANTES				NINGUNA							
ROTURAS EN CUNA									MUCHAS				ALGUNAS				MUY POCAS		NINGUNA	
ROT. POR VUELCO					IMPORT.								MENORES				NINGUNA			
ROT. COMPLETAS		POSIBLES													NINGUNA					
SMR →	0	10	15	20	30	40	45	50	55	60	65	70	75	80	90	100				
REEXCAVACIÓN	REEXCAVACIÓN MUROS DE CONTENCIÓN																			
DRENAJE	DRENAJE SUPERFICIAL DRENAJE PROFUNDO																			
HORMIGÓN	HORMIGÓN PROYECTADO HORMIGÓN DENTAL CONTRAFUERTES y/o VIGAS MUROS DE PIE																			
REFUERZO	BULONES ANCLAJES																			
PROTECCIÓN	ZANJA DE PIE VALLAS (DE PIE O DE TALUD) REDES y/o MALLAS (DE TALUD)																			
SIN SOSTENIMIENTO													SANEO NINGUNO							
MÉTODOS DE SOSTENIMIENTO SUGERIDOS																				

Fuente: (Gonzales de Vallejo, Ferrer , Ortuno, & Oteo, 2002)



1) Estación Microtectónica 1 (EMT 1) – Margen derecha del río

En esta estación Microtectónica EMT 1 se ha considerado 3 familias de juntas (discontinuidades), de las cuales todas poseen una rotura planar, esto es importante debido a que las direcciones de buzamiento tienen más o menos una dirección preferente relacionada.

Figura 82. Clasificación SRM de la familia S1 del macizo rocoso en la EMT 1.

Datos Iniciales (EMT 1)	RMR:		63	
	Talud:	Dir. Buz = 100°	Juntas S1: (Familia 1)	Dir. Buz = 109°
		Buz.= 80°		Buz.= 79°



α_j = DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO DE LA JUNTA

α_s = DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO DEL TALUD

β_j = BUZAMIENTO DE LA JUNTA

β_s = BUZAMIENTO DEL TALUD

Factor	Caso		Valor	Denominación
Factor de ajuste por la orientación de las juntas	Planar	$ \alpha_j - \alpha_s = 9^\circ$	F1=0.85	Desfavorable
	Planar	$ \beta_j = 79^\circ$	F2=1.0	Muy desfavorable
	Planar	$\beta_j - \beta_s = -1^\circ$	F3= -50	Desfavorable
Factor de ajuste por metodo de excavación			F4= +15	Talud Natural

SMR = RMR + (F1*F2*F3)+F4		SMR:	35.5
Clase:	IV	Estabilidad:	Inestable
Descripción:	Mala	Tratamiento:	Corrección



En la Figura 83., se obtuvo en $SMR=35.5$ de la familia 1, este valor es exacerbado por el paralelismo entre la dirección de buzamiento de la junta y del talud además que los buzamientos son muy similares. lo que en términos de estabilidad indica que es “inestable”. Para la familia 2., (ver Figura 84) el $SMR=77.1$ indica “estabilidad”, principalmente por que la dirección de buzamiento de la junta y el talud son casi perpendiculares.

Figura 83. Clasificación SRM de la familia S2 del macizo rocoso en la EMT 1.

Datos Iniciales (EMT 1)	RMR:		63	
	Talud:	Dir. Buz = 100°	Juntas S2: (Familia 2)	Dir. Buz = 186°
		Buz.= 80°		Buz.= 85°
 α_j = DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO DE LA J UNTA α_s = DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO DEL TALUD β_j = BUZAMIENTO DE LA J UNTA β_s = BUZAMIENTO DEL TALUD				
Factor	Caso		Valor	Denominación
Factor de ajuste por la orientación de las juntas	Planar	$ \alpha_j - \alpha_s = 86^\circ$	F1=0.15	Muy favorable
	Planar	$ \beta_j = 85^\circ$	F2=1.0	Muy desfavorable
	Planar	$\beta_j - \beta_s = 5^\circ$	F3= -6	Favorable
Factor de ajuste por metodo de excavación			F4= +15	Talud Natural
SMR = RMR + (F1*F2*F3)+F4			SMR:	77.1
Clase: II		Estabilidad:	Estable	
Descripción: Buena		Tratamiento:	Sistemático	



La familia 3. (Ver Figura 85), de la estación Microtectónica 1, posee un SMR=69, lo que le clasifica como talud “estable”, principalmente porque la dirección de buzamiento es muy grande, que hasta podría considerarse dirección de buzamientos opuestos. De las tres familias descritos anteriores, se concluye que sólo la familia 1 es la inestable, para lo cual es de prioridad corregir la inestabilidad del talud en este punto.

Figura 84. Clasificación SRM de la familia S3 del macizo rocoso en la EMT 1.

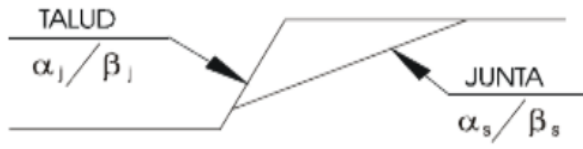
Datos Iniciales (EMT 1)	RMR:		63	
	Talud:	Dir. Buz = 100°	Juntas S3: (Familia 3)	Dir. Buz = 250°
		Buz.= 80°		Buz.= 48°
 αj = DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO DE LA J UNTA αs = DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO DEL TALUD βj = BUZAMIENTO DE LA J UNTA βs = BUZAMIENTO DEL TALUD				
Factor	Caso		Valor	Denominación
Factor de ajuste por la orientación de las juntas	Planar	αj - αs = 150°	F1=0.15	Muy favorable
	Planar	βj = 48°	F2=1.0	Muy desfavorable
	Planar	βj - βs = -32°	F3= -60	Desfavorable
Factor de ajuste por metodo de excavación			F4= +15	Talud Natural
SMR = RMR + (F1*F2*F3)+F4			SMR:	69
Clase: II		Estabilidad: Estable		
Descripción: Buena		Tratamiento: Sistemático		



2) Estación Microtectónica 2 (EMT 2) – Margen izquierda del río

En esta estación Microtectónica MT2 se ha considerado 3 familias de juntas (discontinuidades), de las cuales 2 familias poseen una rotura planar y 1 familia posee rotura en vuelco. Las dos primeras familias no poseen paralelismo, y la familia 3 posee paralelismo, sin embargo, estas direcciones de buzamientos son contrarias.

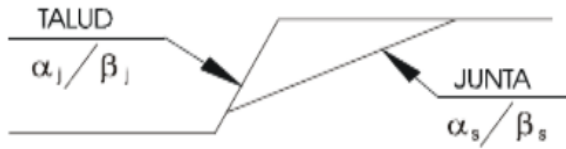
Figura 85. Clasificación SRM de la familia S1 del macizo rocoso en la EMT 2.

Datos Iniciales (EMT 2)	RMR:		50	
	Talud:	Dir. Buz = 278°	Juntas S1: (Familia 1)	Dir. Buz = 187°
		Buz.= 70°		Buz.= 64°
 α_j = DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO DE LA J UNTA α_s = DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO DEL TALUD β_j = BUZAMIENTO DE LA J UNTA β_s = BUZAMIENTO DEL TALUD				
Factor	Caso		Valor	Denominación
Factor de ajuste por la orientación de las juntas	Planar	α _j - α _s = 91°	F1=0.15	Muy favorable
	Planar	β _j = 64°	F2=1.0	Muy desfavorable
	Planar	β _j - β _s = -6°	F3= -50	Desfavorable
Factor de ajuste por metodo de excavación			F4= +15	Talud Natural
SMR = RMR + (F1*F2*F3)+F4			SMR:	57.5
Clase: III		<u>Estabilidad:</u> Parcialmente estable		
Descripción: Normal		<u>Tratamiento:</u> Sistemático		



En la Figura 86., se obtuvo en $SMR=57.5$ de la familia 1, valor que se considera “Parcialmente estable”, esto debido principalmente a que las direcciones de buzamientos de la junta y del talud son perpendiculares. Para la familia 2., (ver Figura 87) el $SMR=35.5$ indica “Inestabilidad”, principalmente por el alta pendiente que posee el buzamiento de la pendiente.

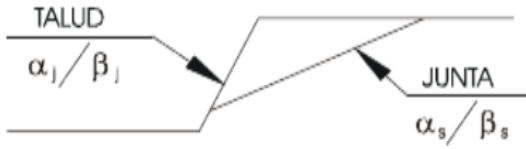
Figura 86. Clasificación SRM de la familia S2 del macizo rocoso en la EMT 2.

Datos Iniciales (EMT 2)	RMR:		50	
	Talud:	Dir. Buz = 278°	Juntas S2: (Familia 2)	Dir. Buz = 135°
		Buz.= 70°		Buz.= 85°
 α_j = DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO DE LA JUNTA α_s = DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO DEL TALUD β_j = BUZAMIENTO DE LA JUNTA β_s = BUZAMIENTO DEL TALUD				
Factor	Caso		Valor	Denominación
Factor de ajuste por la orientación de las juntas	Planar	$ \alpha_j - \alpha_s = 53^\circ$	F1=0.85	Desfavorable
	Planar	$ \beta_j = 85^\circ$	F2=1.0	Muy desfavorable
	Planar	$\beta_j - \beta_s = 15^\circ$	F3= -50	Desfavorable
Factor de ajuste por metodo de excavación			F4= +15	Talud Natural
SMR = RMR + (F1*F2*F3)+F4			SMR:	35.5
Clase:	IV	Estabilidad:	Inestable	
Descripción:	Mala	Tratamiento:	Refuerzo (Bulones y anclajes)	



La familia 3 de la estación Microtectónica EMT 2 posee un SMR=65. A pesar que el paralelismo (F1) entre las direcciones de buzamiento entre los las juntas y el talud, los buzamientos son contrarios, lo que indica que el tipo de rotura es de tipo Vuelco, además, los valores de los buzamientos poseen gran diferencia.

Figura 87. Clasificación SRM de la familia S3 del macizo rocoso en la EMT 2.

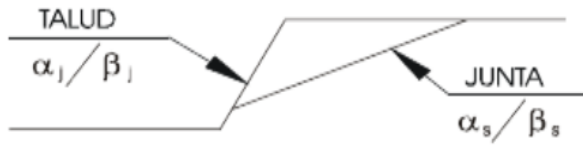
Datos Iniciales (EMT 2)	RMR:		50	
	Talud:	Dir. Buz = 278°	Juntas S3: (Familia 3)	Dir. Buz = 95°
		Buz.= 70°		Buz.= 30°
 α_j = DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO DE LA JUNTA α_s = DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO DEL TALUD β_j = BUZAMIENTO DE LA JUNTA β_s = BUZAMIENTO DEL TALUD				
Factor	Caso		Valor	Denominación
Factor de ajuste por la orientación de las juntas	Vuelco	$ \alpha_j - \alpha_s - 180 = 3^\circ$	F1=0.7	Desfavorable
	Vuelco	$ \beta_j = 30^\circ$	F2=1.0	Muy desfavorable
	Vuelco	$\beta_j + \beta_s = 100^\circ$	F3= 0	Desfavorable
Factor de ajuste por metodo de excavación			F4= +15	Talud Natural
SMR = RMR + (F1*F2*F3)+F4			SMR:	65
Clase:	II	<u>Estabilidad:</u> Estable		
Descripción:	Buena	<u>Tratamiento:</u> Ocacional		



3) Estación Microtectónica 3 (EMT 3) – Margen izquierda del río

Esta EMT 3 se encuentra a la altura del reservorio. Se ha considerado 3 familias de juntas (discontinuidades), de las cuales la primera familia posee una rotura tipo planar y las otras dos familias son de tipo vuelco. Los valores de SMR se consideran parcialmente estables, esto debido principalmente

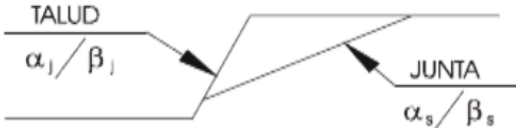
Figura 88. Clasificación SRM de la familia S1 del macizo rocoso en la EMT 3.

Datos Iniciales (EMT 3)	RMR:		46	
	Talud:	Dir. Buz = 280°	Juntas S1: (Familia 1)	Dir. Buz = 235°
		Buz.= 75°		Buz.= 45°
 α_j = DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO DE LA J UNTA α_s = DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO DEL TALUD β_j = BUZAMIENTO DE LA J UNTA β_s = BUZAMIENTO DEL TALUD				
Factor	Caso		Valor	Denominación
Factor de ajuste por la orientación de las juntas	Planar	$ \alpha_j - \alpha_s = 45^\circ$	F1=0.15	Muy favorable
	Planar	$ \beta_j = 45^\circ$	F2=0.85	Desfavorable
	Planar	$\beta_j - \beta_s = -30^\circ$	F3= -60	Desfavorable
Factor de ajuste por metodo de excavación			F4= +15	Talud Natural
SMR = RMR + (F1*F2*F3)+F4			SMR:	53.4
Clase: III		<u>Estabilidad:</u> Parcialmente estable		
Descripción: Normal		<u>Tratamiento:</u> Sistemático		



La familia 1 (ver Figura 89) posee un SMR=53.4, lo cual se considera como “parcialmente estable”, esto debido a que las direcciones de buzamiento de las juntas y del talud no son muy paralelos ($>30^\circ$). La familia 2 (ver Figura 90) posee un SMR=61 lo que indica un talud “estable” para esa familia, esto principalmente porque las direcciones de buzamiento son contrarias, es decir que la rotura preferente para esta familia es del tipo vuelco.

Figura 89. Clasificación SRM de la familia S2 del macizo rocoso en la EMT 3.

Datos Iniciales (EMT 3)	RMR:		46	
	Talud:	Dir. Buz = 280°	Juntas S2: (Familia 2)	Dir. Buz = 80°
		Buz.= 75°		Buz.= 15°
 αj = DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO DE LA JUNTA αs = DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO DEL TALUD βj = BUZAMIENTO DE LA JUNTA βs = BUZAMIENTO DEL TALUD				
Factor	Caso		Valor	Denominación
Factor de ajuste por la orientación de las juntas	Vuelco	$ \alpha_j - \alpha_s - 180^\circ = 20^\circ$	F1=0.70	Normal
	Vuelco	$ \beta_j = 15^\circ$	F2=0.15	Muy favorable
	Vuelco	$\beta_j + \beta_s = 90^\circ$	F3= 0	Muy favorable
Factor de ajuste por metodo de excavación			F4= +15	Talud Natural
SMR = RMR + (F1*F2*F3)+F4			SMR:	61
Clase:	II	Estabilidad:	Estable	
Descripción:	Buena	Tratamiento:	Ocacional	



La familia 3 (ver Figura 91) posee un SMR=58.06, lo que se considera como talud “parcialmente estable”, a pesar de que el F1 indica paralelismo próximo, la dirección de buzamiento son casi contrarios, por lo cual se le considera la rotura más preferente para esta familia del tipo vuelco, además los ángulos de buzamiento entre las juntas y el talud guardan gran diferencia entre ellos.

Figura 90. Clasificación SRM de la familia S3 del macizo rocoso en la EMT 3.

Datos Iniciales (EMT 3)	RMR:		46	
	Talud:	Dir. Buz = 280°	Juntas S3: (Familia 3)	Dir. Buz = 75°
		Buz.= 75°		Buz.= 35°
 αj = DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO DE LA JUNTA αs = DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO DEL TALUD βj = BUZAMIENTO DE LA JUNTA βs = BUZAMIENTO DEL TALUD				
Factor	Caso		Valor	Denominación
Factor de ajuste por la orientación de las juntas	Vuelco	αj - αs - 180 = 15°	F1=0.7	Normal
	Vuelco	βj = 35°	F2=0.7	Normal
	Vuelco	βj + βs = 110°	F3= -6	Favorable
Factor de ajuste por metodo de excavación			F4= +15	Talud Natural
SMR = RMR + (F1*F2*F3)+F4			SMR:	58.06
Clase:	III	Estabilidad: Parcialmente estable		
Descripción:	Normal	Tratamiento: Sistemático		



4) Estación Microtectónica 4 (EMT 4) – Margen izquierda del río

Esta EMT 4 posee 3 familias principales de juntas (discontinuidades), la primera y última familia de rotura tipo vuelco y la intermedia de tipo planar. De acuerdo a los valores del SMR, a todas las familias se les considera “parcialmente estables”.

Figura 91. Clasificación SRM de la familia S1 del macizo rocoso en la EMT 4.

Datos Iniciales (EMT 4)	RMR:		39	
	Talud:	Dir. Buz = 283°	Juntas S1: (Familia 1)	Dir. Buz = 188°
		Buz.= 80°		Buz.= 77°

α_j = DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO DE LA JUNTA
 α_s = DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO DEL TALUD
 β_j = BUZAMIENTO DE LA JUNTA
 β_s = BUZAMIENTO DEL TALUD

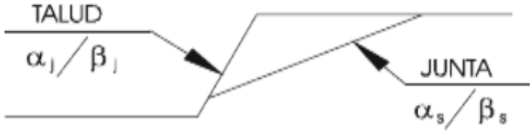
Factor	Caso		Valor	Denominación
Factor de ajuste por la orientación de las juntas	Planar	$ \alpha_j - \alpha_s = 95^\circ$	F1=0.15	Muy favorable
	Planar	$ \beta_j = 77^\circ$	F2=1.0	Muy desfavorable
	Planar	$\beta_j - \beta_s = -3^\circ$	F3= -50	Desfavorable
Factor de ajuste por metodo de excavación			F4= +10	Precorte

SMR = RMR + (F1*F2*F3)+F4			SMR:	41.5
Clase:	III	Estabilidad:	Parcialmente estable	
Descripción:	Normal	Tratamiento:	Sistemático	



La familia 1 (ver Figura 92) posee un SMR=41.5 lo que es considerado como “parcialmente estable”, este valor es debido principalmente a que la dirección de buzamiento de las juntas y del talud son casi perpendiculares, además que la diferencia de buzamiento es casi nula. La familia 2 (ver figura 93) posee un SMR=48.64 que indica un talud “parcialmente estable” esto debido a que la rotura mas preferente de inestabilidad es del tipo vuelco, además de un valor bajo en el buzamiento de la junta.

Figura 92. Clasificación SRM de la familia S2 del macizo rocoso en la EMT 4.

Datos Iniciales (EMT 4)	RMR:		39	
	Talud:	Dir. Buz = 283°	Juntas S2: (Familia 2)	Dir. Buz = 18°
		Buz.= 80°		Buz.= 30°
 αj = DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO DE LA JUNTA αs = DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO DEL TALUD βj = BUZAMIENTO DE LA JUNTA βs = BUZAMIENTO DEL TALUD				
Factor	Caso		Valor	Denominación
Factor de ajuste por la orientación de las juntas	Vuelco	$ \alpha_j - \alpha_s - 180 = 85^\circ$	F1=0.15	Muy favorable
	Vuelco	$ \beta_j = 30^\circ$	F2=0.4	Favorable
	Vuelco	$\beta_j + \beta_s = 110^\circ$	F3= -6	Favorable
Factor de ajuste por metodo de excavación			F4= +10	Precorte
SMR = RMR + (F1*F2*F3)+F4			SMR:	48.64
Clase: III		<u>Estabilidad:</u> Parcialmente estable		
Descripción: Normal		<u>Tratamiento:</u> Sistemático		



La familia 3 (ver Figura 94) posee un SMR=40, que indica “inestabilidad” en el talud para esta familia. Esta denominación es producto principalmente por considerarse una rotura tipo planar, con un buzamiento alto de las juntas (68°), además, la diferencia entre los buzamientos de las juntas y del talud es baja (-12°).

Figura 93. Clasificación SRM de la familia S3 del macizo rocoso en la EMT 4.

Datos Iniciales (EMT 4)	RMR:		39	
	Talud:	Dir. Buz = 283°	Juntas S3: (Familia 3)	Dir. Buz = 324°
		Buz.= 80°		Buz.= 68°
 α_j = DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO DE LA JUNTA α_s = DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO DEL TALUD β_j = BUZAMIENTO DE LA JUNTA β_s = BUZAMIENTO DEL TALUD				
Factor	Caso		Valor	Denominación
Factor de ajuste por la orientación de las juntas	Planar	$ \alpha_j - \alpha_s = 41^\circ$	F1=0.15	Muy favorable
	Planar	$ \beta_j = 68^\circ$	F2=1.0	Normal
	Planar	$\beta_j - \beta_s = -12^\circ$	F3= -60	Muy desfavorable
Factor de ajuste por metodo de excavación			F4= +10	Precorte
SMR = RMR + (F1*F2*F3)+F4			SMR:	40
Clase: IV		Estabilidad: Inestable		
Descripción: Mala		Tratamiento: Corrección		



5) Estación Microtectónica 5 (EMT 5) – Margen izquierda del río

Esta EMT 5 está constituida por dos familias principales, ambas con roturas tipo planar. Ambas familias son un talud “parcialmente estable”.

Figura 94. Clasificación SRM de la familia S1 del macizo rocoso en la EMT 5.

Datos Iniciales (EMT 5)	RMR:		53	
	Talud:	Dir. Buz = 280°	Juntas S1: (Familia 1)	Dir. Buz = 182°
		Buz.= 80°		Buz.= 62°
 αj = DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO DE LA JUNTA αs = DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO DEL TALUD βj = BUZAMIENTO DE LA JUNTA βs = BUZAMIENTO DEL TALUD				
Factor	Caso		Valor	Denominación
Factor de ajuste por la orientación de las juntas	Planar	αj - αs = 98°	F1=0.15	Muy favorable
	Planar	βj = 62°	F2=1.0	Muy desfavorable
	Planar	βj - βs = -18°	F3= -60	Muy desfavorable
Factor de ajuste por metodo de excavación			F4= +10	Precorte
SMR = RMR + (F1*F2*F3)+F4			SMR:	54
Clase: III		Estabilidad: Parcialmente estable		
Descripción: Normal		Tratamiento: Sistemático		



La familia 1 (ver Figura 95) posee un $SMR=53.4$ que se interpreta como un talud “parcialmente estable” para esta familia, esto como producto principalmente por el alto valor del buzamiento de la junta (62°) y la pequeña diferencia entre los buzamientos de la junta y del talud. La familia 2 (ver Figura 96) posee un $SMR=53.4$ la cual se considera como un talud “parcialmente estable”, esto debido principalmente al alto valor de buzamiento de las juntas y una diferencia pequeña entre los buzamientos de las juntas y del talud.

Figura 95. Clasificación SRM de la familia S2 del macizo rocoso en la EMT 5.

Datos Iniciales (EMT 5)	RMR:		53	
	Talud:	Dir. Buz = 280°	Juntas S2: (Familia 2)	Dir. Buz = 250°
		Buz.= 80°		Buz.= 63°
 αj = DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO DE LA JUNTA αs = DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO DEL TALUD βj = BUZAMIENTO DE LA JUNTA βs = BUZAMIENTO DEL TALUD				
Factor	Caso		Valor	Denominación
Factor de ajuste por la orientación de las juntas	Planar	αj - αs = 30°	F1=0.40	Favorable
	Planar	βj = 63°	F2=0.4	Favorable
	Planar	βj - βs = -17°	F3= -60	Muy desfavorable
Factor de ajuste por metodo de excavación			F4= +10	Precorte
SMR = RMR + (F1*F2*F3)+F4			SMR:	53.4
Clase: III		Estabilidad: Parcialmente estable		
Descripción: Normal		Tratamiento: Sistemático		



6) Estación Microtectónica 6 (EMT 6) – Margen derecha del río

Esta EMT 6 se ubica a la altura del puente de ingreso al Balneario de Aguas Calientes. Se ha considerado 2 familias de juntas, ambas con un tipo de corte planar.

Figura 96. Clasificación SRM de la familia S1 del macizo rocoso en la EMT 6.

Datos Iniciales (EMT 6)	RMR:		51	
	Talud:	Dir. Buz = 240°	Juntas S1: (Familia 1)	Dir. Buz = 229°
		Buz.= 72°		Buz.= 70°

	α_j = DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO DE LA JUNTA α_s = DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO DEL TALUD β_j = BUZAMIENTO DE LA JUNTA β_s = BUZAMIENTO DEL TALUD
--	--

Factor	Caso		Valor	Denominación
Factor de ajuste por la orientación de las juntas	Planar	$ \alpha_j - \alpha_s = 11^\circ$	F1=0.70	Normal
	Planar	$ \beta_j = 70^\circ$	F2=1.0	Muy desfavorable
	Planar	$\beta_j - \beta_s = -2^\circ$	F3= -50	Desfavorable
Factor de ajuste por metodo de excavación			F4= +10	Precorte
SMR = RMR + (F1*F2*F3)+F4			SMR:	26
Clase:	IV	Estabilidad:	Inestable	
Descripción:	Mala	Tratamiento:	Corrección	



La familia 1 (ver Figura 97) posee un SMR=26, el cual es un valor muy bajo, y se le clasifica como “inestable” que necesita corrección para su estabilización, esto debido principalmente al paralelismo entre la junta y el talud, alto valor de buzamiento de la junta (70°) y casi sin diferencia entre los buzamientos de la junta respecto al buzamiento del talud. La familia 2 (ver Figura 98) posee un SMR=53.5 que indica un talud “parcialmente estable”, esto debido principalmente que no hay paralelismo entre las direcciones de las juntas respecto a la dirección del talud.

Figura 97. Clasificación SRM de la familia S2 del macizo rocoso en la EMT 6.

Datos Iniciales (EMT 1)	RMR:		51	
	Talud:	Dir. Buz = 240°	Juntas S2: (Familia 2)	Dir. Buz = 172°
		Buz.= 72°		Buz.= 71°
 α_j = DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO DE LA JUNTA α_s = DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO DEL TALUD β_j = BUZAMIENTO DE LA JUNTA β_s = BUZAMIENTO DEL TALUD				
Factor	Caso		Valor	Denominación
Factor de ajuste por la orientación de las juntas	Planar	α _j - α _s = 68°	F1=0.15	Muy favorable
	Planar	β _j = 71°	F2=1.0	Muy desfavorable
	Planar	β _j - β _s = -1°	F3= -50	Desfavorable
Factor de ajuste por metodo de excavación			F4= +10	Precorte
SMR = RMR + (F1*F2*F3)+F4			SMR:	53.5
Clase: III		Estabilidad: Parcialmente estable		
Descripción: Normal		Tratamiento: Sistemático		



Según la metodología de clasificación SMR de Romana, indica que se tiene que realizar el análisis del SMR para cada familia en cada estación microtectónica (también llamado estación geomecánica) tal como se ha realizado en este trabajo líneas arriba. Una vez analizada cada familia, se considera el valor mínimo, y este es el dato que se utiliza para la determinación del tipo de corrección a utilizar para estabilizar el talud (ver Figura 99).

Figura 98. Cuadro resumen de los valores de SMR para las 6 EMT.

EMT	FAMILIA	RMR	SRM	CLASE	DESCRIPCION	ESTABILIDAD	TRATAMIENTO	SE CONSIDERA EL MAS DESFAVORABLE
EMT 1	S1	63	35.5	IV	Mala	Inestable	Corrección	S1 SRM = 35.5
	S2	63	77.1	II	Buena	Estable	Sistemático	
	S3	63	69	II	Buena	Estable	Sistemático	
EMT 2	S1	50	57.5	III	Normal	Parcialmente Estable	Sistemático	S2 SRM = 35.5
	S2	50	35.5	IV	Mala	Inestable	Refuerzo (Bulones y anclaje)	
	S3	50	65	II	Buena	Estable	Ocacional	
EMT 3	S1	46	53.4	III	Normal	Parcialmente Estable	Sistemático	S1 SRM = 53.4
	S2	46	54.7	III	Normal	Parcialmente Estable	Sistemático	
	S3	46	58.06	III	Normal	Parcialmente Estable	Sistemático	
EMT 4	S1	39	41.5	III	Normal	Parcialmente Estable	Sistemático	S3 SRM = 39
	S2	39	48.64	III	Normal	Parcialmente Estable	Sistemático	
	S3	39	40	IV	Mala	Inestable	Corrección	
EMT 5	S1	53	54	III	Normal	Parcialmente Estable	Sistemático	S2 SRM = 53.4
	S2	53	53.4	III	Normal	Parcialmente Estable	Sistemático	
EMT 6	S1	51	26	IV	Mala	Inestable	Corrección	S1 SRM = 26
	S2	51	53.5	III	Normal	Parcialmente Estable	Sistemático	



5.4. ESTABILIZACIÓN DE TALUD DE ROCA

En los taludes de roca, las inestabilidades son debido a las características geomecánicas del macizo rocoso, al estado de conservación del propio talud y a las condiciones de penetración del agua.

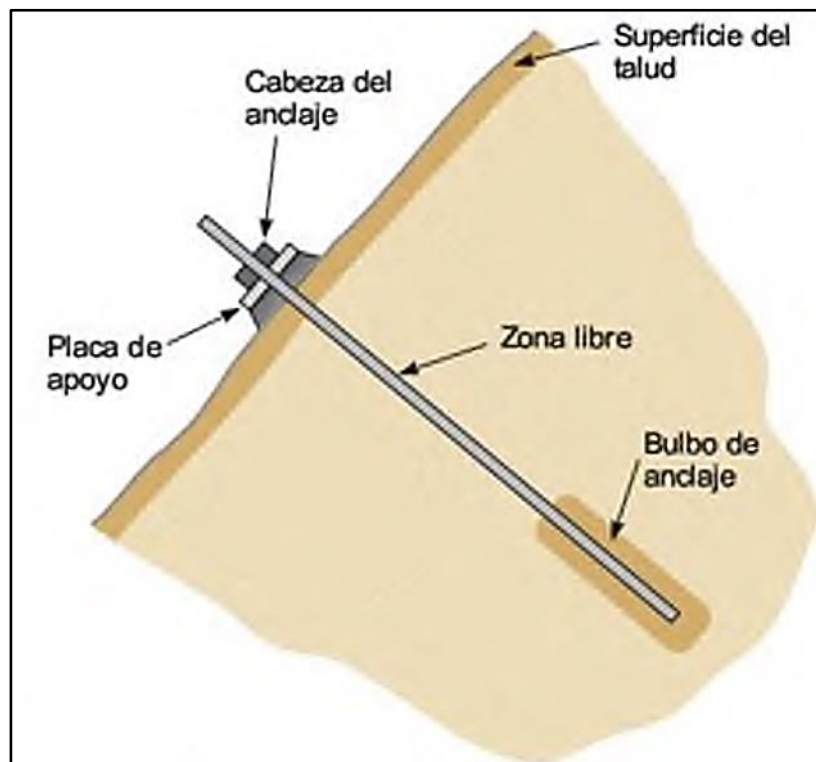
5.4.1. MEDIDAS DE ESTABILIZACIÓN DE TALUDES DE ROCA

1. **ZONA 1:** Para las zonas donde se encuentran las discontinuidades buzando a favor del talud como por ejemplo la zona a la altura del puente, en la margen derecha del río Aguas Calientes se recomienda la Colocación de Bulones de anclaje como reforzamiento para la estabilización del talud.

Bulones de adherencia: El anclaje es una técnica de sostenimiento el cual consiste en introducir en el interior de las rocas una barra de material resistente (acero) que aporta una resistencia a tracción confinándolas al propio macizo rocoso. Es decir, permite aprovechar las características resistentes propias de las rocas facilitando así su sostenimiento. Los bulones proporcionan una fuerza contraria al movimiento de la masa deslizante. Al incrementar las tensiones en la superficie de rotura potencial, aumentan la resistencia al deslizamiento en dicha superficie. Estos bulones se anclan por adherencia permanente se caracterizan porque el hueco entre la perforación para introducir el bulón y la propia estructura del mismo se sella con un adherente, como resinas que llevan incorporados elementos que provocan y aceleran su endurecimiento.

Esta medida se debe considerar para los taludes ubicados en la estación microtectónica 1 y 6 ubicados en la margen derecha del río Aguas Calientes.

Figura 99. Esquema de las partes de las partes de un anclaje.



Fuente: (Gonzáles de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2004)

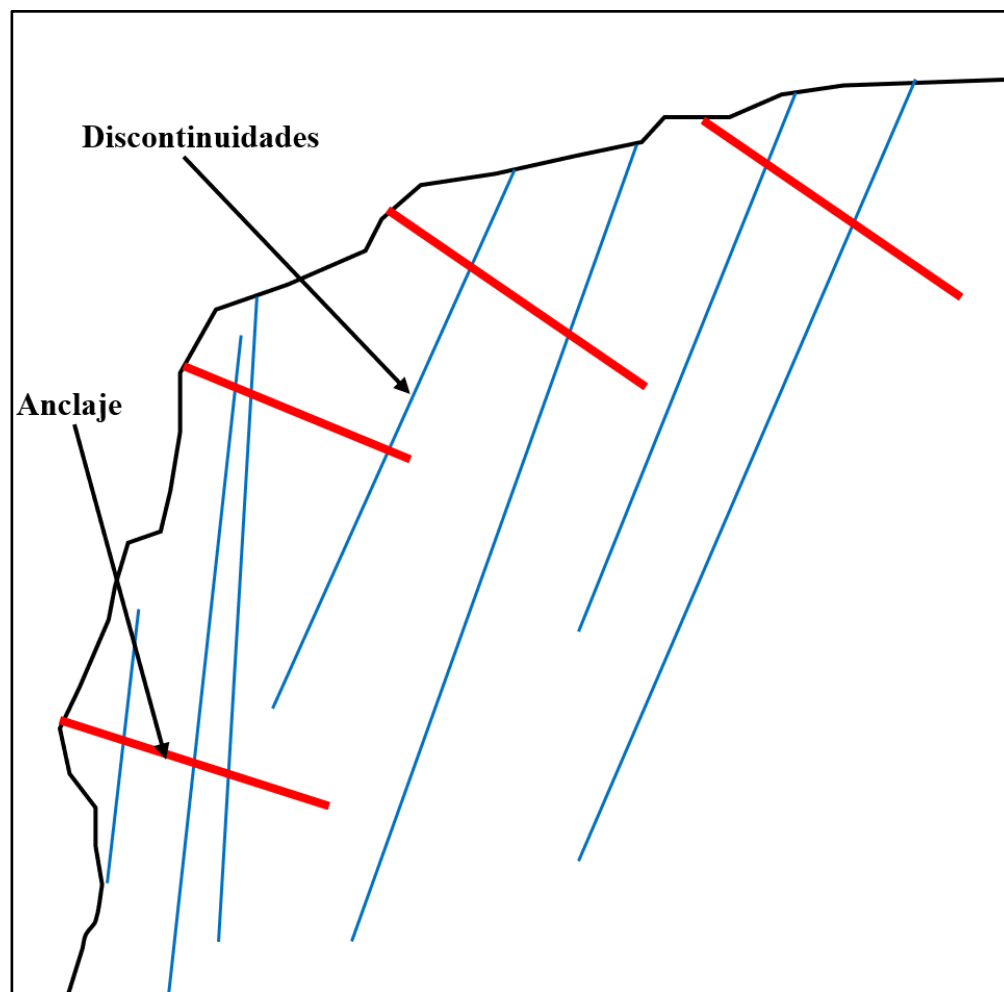
Figura 100. Se muestra una imagen del talud a la altura del puente



Figura 101. Talud en la margen derecha del rio Aguas Calientes a la altura del puente.



Figura 102. Perfil natural del talud y un esquema generalizado de las discontinuidades y anclaje.





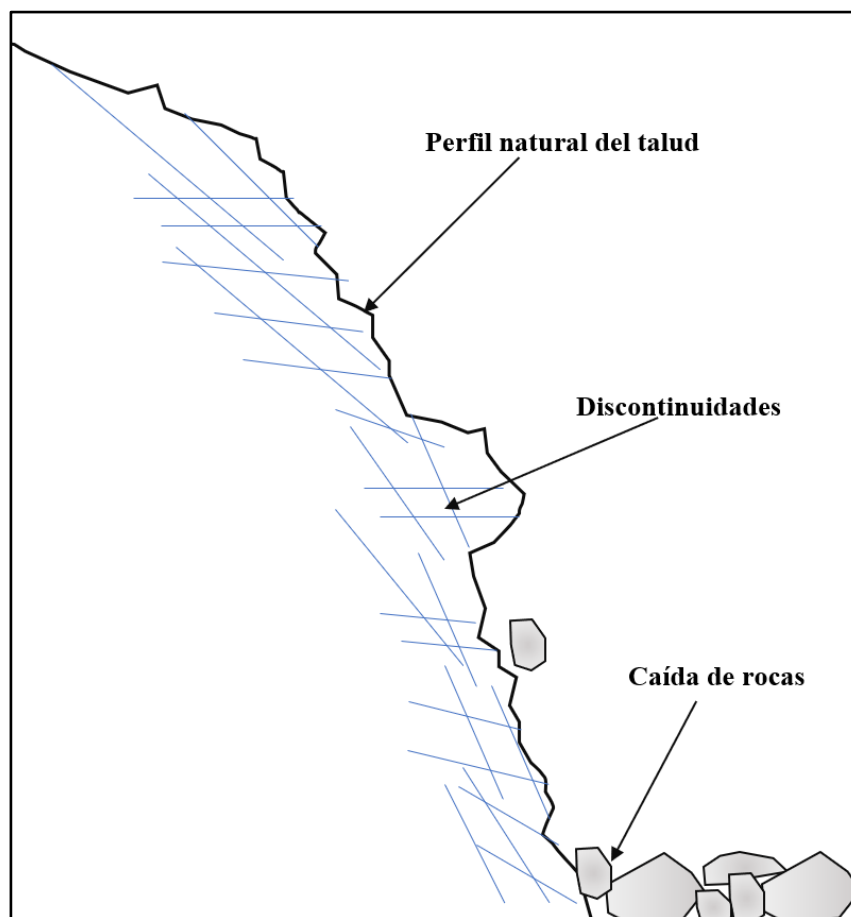
2. **ZONA 2:** A lo largo de la cuenca Aguas Calientes se ubican zonas de talud, donde el granito se encuentra muy fracturado, donde se presenta caída de bloques; en esta zona se debe remover las rocas mediante el Desquinche.

Figura 103. Caída de roca aguas arriba del balneario.





Figura 104. Perfil natural del talud donde se presenta caída de rocas debido al fracturamiento de la roca.



ZONA 3: A lo largo de los años y en distintos periodos se ha presenciado aluviones en la Localidad de Aguas Calientes, esto debido a que el río Aguas Calientes, al aumentar su caudal viene cargado de bloques de granitos, que erosionan la base del cauce, de este modo cargándose potencialmente; como respuesta a estos fenómenos se instaló una medida de protección conocido como rieles a los largo del río aguas arriba de Balneario, lo cual no ha solucionado el problema, para ello lo que se recomienda es colocar Muro seco a lo largo del río para la estabilización y de protección contra la erosión.. Estos muros secos deben ser realizados con bloques de gran tamaño mayores a 2 metros, de preferencia bloques angulares y con un talud de 45°.

Figura 105. Enrocado con muro seco en el cauce del río Huaura-Sayán.

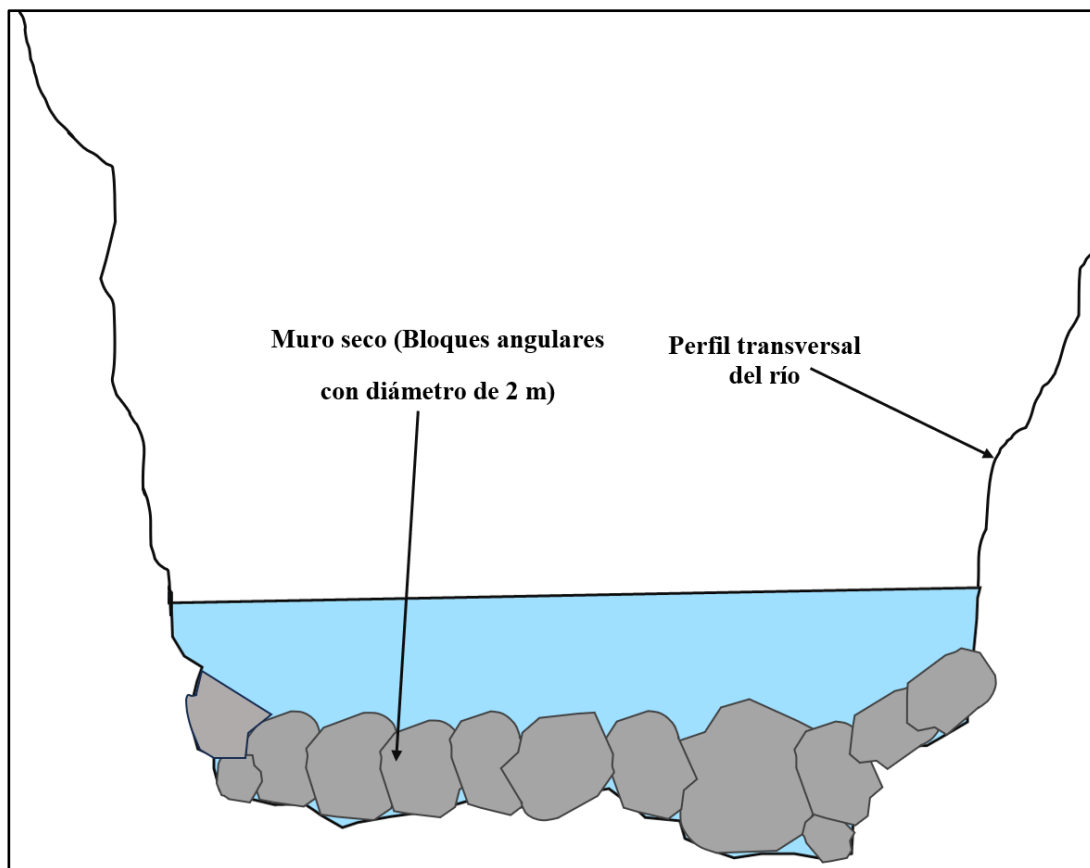


Figura 106. Enrocado del cauce a la altura del puente ejército en Lima.





Figura 107. Perfil transversal del río donde se observa el muro seco de bloques angulares con diámetro superior a 2m.



3. **ZONA 4:** En la zona de la cabecera de la cuenca encontramos rocas de gran tamaño con diámetro mayores a 1 metro, estas se deben reducir el tamaño hasta fragmentos de 2-3 pulgadas para ello se debe utilizar voladura controlada; esto para efectos de que el material transportando por el cauce sean de menor tamaño por ende generen menos erosión en la base del río, además estos materiales en la parte baja de la cuenca, al realizar las descolmatación pueden ser utilizado como cantera de grava y arena para la construcción de los asentamientos en la Localidad de Aguas Calientes.

Figura 108. Reducción de tamaño mediante voladura controlada.





CAPÍTULO VI: CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LAS AGUAS

TERMALES DEL BALNEARIO.

6.1. GENERALIDADES.

La caracterización hidrogeológica está determinada por diversos factores tales como son la hidrología, la litología, las estructuras geológicas y la composición química de las rocas. Estos factores permiten establecer los parámetros necesarios para la evaluación del comportamiento fisicoquímico de las aguas termales en relación a las estructuras geológicas y litológicas de la zona de estudio, lo cual define el actuar de los flujos subterráneos y la geometría del acuífero.

En este capítulo se muestran las características hidrogeológicas de las aguas termales de Aguas Calientes como son la permeabilidad, parámetros fisicoquímicos como en pH, la conductividad eléctrica, el contenido de sales (TDS), temperatura y los componentes iónicos mayoritarios. Para esto se realizó ensayos en campo, ensayos in situ de parámetros físico químicos y obtención de muestras de agua para los análisis físico químicos.

6.2. PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS

6.2.1. Permeabilidad Secundaria.

La permeabilidad es una propiedad muy importante para la caracterización hidrogeológica, básicamente es la conexión de los poros de la roca, la permeabilidad en los granitos de Aguas Calientes este dado por la porosidad secundaria ya que la roca es un acuífero fisurado, nos sirve para estimar la carga y descarga de los acuíferos, así como para definir la velocidad de flujo de las aguas, por consiguiente, contribuye en la definición del tipo de acuífero.

Por ende, para determinar el coeficiente de permeabilidad en la zona del balneario de Aguas Calientes se tomó en cuenta una metodología indirecta propuesta por (López Zapana, 2018) , por



lo que se ha procedido a la obtención de estos parámetros mediante mediciones de las estructuras lineales del macizo rocoso, el mismo que también ha servido para la valoración del macizo rocoso, de los cuales se ha utilizado las distancias de separación y las aberturas, así como el número de sistemas del fracturamiento existente en las estaciones micro tectónicas, que sirven para el cálculo establecido por Terzaghi y Peck.

Se ha tomado en cuenta el promedio de las mediciones de las separaciones y las aberturas de los sistemas de fracturas. Para el caso de la EMT 4 a la altura de la Piscina 4 se ha utilizado tres sistemas, y en la EMT 5 se ha utilizado dos sistemas, que son las más persistentes.

En base a estos dos coeficientes obtenidos para los datos, se ha realizado el cálculo coeficiente de permeabilidad secundaria, los que se muestran en los dos siguientes cuadros:

Figura 109. Cuadro del coeficiente de permeabilidad Secundaria para la EMT 4.

ZONA :		EMT 4			
Permeabilidad del area para tres sistemas de discontinuidades					
Condición del macizo	sistemas a,b y e	Distanciamiento (m)	K Matriz	u	pa*seg
Abertura(m)	C 1	0.003	1.00E-09	1.00E+03	1.00E-06
Abertura(m)	C 2	0.004		981	cm/s2
Abertura(m)	C 3	0.001		1.00E-02	m2/s
Prom aber.		0.003	12 v*b	7.96E-02	
Separacion(m)	S 1	0.490	g*e3	2.21561E-05	
Separacion(m)	S 2	0.850	k=	2.78E-04	
Separacion(m)	S 3	0.650			cm/s
Prom Sep		0.663			

VALOR DE K	2.78E-04
------------	----------



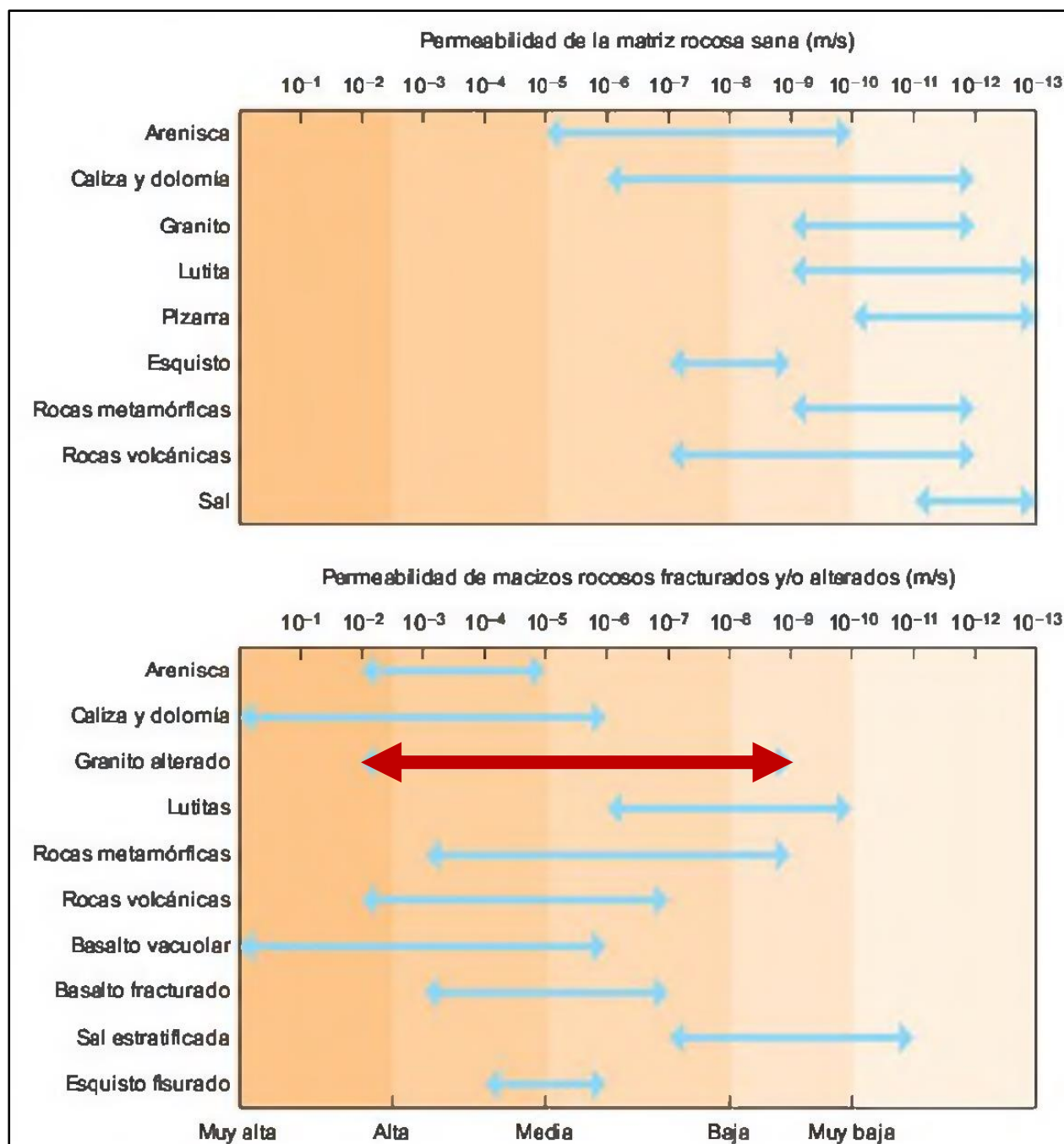
Figura 110. Cuadro de coeficiente de permeabilidad para la ETM 5.

ZONA :		EMT 5			
Permeabilidad del area para dos sistemas de discontinuidades					
Condición del macizo	sistemas a,b y e	Distanciamie nto (m)	K Matriz	u	pa*seg
Abertura(m)	C 1	0.001	1.00E-05	1.00E+03	1.00E-02
Abertura(m)	C 2	0.009		981	cm/s2
				1.00E-02	m2/s
Prom Aber.		0.005	12 v*b	6.42E-01	
Separacion(m)	S 1	0.800	g*e3	0.0001	
Separacion(m)	S 2	9.900	k=	1.91E-04	cm/s
Prom Sep		5.350			
VALOR DE K			1.91E-04		

Se muestran los valores de permeabilidad indirecta obtenidos a partir de la información indicada.

El coeficiente de permeabilidad secundaria promedio es 2.35E-04 cm/s, correspondiente a una clasificación de permeabilidad media.

Figura 111. Valores de permeabilidad primaria y secundaria para rocas fracturadas y macizos ROCOSOS.



Nota: Modificado de Isherwood, 1979.

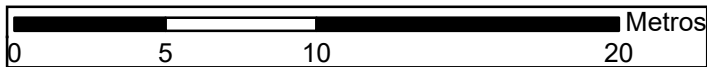
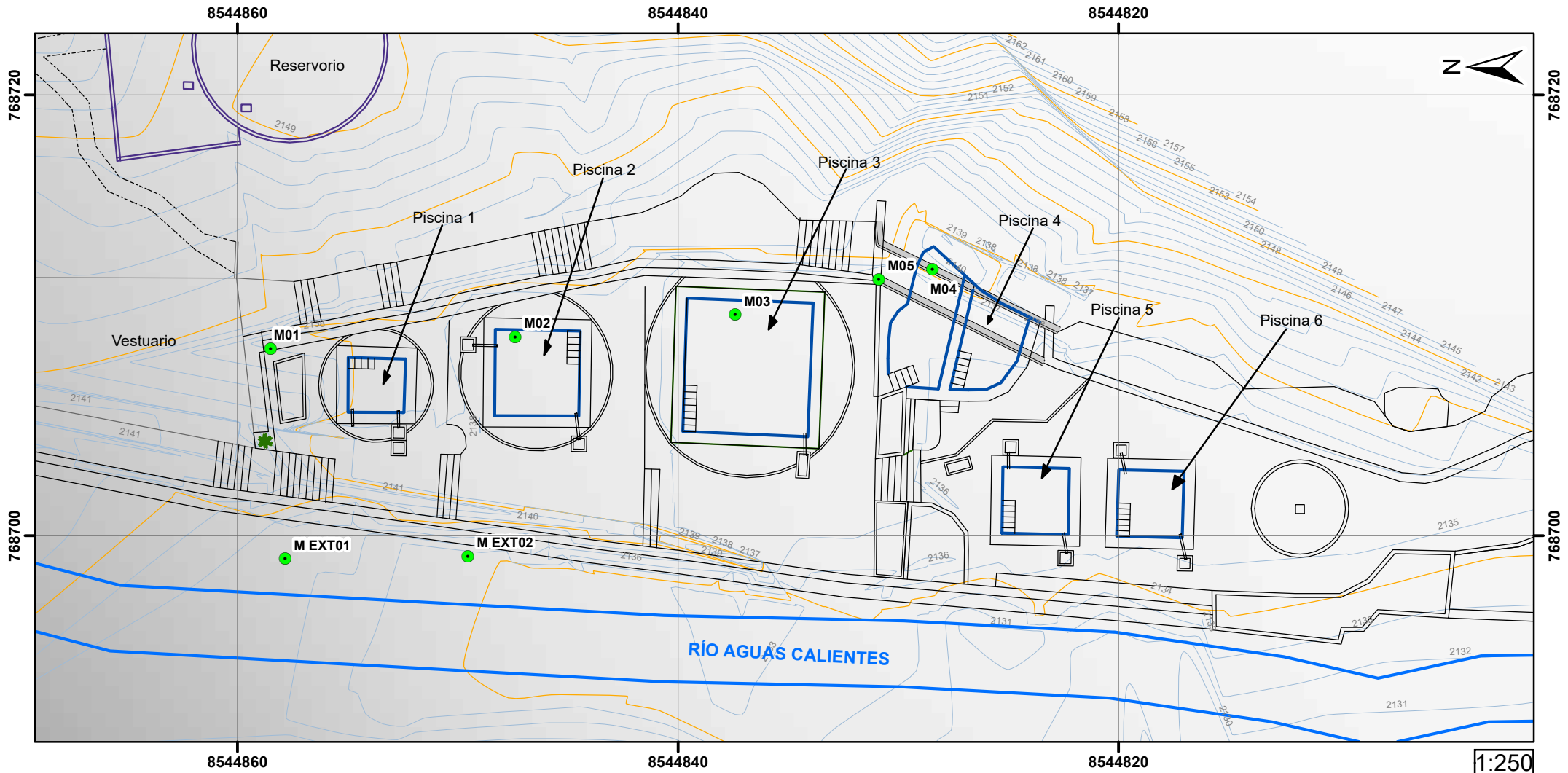


6.3. INVENTARIO DE FUENTES DE AGUA.

En el área de estudio del balneario de Aguas Calientes se reconocen tres fuentes de surgencias principales de aguas termales, una la fuente termal que abastece al balneario de aguas calientes (con el caudal de esta fuente se llenan todas las piscinas), que se encuentra captado y sellado, por lo que no es posible medir el caudal ni los parámetros fisicoquímicos in situ de esta, aunque se estima un caudal de 15 L/min (de acuerdo a los cálculos realizados). Las otras dos fuentes termales se encuentran fuera del balneario, desembocando sus aguas al río Aguas Calientes, que tienen caudales de 1.2 L/min (medidos en el manante). Las piscinas 2, 3, 4, 5 y 6 son abastecidas en parte por la fuente termal principal captada. En las piscinas 2, 3 y 4 cuando están vacías, se observan pequeñas surgencias de agua termal, por las zonas donde la base de la piscina se encuentra fisurada y tiene oquedades, debido a la presión que ejerce el muro de contención, sobre el acuífero y la fuente termal principal que está sellada, estas son consideradas surgencias menores de agua termal. Resultado de esta presión también surgen los dos manantiales que se encuentran en el margen del río Aguas Calientes.

Las surgencias de aguas termales en el balneario de Aguas Calientes son de carácter muy particular, se ha zonificado al área donde se halla en la actualidad la infraestructura de Aguas Calientes, de este modo, el inventario está focalizada a esta área, en el cual se han identificado dos sectores, las ubicada dentro de las instalaciones del balneario y las ubicadas en la zona externa de las piscinas (Manante exterior M-1 y Manante exterior M-2) que no son aprovechadas en ninguna piscina.

Teniendo en cuenta las fuentes termales principales y las pequeñas surgencias que salen por el fondo de las piscinas, tenemos un total de siete manantiales de agua termal.



Simbología	
Infraestructura	● Manantes termales
----- Camino	— Río
— Infraestructura	Curvas de nivel
— Piscina	— Curvas primarias
— Puente	— Curvas secundarias
— Reservorio	

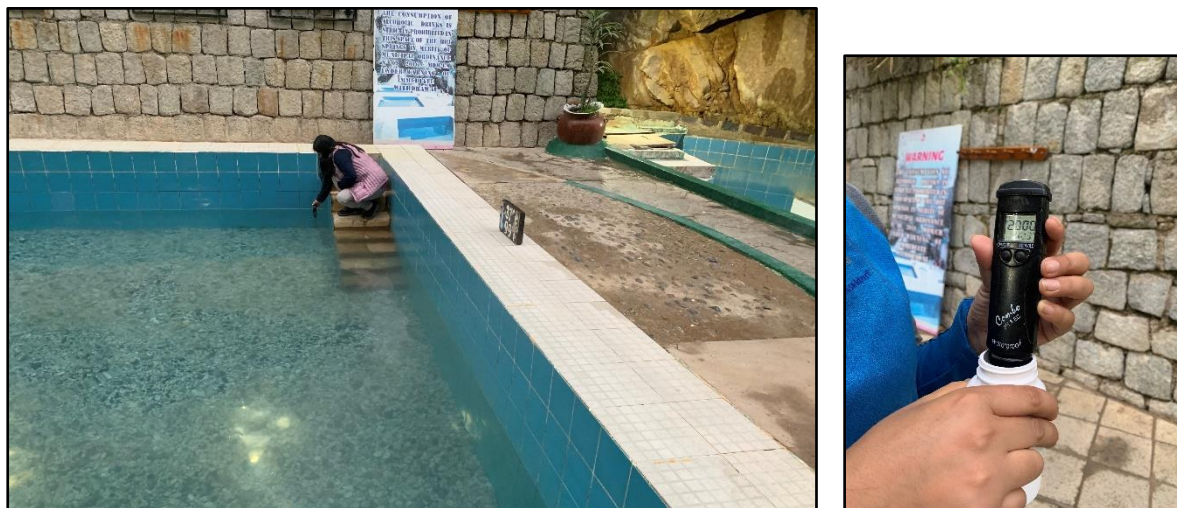
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO	
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA	
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA	
TESIS: "CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y GEOMECANICA DE LOS BAÑOS TERMALES DE AGUAS CALIENTES DEL DISTRITO DE MACHUPICCHU, PROVINCIA DE URUBAMBA, REGION CUSCO"	
MAPA: MAPA DE FUENTES DE AGUA TERMAL	ESCALA: INDICADA
ELABORADOR POR: KATHERINE GUTIERREZ PERALTA - VANESSA I. VALVERDE GOYZUETA	
FUENTE DE DATOS: ING. LÓPEZ ZAPANA RONALD LUIS	DATUM: WGS 1984_UTM_ZONA_18S
MAPA N° 08	

6.3.1. *Análisis de Parámetros físicos e hidráulicos.*

En campo se utilizó un equipo de bolsillo marca Hanna. Se tomó medida de las temperaturas las cuales tienen una diferencia o variación en cada una de las piscinas, estas a su vez varían durante el día, debido a que cinco piscinas(2,3,4,5,y6) son alimentadas por una misma fuente, controladas por un sistema de válvulas, las fuentes que alimentan tienen un recorrido desde una fuente primaria y algunos tienen fuentes de alimentación dentro de las mismas piscinas y se van mezclando con una los de la misma fuente, por tanto, se han diferenciado en tres datos de temperatura que se resumen en un cuadro para explicar las diferencias entre cada una de ellas.

Los caudales han sido calculados en función al llenado de las piscinas, es decir con el método directo volumétrico.

Figura 112. Toma de Temperatura y parámetros físico-químicos.



6.3.1.1. **Análisis de Temperatura.**

El balneario de Aguas Calientes tiene publicado en letreros informativos las temperaturas de cada una de las piscinas, que no coinciden en ninguno de ellos, estas se deben a los diferentes factores como el tamaño de la piscina (distintas en volumen) y llenadas en distintos periodos de



tiempo, ya que son controladas por un sistema de válvulas de una fuente principal que se halla próxima a las duchas según se nos ha indicado. Otro factor es la mezcla de dos fuentes, es decir, de la fuente principal controlada con válvulas y las pequeñas surgencias que emergen por las fisuras y oquedades en las piscinas 2, 3 y 4, debido a la presión de agua termal.

Tabla 10. Medida de Temperaturas en piscinas y en los manantes exteriores.

Ubicación	T (°C) en letreros Informativos	T(°C) Medidas en Piscina	T(°C) Medidas en fuente
Piscina 01	14.0	—	—
Piscina 02	34.0	36.7	41.0
Piscina 03	37.0	37.9	45.0
Piscina 04	32.0	33.2	—
Piscina 05	36.0	35.9	—
Piscina 06	35.0	35.1	—
Manante Exterior 01	—	—	33.0
Manante Exterior 02	—	—	—

La temperatura en la fuente principal no se ha podido establecer, ya que se halla oculta, sin embargo, se ha realizado en tres lugares: En las piscinas 2 y 3 en el interior y un manantial en el exterior del muro.



Figura 113. Balneario Aguas Calientes.



En la piscina 2 se ha realizado la medición de temperatura después de las 9 pm, hora en el que se vacía la piscina, obteniéndose una temperatura de 41°C , de este mismo modo luego se procede a realizar la medición en la piscina 3 que también tienen surgencias con mayores caudales, obteniéndose 45°C .



En el exterior se ha medido el manantial (M-1) próximo al río, estas mediciones se han realizado obteniéndose una temperatura de 33.4 °C. En el manantial M-2 no es posible realizar mediciones dado que se halla surgiendo al borde del nivel de río.

6.3.1.2. Análisis de Caudales.

Las surgencias de las aguas termales se encuentran escondidas, y tapadas con la construcción de las piscinas, de modo que no se conoce exactamente en la actualidad cual es el caudal de cada uno de las fuentes, se ha podido establecer que existen por lo menos 5 puntos de donde emergen, pero que no es posible medir directamente por la infraestructura construida, más aún, cuando el sistema de llenado de piscinas es mediante control de válvulas manuales y no permite tener mayor precisión, sin embargo, considerando el volumen total acumulado se ha estimado un promedio muy aproximado del caudal en general, sin tener la precisión que se debía esperar por estar oculto una de las fuentes principales. Se dice caudal aproximado porque no se ha medido en fuente, sino por los volúmenes de llenado de las piscinas, cuyas bases carecen de uniformidad y eso le quita la precisión de un volumen exacto.

Tabla 11. Volumen construido en las Piscinas del balneario de Aguas Calientes.

Piscina	Lado (m)	Lado (m)	Altura (m)	Área (m ²)	Volumen de Piscina
1	2.61	2.42	1.44	6.32	9.10
2	3.86	3.85	1.15	14.86	17.09
3	5.72	6.07	1.50	34.72	52.08
4	7.20	3.10	1.20	22.31	26.77
5	3.01	3.00	1.50	9.03	13.55
6	2.97	3.02	1.50	8.97	13.45



Tabla 12. Cálculo de Volumen de llenado de piscinas del balneario de Aguas Calientes.

Piscina	Área (m2)	Altura de agua (m)	Tiempo de llenado (min)	Volumen de llenado m3	Caudal Q(L/min)
1	6.32	—	—	—	—
2	14.86	0.72	697	10.70	15.35
3	34.72	0.42	709	14.58	20.57
4	22.31	0.52	706	11.60	16.43
5	9.03	0.86	555	7.77	13.99
6	8.97	0.80	555	7.18	12.93
Caudal Promedio (Q=l/min)					15.85

El promedio acumulado es 15.85 l/min, obtenido en función a volumen/tiempo de llenado, que es muy próximo a los promedios obtenidos para las piscinas de manera independiente. Este caudal resulta de la sumatoria de todas las fuentes y el volumen total acumulado en las 6 piscinas.

Se ha identificado un total siete manantiales de surgencia de aguas termales, cinco de ellas ubicadas en el interior del muro donde se encuentran las piscinas y dos en el exterior del muro que separa del río. Esta identificación se puede corroborar con la interpretación de las secciones de tomografía eléctrica, que se describe el capítulo de secciones tomográficas.

Figura 114. Medición de la altura de la piscina N°6.

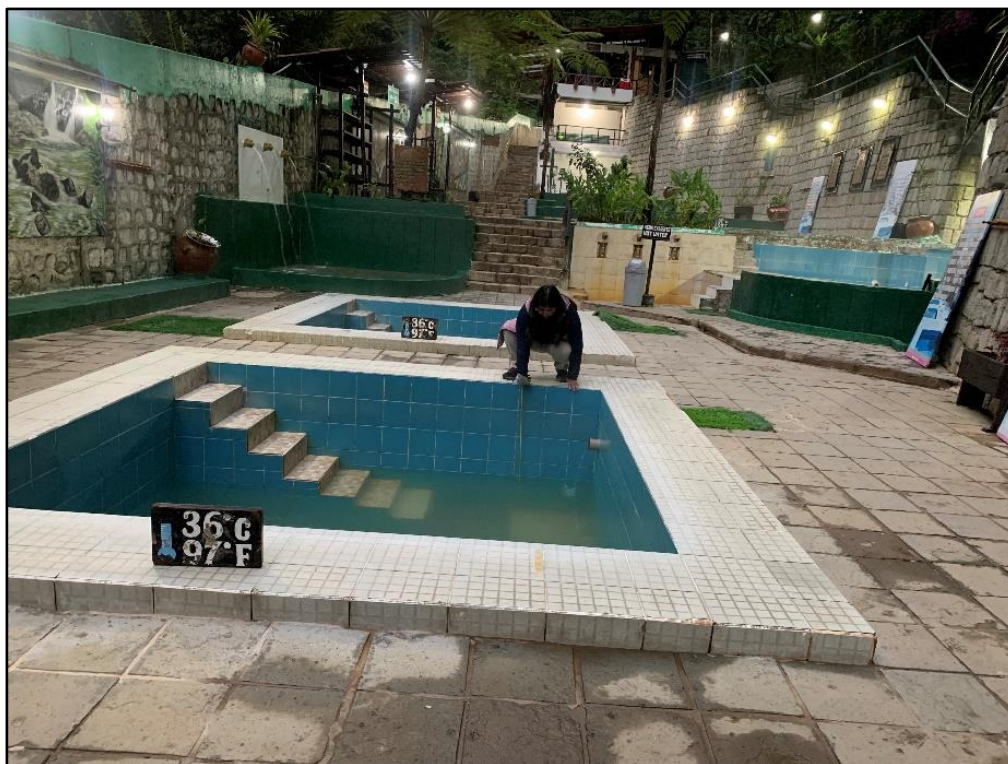


Figura 115. Medición del largo de la piscina N°6.





Manantial 1. Esta se encuentra por detrás del muro, a la altura de las duchas, indicado por los servidores que laboran en el balneario de aguas calientes. Se ha denominado así a la fuente que alimenta a las piscinas 5 y 6 en horas de la noche (9 pm) inmediatamente después de ser vaciadas mediante un sistema de válvulas, luego en horas de la mañana del día siguiente cambian para abastecer con las piscinas 2 y 3. El caudal de esta fuente es la más importante, se estima que sea 15 l/min, medido en la piscina 5, sin embargo, siendo este caudal regulado distribuido por tubería, no es posible establecer con mayor precisión el caudal en esta fuente.

Manantial 2. Corresponde a la piscina 2. En este caso de la piscina 2 se ha establecido 18.57 l/min para dos horas de llenado, es decir medido entre al 9 pm y las 11 pm, este caudal parece disminuir cuando se calcula para un mayor volumen resultando 15.35 l/min. En esta piscina se ha tomado información de parámetros fisicoquímicos y se ha realizado el muestreo de agua.

Manantial 3. En esta fuente hay mucha variación de los volúmenes y el caudal, se ha estimado un caudal de 20.57 l/min que resulta muy alto respecto a la fuente principal, este caudal refleja que el llenado se realiza con dos fuentes, la que corresponde a la fuente 1 que se deriva y se suma al que tienen la misma piscina que tendría en todo caso, un promedio de 15.8 l/min, solo como estimado.

Manantial 4. Corresponde a la piscina 4, en esta fuente se ha estimado un caudal para 6 horas y 20 min, 20.079 l/min, medido a la 3.20 am, horas antes del control con válvulas, pero al igual que en el caso de la fuente 2, el caudal promedio en el día disminuye a 15.8 l/min.



Tabla 13. Caudal en las piscinas 2 y 4, en las 2 y 6 primeras horas de llenado.

Piscina	Area (m2)	Altura de agua (m)	Tiempo de llenado (min)	Volumen de llenado (m3)	Caudal Q(l/min)
2	14.86	0.15	120	2.229	18.575
4	2231	1.18	200	4.0158	20.079

Manantial 5. Esta se encuentra entre la piscina 4 y Piscina 5, no es posible medir su caudal, dado que se mantiene en el mismo nivel y es utilizado para la mezcla de las duchas de la parte baja, se ha tomado medidas de temperatura de 33°C.

Manantial Exterior 1. Esta se encuentra en los exteriores de las piscinas, se trata de una surgencia debajo de un gran bloque soportado por bloques de diferentes tamaños que corresponden a depósitos fluvio-aluviales, en el que no se puede apreciar el macizo rocoso, de donde se supone emergen, por lo que esta fuente tiene una temperatura de 33°C y un caudal de 1.20l/min.

Manantial Exterior 2. Ubicada a 2 y 4 m aguas abajo de la caída de agua de la tubería, en el borde del río Aguas caliente, donde no es posible obtener datos de caudal ni de temperatura, dado que la fuente está al nivel del río y se encuentra mezclándose, sin embargo, se observa la oxidación en las fracturas y sobre los bolones donde discurre.

Se debe precisar, que las fuentes de agua 2 y 4 se hallan cubiertas con material de concreto, lo que dificulta que las surgencias de aguas termales puedan emerger libremente, generando presiones indebidas, ocasionando que los flujos de agua subterránea busquen nuevos conductos como fisuras y /o oquedades a través de los cuales puedan salir, como se observa en las piscinas 2,3, y 4, también estas presiones pueden estar relacionadas a las surgencias de los manantiales exteriores Mext-1 y Mext-2.



6.4. HIDROQUÍMICA.

La hidroquímica es una herramienta de la hidrogeología que permite establecer correlación entre los aspectos geoquímicos del agua subterránea y su relación con los suelos y rocas, para lo que se recurre a los análisis químicos de las aguas y su interpretación.

6.4.1. Estaciones de muestreo de agua.

En el área de estudio se encuentran tres surgencias naturales de agua termal, una de las cuales, está captada, que es la que abastece a los Baños Termales de Machupicchu y está totalmente sellada (manantial captado 1). Las otras dos surgencias se encuentran en el cauce del río (manantial ext. 1 y manantial ext. 2) Además de estas fuentes también existen 6 piscinas de uso balneológico, de las cuales en el fondo de las piscinas 2, 3 y 4, salen pequeños caudales de agua termal, aprovechando algunas grietas y zonas sin cementar de las piscinas.

Figura 116. Extracción de Muestra de Agua.





Se tomaron parámetros fisicoquímicos en el manantial ext.-1(M Ext -1), y en las piscinas 2 y 3, la toma de parámetros en las piscinas, se hizo una vez se vaciaron y cuando estaban en proceso de llenado, para asegurarnos de que los datos sean reales, poniendo énfasis en los pequeños caudales que emergían del fondo de las piscinas. Así como, se tomó una muestra en el manantial ext.-1, para su respectivo análisis químico.

Figura 117. Captación de aguas superficiales.





Figura 118. Reservorio de aguas superficiales para consumo humano.



El objetivo principal es conocer las características hidroquímicas de las aguas, su interacción con los materiales del entorno y como están siendo afectadas por estas. La muestra de agua se analizó por aniones (cloruros, sulfatos y bicarbonatos) y cationes (calcio, magnesio, sodio y potasio), lo que permitió conocer las características hidroquímicas del agua.

El muestreo de las aguas ha sido realizado en diferentes fuentes entre superficiales (en cumplimiento de los términos de referencia) y subterráneas. Las superficiales han sido realizadas en la captación de las aguas para el consumo de la Ciudad de Aguas calientes y en el ingreso al reservorio ubicado en la parte alta del balneario, mientras que las subterráneas han sido realizados los manantiales y en las piscinas tal como se puede apreciar en siguiente tabla.



Tabla 14. Ubicación de inventario de muestras de agua.

N° de Muestra	Ubicación	Superficial	Subterránea
M-1	Captación	x	
M-2	Reservorio	x	x
M-3	Manantial exterior 1		x
M-4	Manantial exterior 2		x
M-5	Piscina 2		x
M-6	Piscina 3		x
M-7	Piscina 4		x
M-8	Captación		x

6.4.2. Análisis de Parámetros Físico-Químicos.

Tabla 15. Resumen de Parámetros Físicoquímicos de las Fuentes de Agua.

Parámetros	Piscina 2	Piscina 3	Manantial Exterior 1
T(°C)	41	45	33
PH	6.36	6.02	6.76
CE (ms/cm)	5.662	5.901	5.702
TDS (ppt)	2.78	2.87	2.55
Salinidad (PSU)	3.126	3.209	2.85
Resistibilidad (Ohm/cm)	176.5	171.4	192.5

6.4.2.1. Análisis de Ph.

El PH define la acidez y/o la alcalidad del agua, registrando para aguas neutras los valores comprendidos entre 6.5 a 8.5, para aguas ácidas, valores inferiores a 6.5, y para aguas básicas, valores por encima de 8.5.

En el área de estudio, tenemos aguas neutras a ligeramente ácidas, debido a las reacciones químicas del agua termal con el granito presente en la zona, generando algunos precipitados.



6.4.2.2. Análisis de Conductividad Eléctrica.

Para la conductividad eléctrica, donde se representa el contenido de sales disueltas en el agua, y en comparación con los valores referenciales de los estándares de calidad ambiental, del DS 004-2017-MINAM, se observa lo siguiente.

Los valores de conductividad eléctrica superan los 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, siendo estas aguas con altos contenidos de sales, esto se debe a que los flujos de agua infiltraron muy en profundidad, lavando las rocas del entorno, y al ir infiltrando en profundidad, van ganando temperatura, lo que facilita que el agua lave los materiales de su alrededor.

6.4.3. Análisis de Facies Hidroquímicas.

Tabla 16. Resultados de laboratorio de la UNSAAC de muestras de agua.

N° Muestra	PH	C.E. (uS/cm)	Dureza (ppm) CaCO ₃	Ca (ppm)	Mg (ppm)	Na (ppm)	K (ppm)	Cloruros (ppm)	Sulfatos (ppm)	Bicar-bonatos (ppm)	Sales Solubles Totales (pmm)
M-1	8.12	100	72	21.28	4.14	4	0.25	3.9	10.4	39.1	172.9
M-2	8.15	52	36.92	10.64	1.84	3	0.19	1.7	8.8	24.6	88.7
M-3	7.35	5800	2552	927.2	40.5	1666	141.6	2690	506.8	286.5	5940
M-4	7.67	3120	1435.2	516.8	25.8	622	66	1050	310.9	204	3270
M-5	7.18	5580	2566.5	919.2	48.8	1491	114	2490	491.8	241.2	5644
M-6	7.08	5750	2656.5	916.6	71.8	1476	128	2476	436.4	256	5840
M-7	6.95	5780	2653	922.64	67.2	1486	130	2460	472	248.2	5856
M-8	7.15	5860	2695	919.6	79.1	1624	14.2	2716	466.5	256.2	5977

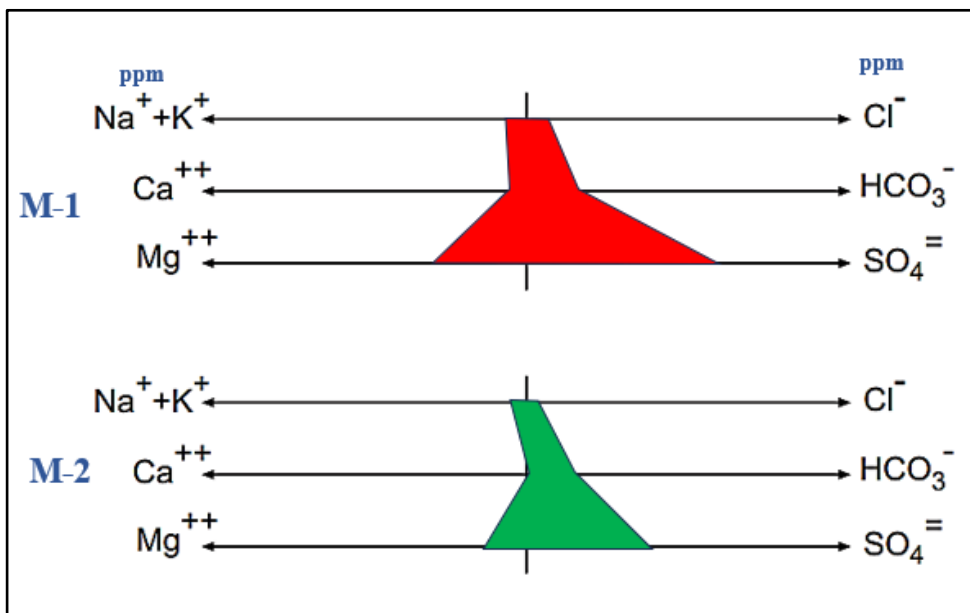
En la determinación de las predominancias químicas, se usó diagramas hidroquímicos interpretativos, donde se procesó los datos del resultado del laboratorio. Representa los valores y el predominio de los elementos químicos mayoritarios, mediante los diagramas de Stiff, Piper y Scatter.



6.4.3.1. Diagrama de Stiff.

En el diagrama de Stiff, se evaluaron las concentraciones de los componentes iónicos mayoritarios, como los cationes (Ca, Mg, Na y K) y aniones (bicarbonatos, sulfatos y cloruros). Dichos diagramas representan sintéticamente las características químicas principales del agua, facilitando su clasificación.

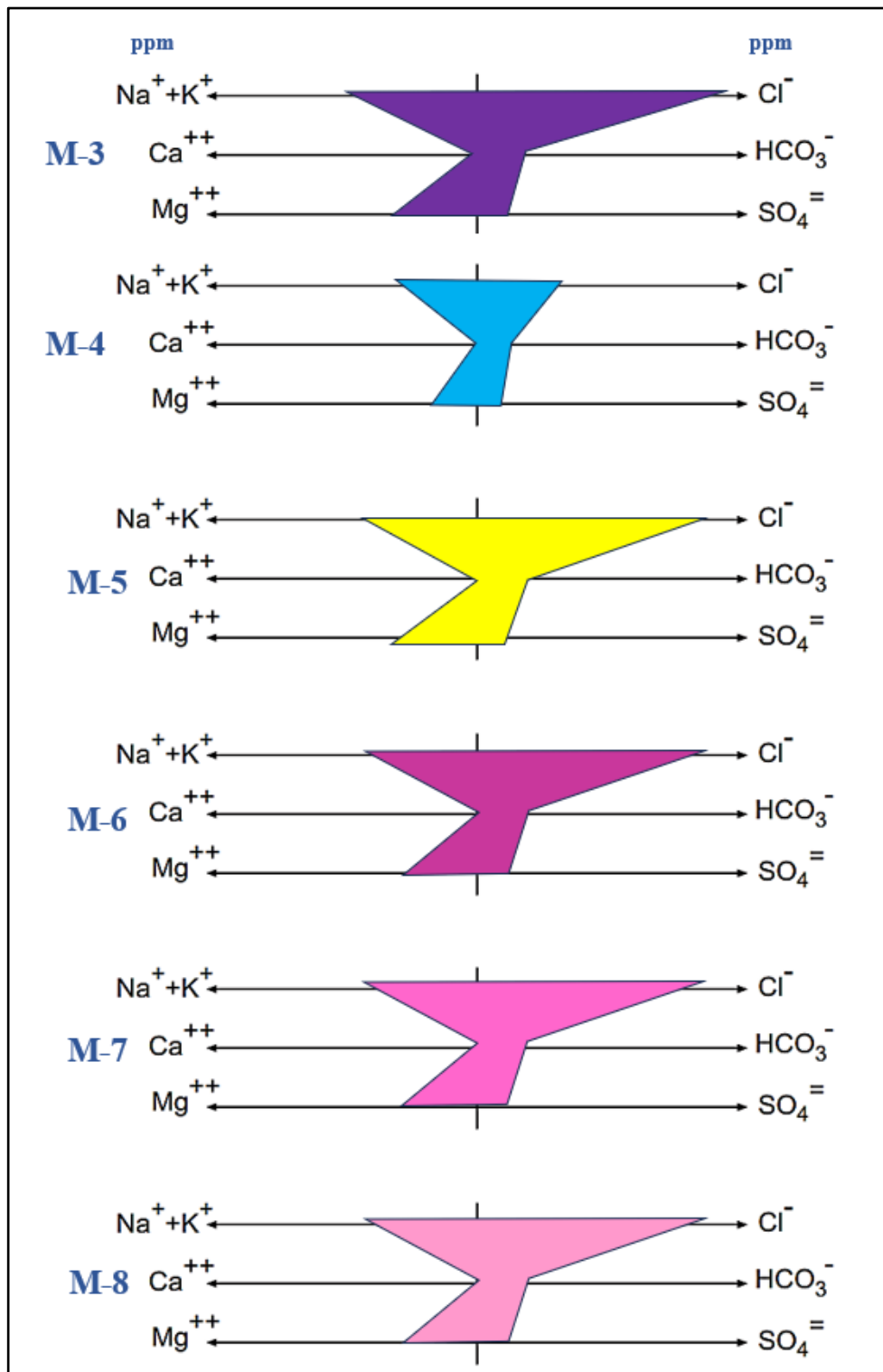
Figura 119. Diagrama de Stiff de las muestras M-1 y M-2.



Nota: Modificado de (Martínez Alfaro, Martínez Santos , & Castaño Castaño , 2006)



Figura 120. Diagrama de Stiff de las muestras M-3, M-4, M-5, M-6, M-7 y M-8.



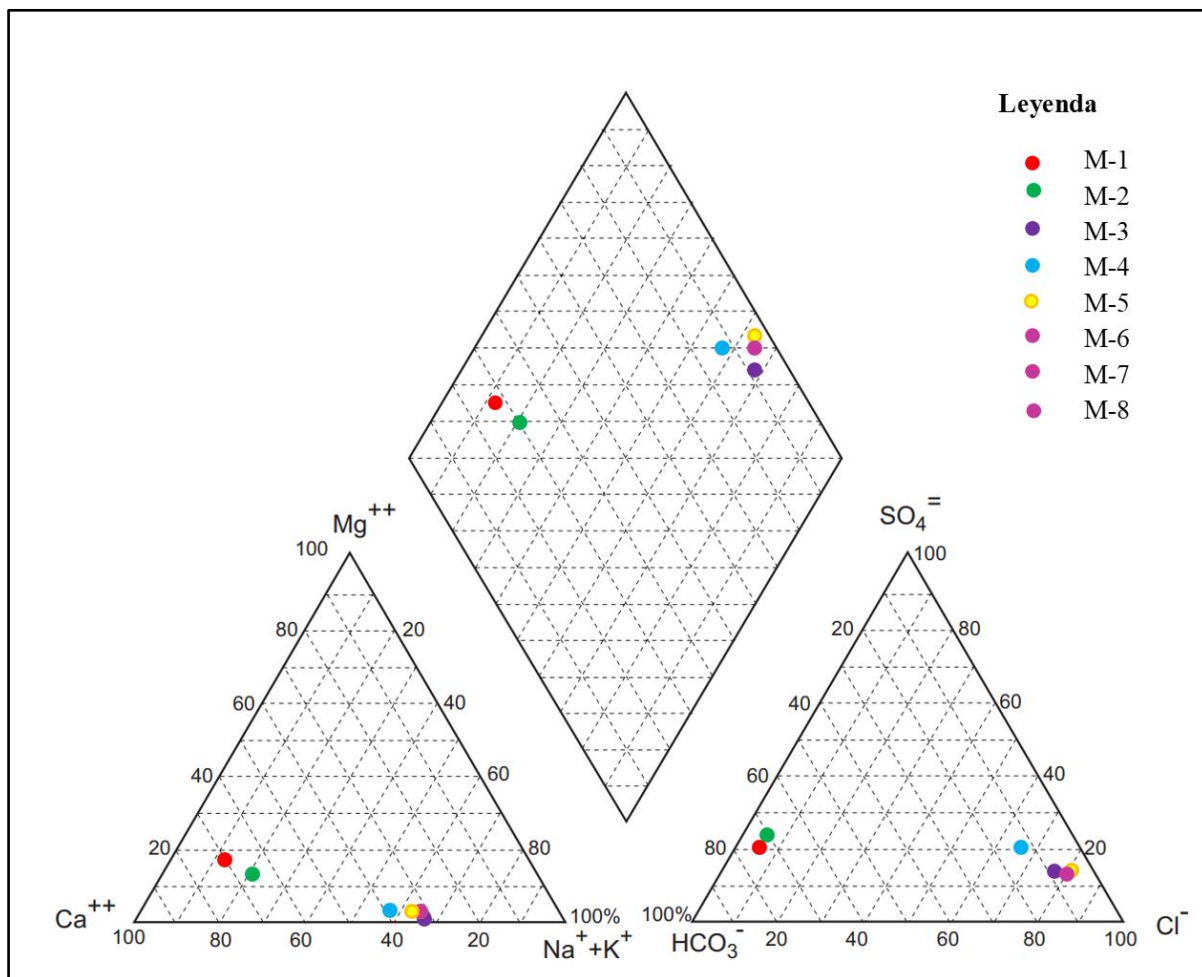
Nota: Modificado de (Martínez Alfaro, Martínez Santos , & Castaño Castaño , 2006)



6.4.3.2. Diagramas de Piper.

En la siguiente figura se muestra el diagrama de Piper, analizando la predominancia iónica y las facies hidroquímicas a las que las aguas pertenecen. El ploteo de los resultados de elementos mayoritarios, que se muestran en el diagrama de Piper, corrobora la predominancia que se muestra en el diagrama de Stiff.

Figura 121. Diagrama de Piper de las muestras M-1, M-2, M-3, M-4, M-5, M-6, M-7 y M-8.



Nota: Modificado de (Martínez Alfaro, Martínez Santos , & Castaño Castaño , 2006)

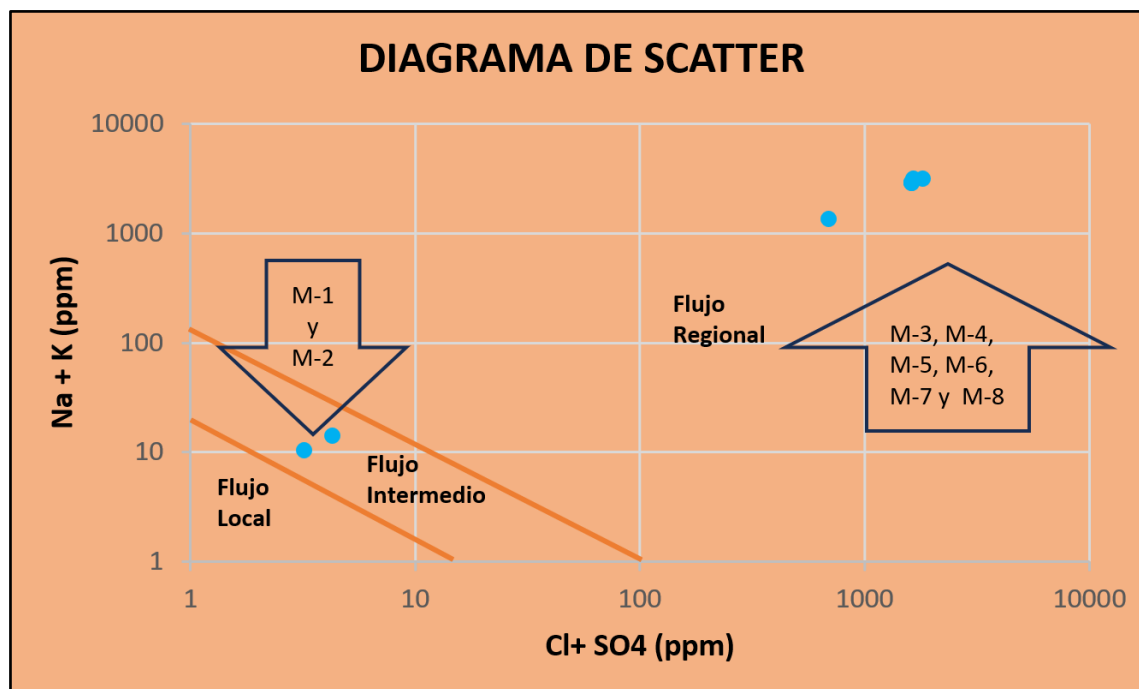
El diagrama de Piper, y el diagrama de Stiff, muestran que la fuente de agua analizada que representa a los flujos de agua de los baños termales de Machupicchu, son del tipo Cloruradas

Sódica-Cálcica, el ion cloruro es un común indicador de flujos de agua de recorrido regional, esto debido a la gran percolación de las aguas, por las fracturas abiertas e interconectadas que se presentan en el granito, llegando a mucha profundidad y concentrándose de sales y minerales en el camino, así, como en temperatura, debido a la gradiente geotérmica, por estas mismas razones es que las aguas presentan conductividades eléctricas elevadas, superando los 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

El diagrama de Piper, y el diagrama de Stiff, para las muestras M-1, Y M-2 obtenidas en el Laboratorio de la UNSAAC, son indicadores de aguas tipo bicarbonatadas cálcicas.

Haciendo una comparación con el diagrama de Scatter, observamos que realmente corresponde a flujos regionales, de gran recorrido y percolación en profundidad.

Figura 122. Diagrama de Scatter de las muestras M-1, M-2, M-3, M-4, M-5, M-6, M-7 y M-8.



Nota: Modificado de (Martínez Alfaro, Martínez Santos , & Castaño Castaño , 2006)



6.4.4. Calidad de Agua.

En la actualidad en el estado peruano no está normado los parámetros para el uso y beneficio de las aguas termales, por tanto, no es posible determinar qué calidad de aguas termales son los que se tiene en el Balneario de aguas Calientes.

Se tienen como proyecto el “DECRETO SUPREMO QUE APRUEBA EL REGLAMENTO DE LOS SERVICIOS TURÍSTICOS QUE PRESTAN LOS CENTROS DE TURISMO TERMAL Y/O SIMILARES”. Que textualmente indica: “El Proyecto de Reglamento, en adelante Reglamento, tiene por objeto regular los servicios turísticos que prestan los centros de turismo termal y/o similares, considerado como un servicio turístico en el Anexo N° 1 de la Ley N° 29408 – Ley General de Turismo (en adelante, LGT), en aquellos aspectos que son de competencia del sector, de acuerdo con la normatividad sectorial vigente y la normatividad pertinente en materia de aprovechamiento de los recursos hídricos.

Al respecto, se debe recordar que conforme al Decreto Ley N° 25533 y su Reglamento, aprobado por Decreto Supremo N° 05-94-ITINCI, modificado por el Decreto Supremo N° 015-2005-MINCETUR, el Ministerio de Comercio Exterior y Turismo (en adelante, MINCETUR) y los Órganos Regionales Competentes en materia de turismo, tenían la facultad legal de otorgar concesiones de uso para la explotación de las aguas minero medicinales con fines turísticos, bajo las condiciones establecidas en dichas normas. Dicha facultad ha quedado derogada tácitamente por la Ley N° 29338 - Ley de Recursos Hídricos (en adelante, LRH), conforme a la cual la única autoridad competente y facultada para otorgar derechos de uso sobre las aguas es la Autoridad Nacional del Agua (en adelante, ANA), a través de sus órganos desconcentrados.

En la actualidad no se cuenta con la aprobación de normas específicas de calidad del agua para aguas termo- medicinales, por tanto, no es posible categorizarlo a que calidad pertenece.



Si bien existe estándares de Calidad Ambiental que han sido publicados en el DS N°004-2017-MINAM, perteneciente a la “Subcategoría B: Aguas superficiales destinadas para recreación, Entiéndase como aquellas aguas destinadas al uso recreativo que se ubican en zonas marino costeras o continentales”, para la calificación de la calidad de las aguas para recreación, estas difieren de las aguas termo medicinales, por tanto, no es posible determinar la calidad de las aguas termales de Aguas Calientes. Se tiene los resultados obtenidos en el laboratorio de la UNSAAC.

6.4.5. Determinación de Temperatura de foco por Geotermómetros.

Para determinar la temperatura de foco por geotermómetros se utilizó las siguientes formulas:

- Geotermómetro de Sodio y Potasio (Na-K) elaborado por Truesdell en 1976.

$$T (Na - K) = \left(\frac{855.6}{\log\left(\frac{Na}{K}\right) + 0.8573} \right) - 273.159$$

- Geotermómetro de Sodio, Potasio y Calcio (Na-K-Ca) diseñado por Truesdell y Fournier en 1976.

$$T(Na - K - Ca) = \left(\frac{1647}{\log\left(\frac{Na}{K}\right) + \frac{1}{3} \left(\log\left(\sqrt{\frac{Ca}{Na}}\right) + 2.06 \right) + 2.47} \right) - 273.159$$

Fuente: (Aymerich Urzaiz, 2013)



Tabla 17. Resultados de Temperatura de Foco de las 8 muestras de agua, utilizando dos métodos (Na-K y Na-K-Ca).

N° Muestra	CATIONES				TEMPERATURA	
	Ca ppm	Mg ppm	Na ppm	K ppm	Na-K (°C)	Na-K-Ca (°C)
M-3	927.2	40.5	1666.4	141.6	170.6	120.4
M-4	516.8	25.8	622.0	66.0	194.0	126.8
M-5	919.2	48.8	1491.0	114.0	160.3	115.4
M-6	916.6	71.8	1476.0	128.0	172.7	120.5
M-7	922.6	67.2	1486.0	130.0	173.5	120.8
M-8	919.6	79.1	1624.0	140.2	172.2	120.9
Promedio de Temperaturas:					173.9	120.8

Como se puede observar hay ciertas discrepancias con los valores obtenidos, ciertamente las estimaciones empíricas de los geotermómetros químicos pueden ser más optimistas o pesimistas según las diferentes situaciones geológicas, geotérmicas y geoquímicas de la localización estudiada.

Así se puede ver como el geotermómetro Na-K-Ca es el más pesimista dentro de los valores obtenidos, y el geotermómetro Na-K el más optimista.

6.4.6. Determinación de la Profundidad del foco por Gradiente Geotérmico.

Para determinar la profundidad a la cual está el foco geotérmico, se usará el gradiente geotérmico y por regla de tres simple se sacará dicha profundidad.

$$\text{Gradiente Geotérmico} = 3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$$

$$\text{Temperatura Superficial Promedio (}^{\circ}\text{C)} = 14$$

$$\text{Temperatura en Foco Promedio (}^{\circ}\text{C)} \text{ Geotermómetro Na-K-Ca} = 120.8$$

$$\text{Temperatura en Foco Promedio (}^{\circ}\text{C)} \text{ Geotermómetro Na-K} = 173.9$$



$$\blacktriangle \text{ Temperatura } (^{\circ}\text{C}) = \text{Temperatura en foco} - \text{Temperatura en superficie}$$

$$\blacktriangle \text{ Temperatura } (^{\circ}\text{C}) = 120.8 - 14$$

$$\blacktriangle \text{ Temperatura } (^{\circ}\text{C}) = 106.8$$

$$3^{\circ}\text{C} \leftrightarrow 100\text{m}$$

$$106.8^{\circ}\text{C} \leftrightarrow X$$

$$3X = 106.8 * 100 \text{ m}$$

$$X = \frac{10680}{3} \text{ m}$$

$$X = 3560 \text{ m}$$

Por ende: La profundidad a la cual se encuentra el foco es 3.56 km para el geotermómetro Na-K-Ca.

$$\blacktriangle \text{ Temperatura } (^{\circ}\text{C}) = \text{Temperatura en foco} - \text{Temperatura en superficie}$$

$$\blacktriangle \text{ Temperatura } (^{\circ}\text{C}) = 173.9 - 14$$

$$\blacktriangle \text{ Temperatura } (^{\circ}\text{C}) = 159.6$$

$$3^{\circ}\text{C} \leftrightarrow 100\text{m}$$

$$159.6^{\circ}\text{C} \leftrightarrow X$$

$$3X = 159.6 * 100 \text{ m}$$

$$X = \frac{15960}{3} \text{ m}$$

$$X = 5320 \text{ m}$$



Por ende: La profundidad a la cual se encuentra el foco es 5.32 km para el geotermómetro Na-K.

En Consecuencia, la Temperatura promedio de foco es 147.4°C y la profundidad promedio de foco 4.44 Km.

Figura 123. Temperatura de foco según los geotermómetros.

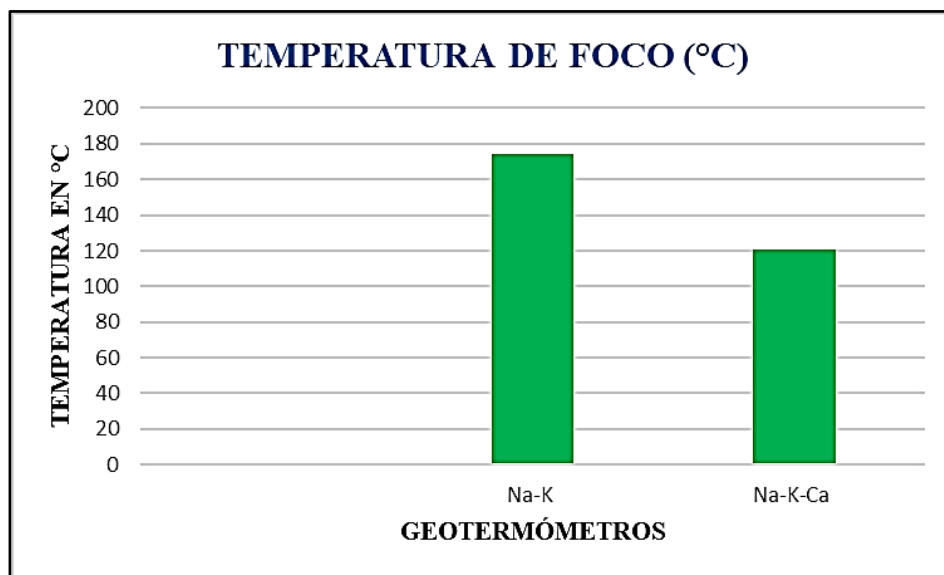
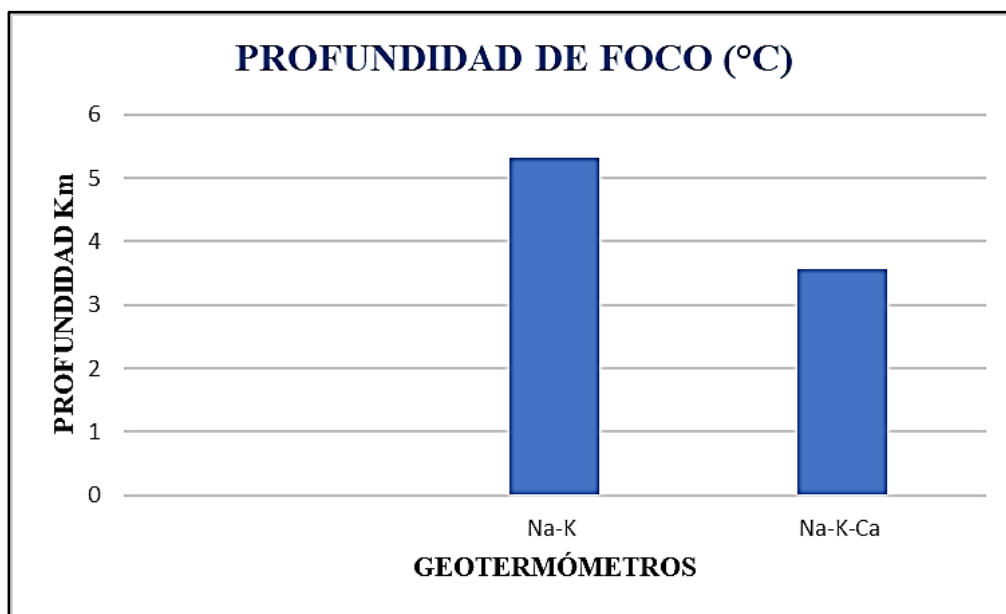


Figura 124. Temperatura de foco según los Geotermómetros.





CAPÍTULO VII: GEOFÍSICA E INTERPRETACIÓN HIDROGEOLÓGICA

7.1. SECCIONES TOMOGRÁFICAS

Se han realizado tres secciones tomográficas alineadas paralelas a la dirección del río Aguas calientes, con la finalidad de establecer una interpretación lo más acertada posible, considerando que en las visitas previas se había tomado conocimiento de la surgencia de aguas termales en los exteriores del balneario, siendo así, la mejor forma de atravesar estas líneas de flujo era efectuando en el alineamiento considerado, que funcione tal como se interpreta posteriormente.

7.1.1. Ubicación de las líneas

Las líneas están ubicadas de acuerdo a lo que se muestra en la siguiente figura, distribuidas de manera paralela.

La primera a lo largo del muro de gaviones con una longitud de 90 m, distribuidos los electrodos cada 1.5m de distancia.

La segunda en el centro de las piscinas, la que se tuvo que realizar en horas de la noche debido al flujo de turismo, tiene 60 m de longitud dispuestos cada un metro de equidistancia entre electrodos, para lo cual se ha realizado las perforaciones de 5/16” de diámetro y 1/2 “de profundidad.

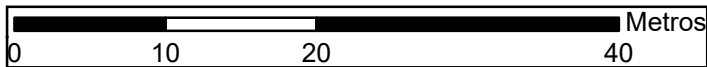
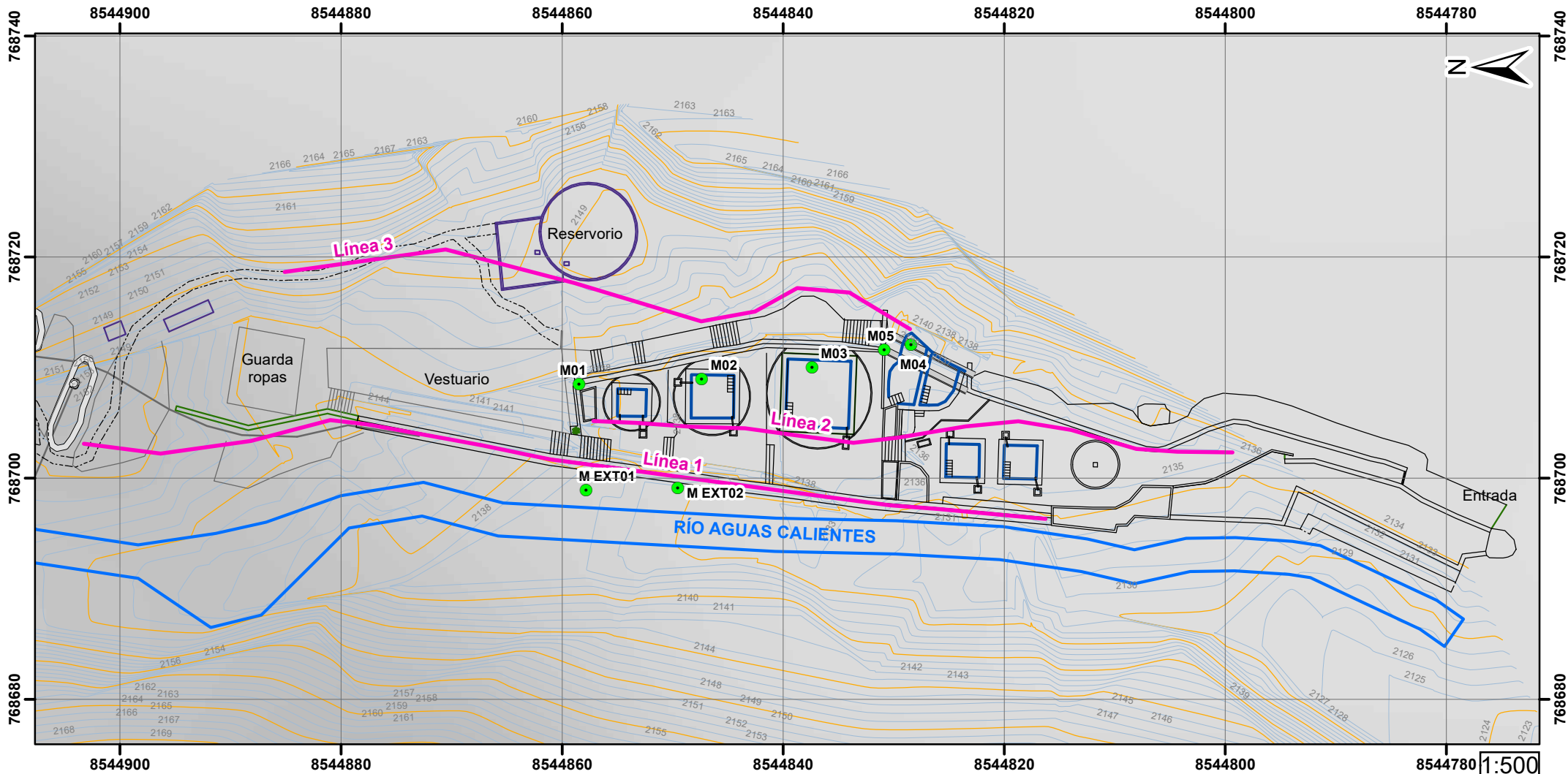
La tercera fue realizada en una longitud también de 60m en la proximidad del talud entre el reservorio y la malla de protección del balneario.

Figura 125. Línea Geoelectrica 01.



Figura 126. Línea Geoelectrica 02.





Simbología	
— Líneas de Tomografía Eléctrica	
Infraestructura	● Manantes termales
--- Camino	— Río
— Infraestructura	Curvas de nivel
— Piscina	— Curvas primarias
— Puente	— Curvas secundarias
— Reservorio	

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO	
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA	
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA	
TESIS: "CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y GEOMECANICA DE LOS BAÑOS TERMALES DE AGUAS CALIENTES DEL DISTRITO DE MACHUPICCHU, PROVINCIA DE URUBAMBA, REGION CUSCO"	
MAPA: MAPA DE UBICACIÓN DE TOMOGRAFÍAS ELÉCTRICAS	ESCALA: INDICADA
ELABORADOR POR: KATHERINE GUTIERREZ PERALTA - VANESSA I. VALVERDE GOYZUETA	
FUENTE DE DATOS: ING. LÓPEZ ZAPANA RONALD LUIS	
DATUM: WGS 1984_UTM_ZONA_18S	
MAPA N° 09	



7.1.2. Descripción de la interpretación de secciones

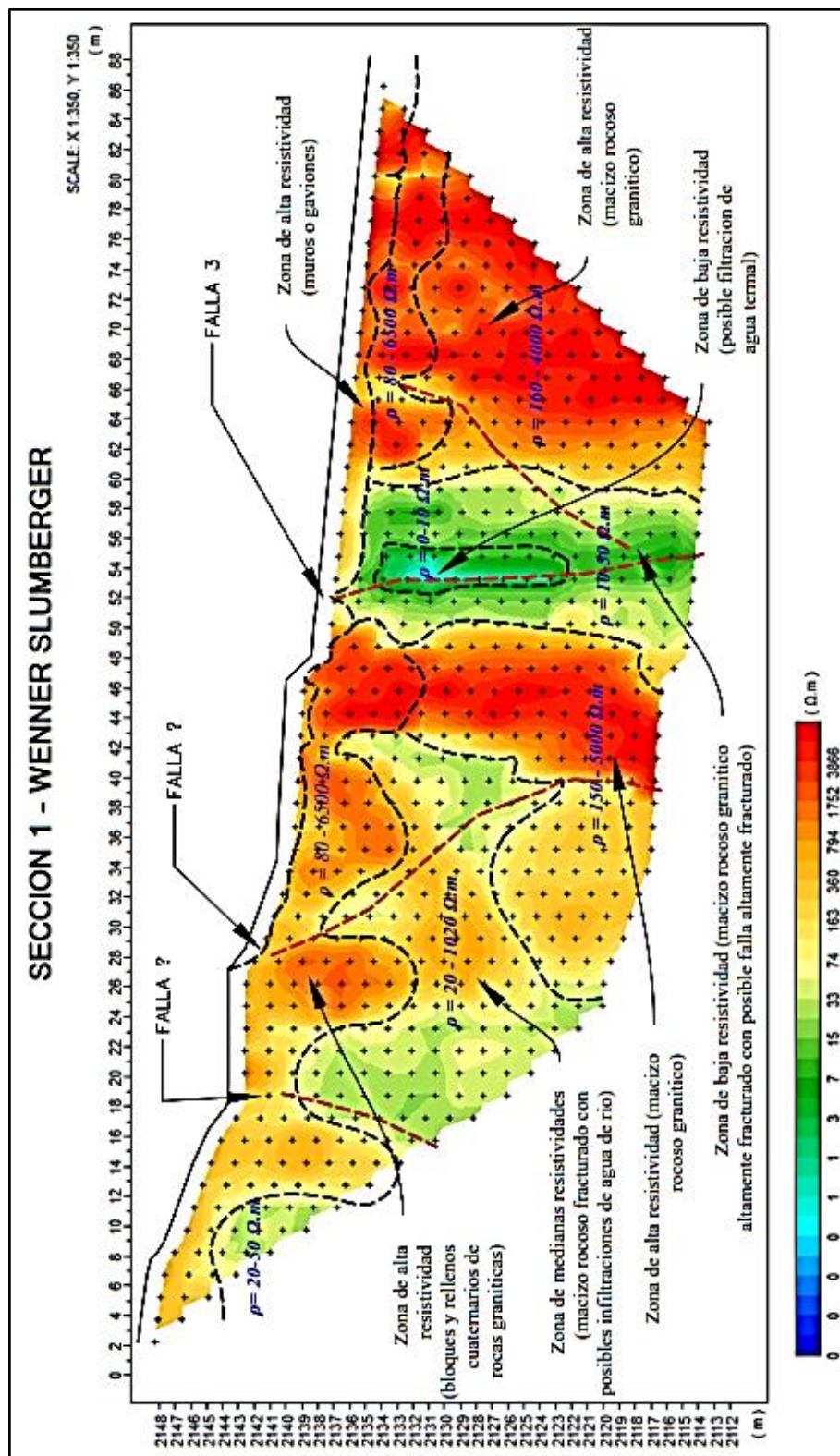
En base a las tres líneas tomográficas, después de las iteraciones respectivas, así como las interpretaciones correspondientes se ha procedido a describir cada una de las secciones tomográficas.

Se describe cada una de las tres secciones interpretadas en base a los dos métodos, con la descripción de las características de los materiales basados en la interpretación de las resistividades obtenidos en las líneas Geoeléctricas.

7.1.2.1. Sección Wenner Slumberger. Sección 1.

Esta sección ha sido interpretada en base a las resistividades de los materiales con el método de Wenner Slumberger, describiéndose tres zonas importantes de rangos de resistividad. Está ubicada en los exteriores del muro que protege del rio Aguas calientes. Paralelo a este muro.

Figura 127. Sección de la Tomografía Eléctrica ubicada a lo largo del camino de acceso al reservorio.





➤ **Zona de alta Resistividad.**

Corresponde a bloques y bolones coluviales y el macizo rocoso sin fracturas abiertas, las primeras zonas corresponden a la zona alta (exteriores de los vestidores) donde se encuentran acumulación de bloques dispuestos de manera caótica producto de eventos geodinámicos en esta quebrada. También el macizo rocoso que tiene un bajo grado de fracturamiento responde a una alta resistividad, por tanto, las zonas de bloques y el macizo están representados con colores en el rango de rojo oscuro a rojo tenue, con valores de hasta 6000 ohm-m.

➤ **Zona de mediana Resistividad.**

Corresponde al macizo rocoso con cierto grado de fracturamiento, o que estando presentes se encuentran sin aberturas, es decir con escasa abertura que no sobrepasa 1 mm de abertura en su conjunto. Estos pueden contener humedad en porosidad secundaria, sin embargo, no existen flujos importantes de aguas que puedan circular. Estas zonas presentan variaciones tanto horizontales como verticales, adquiriendo direcciones preferentes las cuales estarían asociados a zonas de debilidad tal es el caso entre las progresivas 50 al 58 por donde atraviesa la falla N° 3; están comprendidas en un rango de resistividad de 20 – 150 ohm-m.

➤ **Zona de baja Resistividad.**

Corresponde al macizo rocoso fracturado y cuyas aberturas son significativas, de modo que un conjunto de varias fracturas en sistemas que se entrecruzan son los que representan a esta zona, que es el representativo de un acuífero fisurado; estas están delimitadas con una coloración verde hasta el azul, que representa zonas del acuífero libre y con algún flujo. Para esta sección, entre las progresivas 53 al 55 se observa una zona de resistividades muy bajas entre 0 a 10 ohm-m

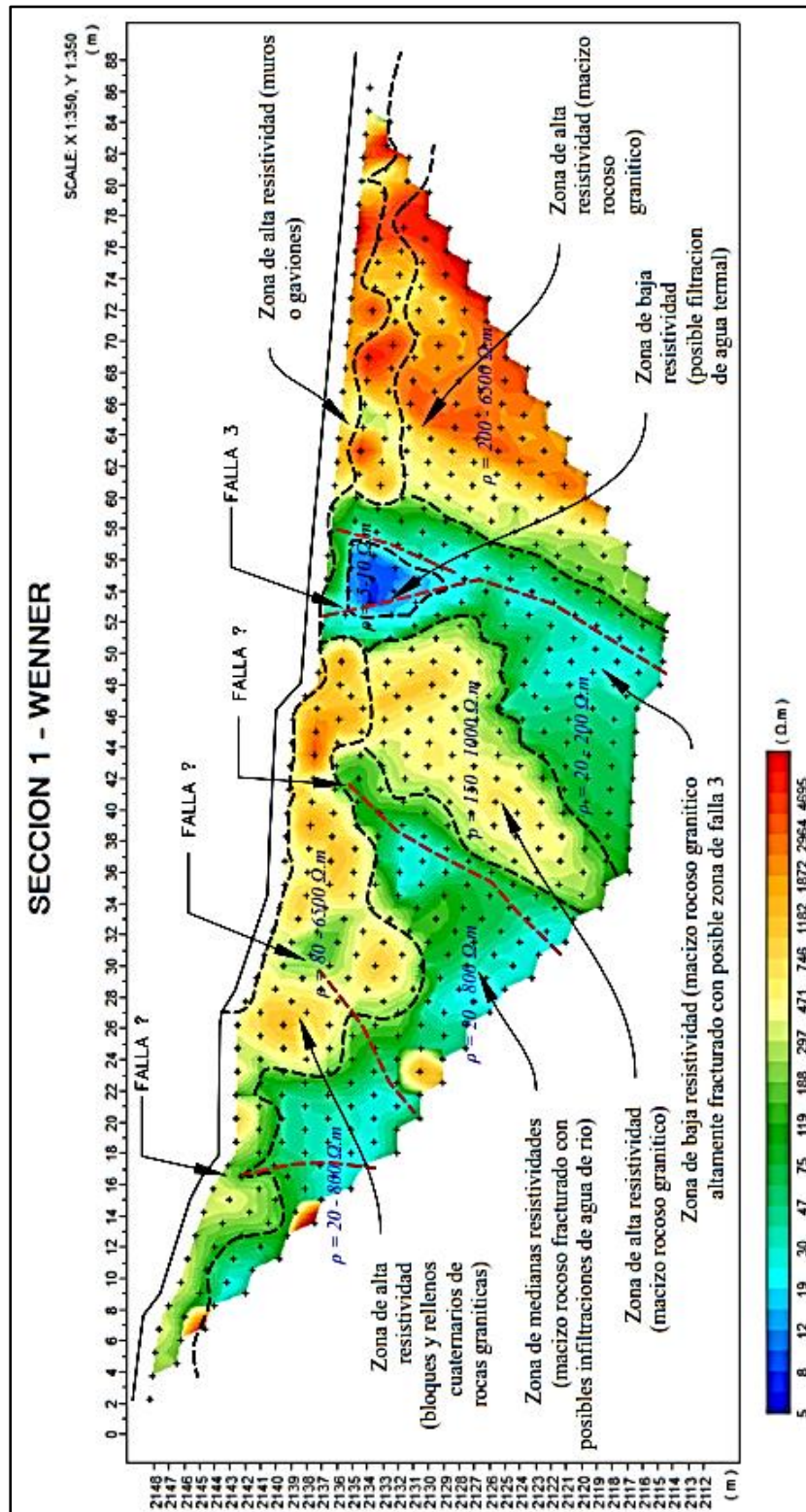


equivalentes a presencia de agua, esta zona es de interés porque se encuentra en la misma dirección de la surgencia de los Muestra exterior 1 y Muestra exterior 2, hacia el río. Esta zona de baja resistividad se observa hasta 15 metros de profundidad aproximadamente y también está en dirección de la falla N° 3.

7.1.2.2. Sección Wenner – Sección 1.

Esta sección ha sido interpretada en base a las resistividades de los materiales con el método de Wenner, describiéndose tres zonas importantes de rangos de resistividad similar a la anterior.

Figura 128. Sección de la Tomografía eléctrica ubicada a lo largo del camino de acceso al reservorio.





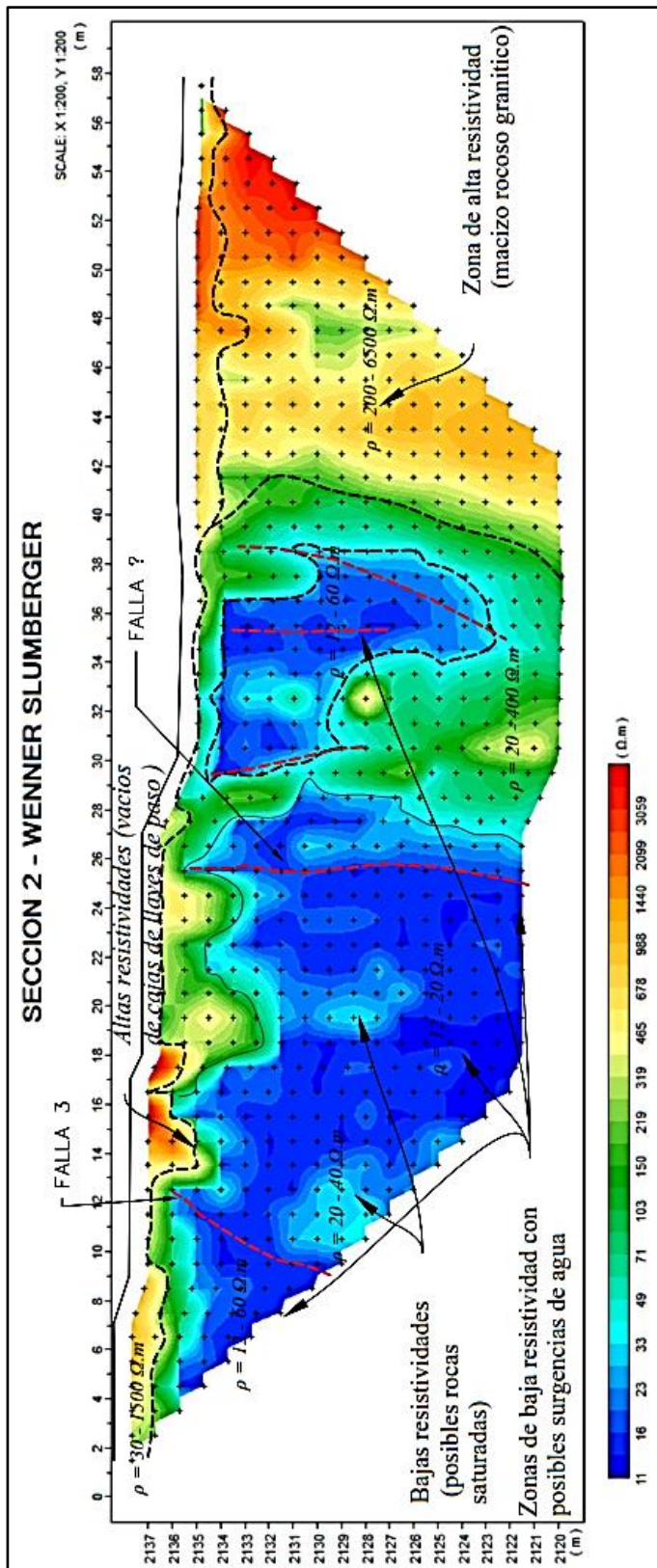
Tiene las mismas características que la sección Wenner –Slumberger, por tanto, se asume las interpretaciones realizadas con esta sección. Destacando solo variaciones horizontales para la zona de menor resistividad 5 a 10 ohm-m en este caso desde la progresiva 52 al 57.

7.1.2.3. Sección Wenner Slumberger – Sección 2.

Esta sección ha sido interpretada en base a las resistividades de los materiales con el método de Wenner Slumberger, describiéndose tres zonas importantes de rangos de resistividad. Está ubicada en la zona central de las piscinas, desde la pared de las duchas hasta la salida de las piscinas.

Figura 129. Sección 2 de la tomografía eléctrica ubicada en la zona central de las

Piscinas.





➤ **Zona de Alta Resistividad.**

Corresponde a los vacíos de los buzones o descarga de las piscinas y la loza de concreto en las zonas superficiales observadas, y el macizo rocoso impermeable en las zonas inferiores y hacia la zona del final del complejo de baños termales.

➤ **Zona de mediana Resistividad.**

Corresponde al macizo rocoso, se puede aseverar que estas rocas se hallan con fuerte a mediano grado de fracturamiento, puede que existan fracturas cerradas y abiertas, es decir con rangos cero y 1 mm en su conjunto. Estos pueden contener humedad en porosidad secundaria, sin embargo, no existen flujos importantes de aguas que puedan circular. Estas zonas se encuentran entre 20 – 400 ohm-m y presentan poca predominancia.

➤ **Zona de baja Resistividad.**

Corresponde al macizo rocoso fracturado y cuyas aberturas pueden superar 1 mm en algunos sistemas y en otros que no superen el mm, de modo que, en conjunto, las fracturas de diferentes aberturas y en sistemas diferentes que se entrecruzan representan a esta zona, el que resulta como representativo de un acuífero fisurado. Están delimitadas con una coloración verde hasta el azul tenue, que representa zonas de flujo y reservas del acuífero.

➤ **Zona de muy baja Resistividad.**

Corresponde al macizo rocoso fracturado con mayor intensidad y cuyas aberturas son de longitudes mayores y sin rellenos que puedan obstaculizar el flujo de las aguas termales. Es esta zona la más representativa de los acuíferos que fluyen hacia superficie. Esta zona presenta



resistividades entre 10 a 20 ohm-m, entre las progresivas 11-12, 15-16 y 24 -25 se observa bajas resistividades en dirección hacia la superficie y las piscinas 2, 3 y 4.

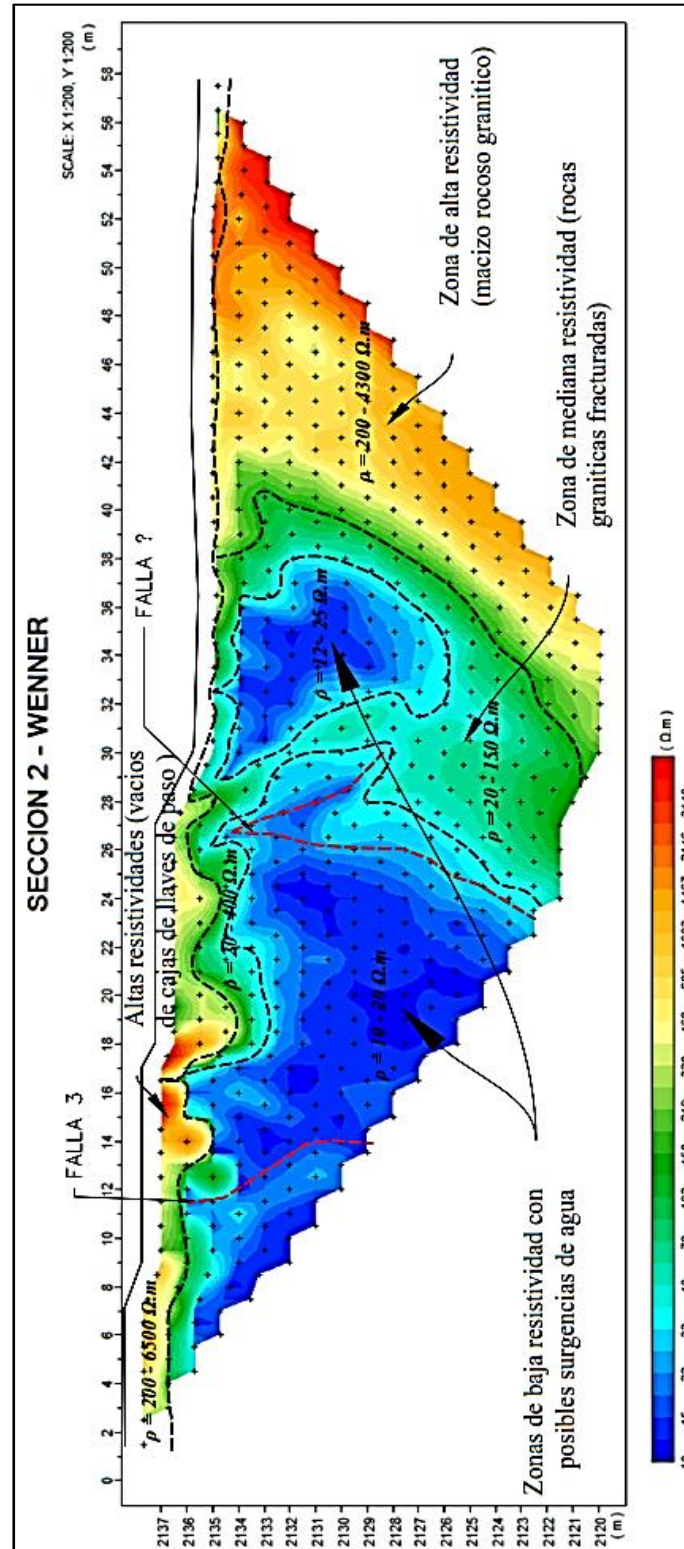
7.1.2.4. Sección Wenner – Sección 2.

Esta sección ha sido interpretada en base a las resistividades de los materiales con el método de Wenner, describiéndose tres zonas importantes de rangos de resistividad.

Esta sección tiene las mismas características que la sección Wenner Slumberger, por tanto, esta sección sirve para corroborar la información obtenida, desde luego que ha sido interpretada de la misma forma.

Figura 130. Sección 2 de la Tomografía Eléctrica ubicada en la zona central de las Piscinas

- Wenner.

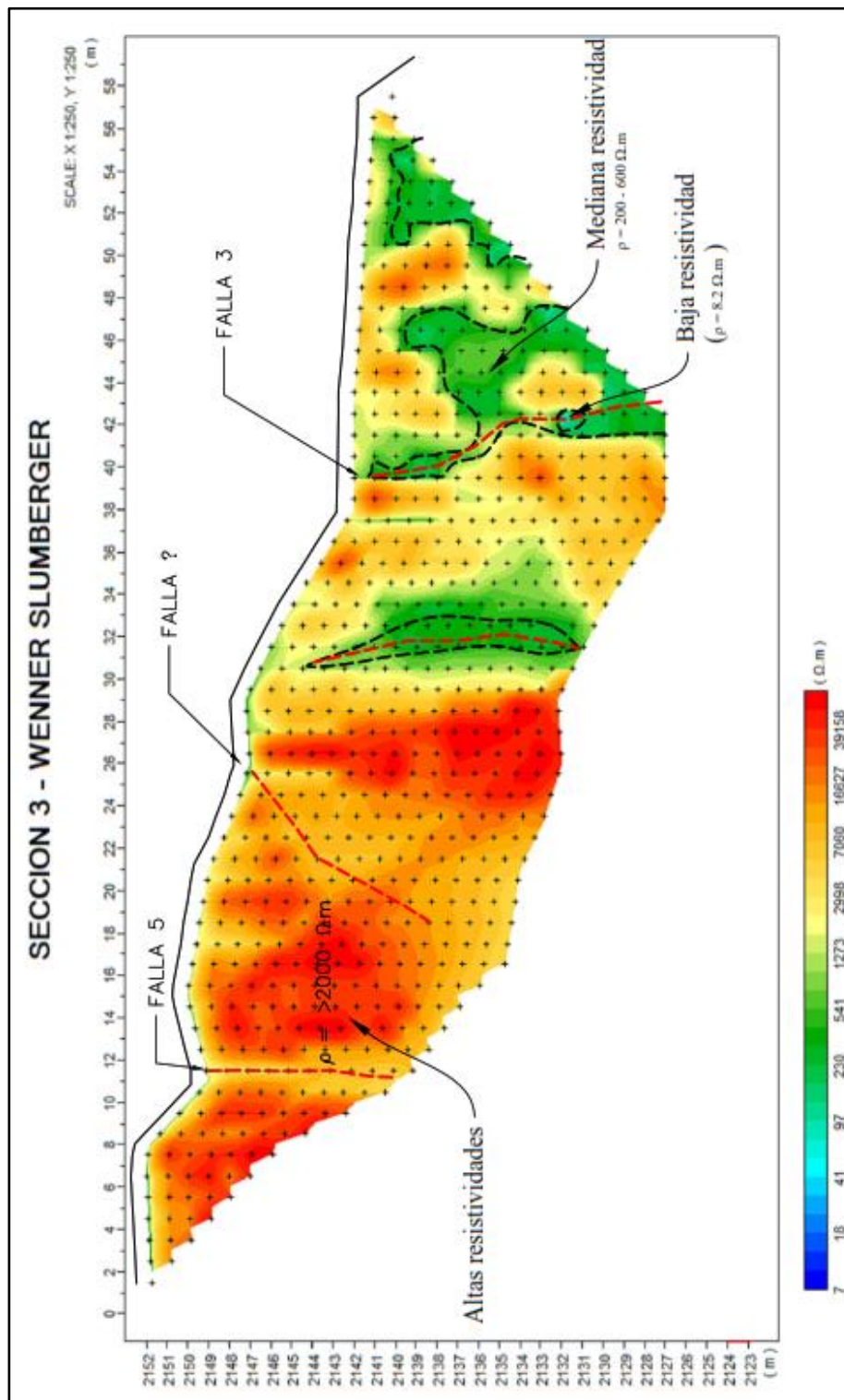




7.1.2.5. Sección Wenner Slumberger – Sección 3.

Esta sección ha sido interpretada en base a las resistividades de los materiales con el método de Wenner Slumberger, describiéndose tres zonas importantes de rangos de resistividad. Está ubicada en la zona del talud del reservorio desde la entrada al camino hacia el reservorio hasta la el puente de madera sobre la piscina cuatro.

reservorio.





➤ **Zona de Alta Resistividad.**

Corresponde a la zona de depósitos coluvio aluviales constituido por bloques, bolones y espacios vacíos entre bolones y bloques, estos se hallan dispuestos en los alrededores y aguas arriba del vestuario, entre el talud del macizo y el camino de herradura existente hacia el puente y hacia el reservorio.

➤ **Zona de Mediana Resistividad.**

Corresponde al macizo rocoso con cierto grado de fracturamiento y fallamiento, las fracturas y fallas en esta zona parecen estar rellenas por materiales de alteraciones de las mismas rocas o se encuentran cerradas o con escasa abertura que no sobrepasa un de 1mm de abertura en su conjunto. Estos pueden contener humedad en porosidad secundaria, sin embargo, no representa a un acuífero. Se presentan adquiriendo variaciones horizontales con direcciones verticales concordantes a estructuras de fracturas o fallas en 2 zonas entre las progresivas 31 y 40, esta última en dirección de la familia de falla N° 3.

➤ **Zona de Baja Resistividad.**

Corresponde al macizo rocoso con mayor grado de fracturamiento, cuyas aberturas son significativas, que en algún sistema pueden superar los 5 mm y en otro sistema puede tener menos de 1 mm de abertura en promedio, de modo que un conjunto de los sistemas de fracturas son los que representan a esta zona. En esta sección es representativo de un estrecho acuífero fisurado. Están delimitadas con una coloración verde hasta el azul tenue, que representa zonas de flujo y reservas del acuífero. Están delimitadas con una coloración azul, para esta sección esta zona aparece de manera puntual con una resistividad de 7.3 ohm-m a la altura de la piscina 2 a una



profundidad aproximada de 4 metros a partir de la base de la piscina, pero debajo de la línea 3, también concordante con la estructura de la falla 3.

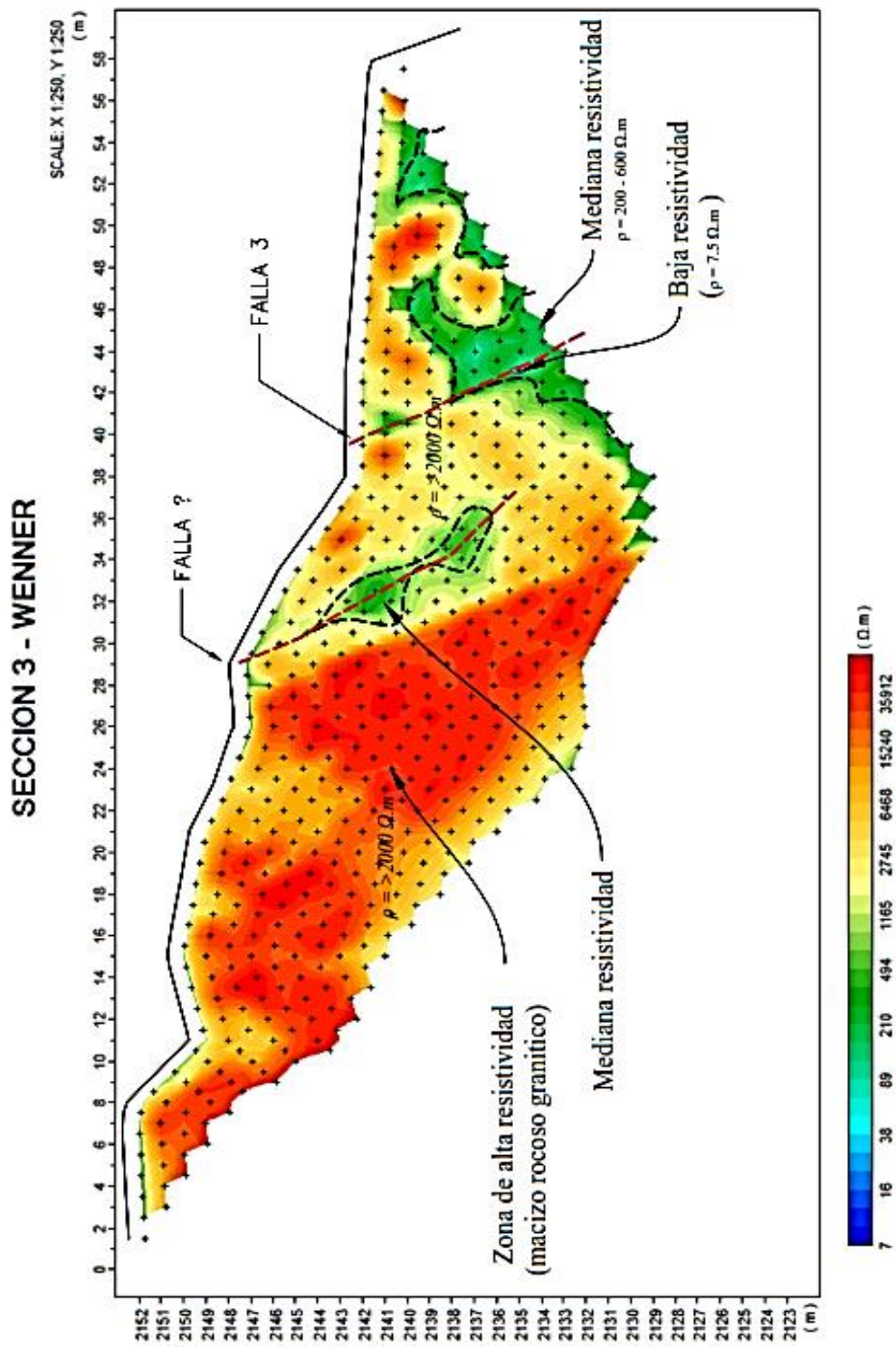
7.1.2.7. Sección Wenner – Sección 3.

Esta sección ha sido interpretada en base a las resistividades de los materiales con el método de Wenner, describiéndose tres zonas importantes de rangos de resistividad.

Esta sección tiene las mismas características que la sección Wenner Slumberger, por tanto, esta sección sirve para corroborar la información obtenida, desde luego que ha sido interpretada de la misma forma.

Los resultados de baja resistividad en las secciones, representan zonas con presencia de aguas termales, ya que la resistividad entre 10 a 20 ohm-m, incluso 7.3 ohm-m evidencian la presencia de los flujos termales que coinciden con las direcciones de fallas y fracturas medidas en superficie y por las secciones tomográficas observadas, estas bajas resistividades en las secciones 1, 2 y 3 representan a las líneas de flujo hacia superficie de las aguas termales.

Figura 132. Sección 3 de la Tomografía Eléctrica ubicada en la parte del río pasando por el reservorio y luego llegando hasta la piscina N°4.





7.2. DESCRIPCIÓN DE UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

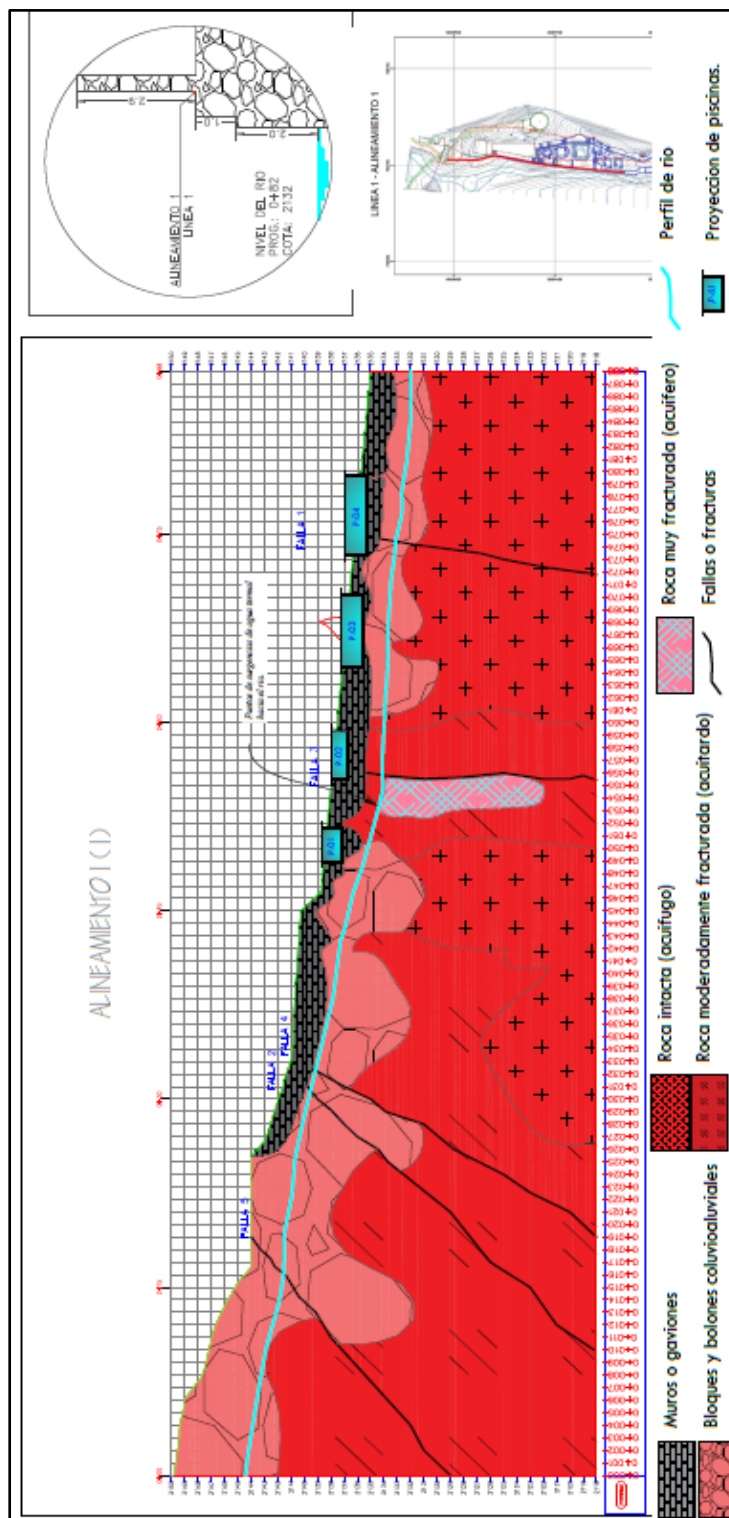
Se describe las unidades hidrogeológicas que han sido identificadas en función a las prospecciones geofísicas (secciones tomográficas) cartografía de las estructuras lineales y fallas en el macizo rocoso de la zona de estudio, los resultados de análisis físico químicos de las aguas termales, así como se ha tomado en consideración los informes verbales de los servidores de la municipalidad que laboran en los baños termales desde hace muchos años atrás y actualmente. Es decir, las unidades hidrogeológicas han sido definidas en función de sus propiedades hidráulicas e hidrodinámicas, que tienen correlato con la dinámica de las aguas subterráneas, asociados al comportamiento hidroquímico durante su trayectoria. Se encuentra relacionado a las características lito-estructurales del área de estudio.

7.2.1. *Acuifugo*

Esta unidad hidrogeológica está representada por rocas intactas o sin fracturamiento del batolito granítico de Machupicchu, estas tienen el carácter de impermeable, sin embargo, pueden tener fracturas y por rellenos de otros minerales estas no permiten la circulación de flujos, por tanto, se les denomina también en Acuifugo.



Figura 133. Sección Hidrogeológica N°1 mostrando las unidades Hidrogeológicas.





Estas unidades hidrogeológicas están presentes en las tres secciones que se han realizado que se describe a continuación:

Sección Hidrogeológica N.º 1

Esta sección tiene la dirección de flujo de las aguas del rio Aguas calientes con el norte aguas arriba. En esta sección se observa los acuifugos en la zona sur a nueve metros debajo de la superficie del terreno a manera de dos cuerpos, con una zona intermedia de un acuitardo.

Sección Hidrogeológica N.º 2.

Representa la zona central de los baños termales de aguas calientes, esta muestra en la sección que tiene la misma orientación de la sección 1, el cuerpo de Acuifugo al sur.

Sección Hidrogeológica N.º 3

Representa la zona lateral del talud que se halla detrás del reservorio. Esta muestra en la sección el Acuifugo casi en toda su extensión desde la superficie, a excepción de la zona sur, donde se aprecia los acuitardo dentro de estas, aparentemente relacionadas a fallas de orientación este oeste.

7.2.2. Acuitardo.

Esta unidad hidrogeológica está representada por el macizo rocoso moderadamente fracturado, con fracturas de poca longitud y de poca abertura o rellenas parcialmente, lo que los convierte en Acuitardos.

Es probable que algunos depósitos coluvio aluviales (ver mapa geológico estructural) subsuperficiales también actúen como esta unidad de acuitardo en las zonas sub superficiales, sin embargo, esto no es confirmado, dado la dificultad de ver estos depósitos.



Estas unidades están presentes en las tres secciones que se han realizado, los que se describen en base a las figuras extractadas de los planos que se encuentran en anexos.

Sección Hidrogeológica N.º 1

Esta sección tiene la dirección aproximada de norte a sur, cuyo flujo del río es de Norte a sur. Se identifican los Acuitardos en la zona norte debajo de los bloques y bolones que están coloreadas de amarillo, y en la zona central interrumpida por un macizo rocoso (Acuifugo) de roca intacta, y en la zona media mostrándose a esta unidad en forma tabular en un ancho de 10 m aproximadamente.

Sección Hidrogeológica N.º 2.

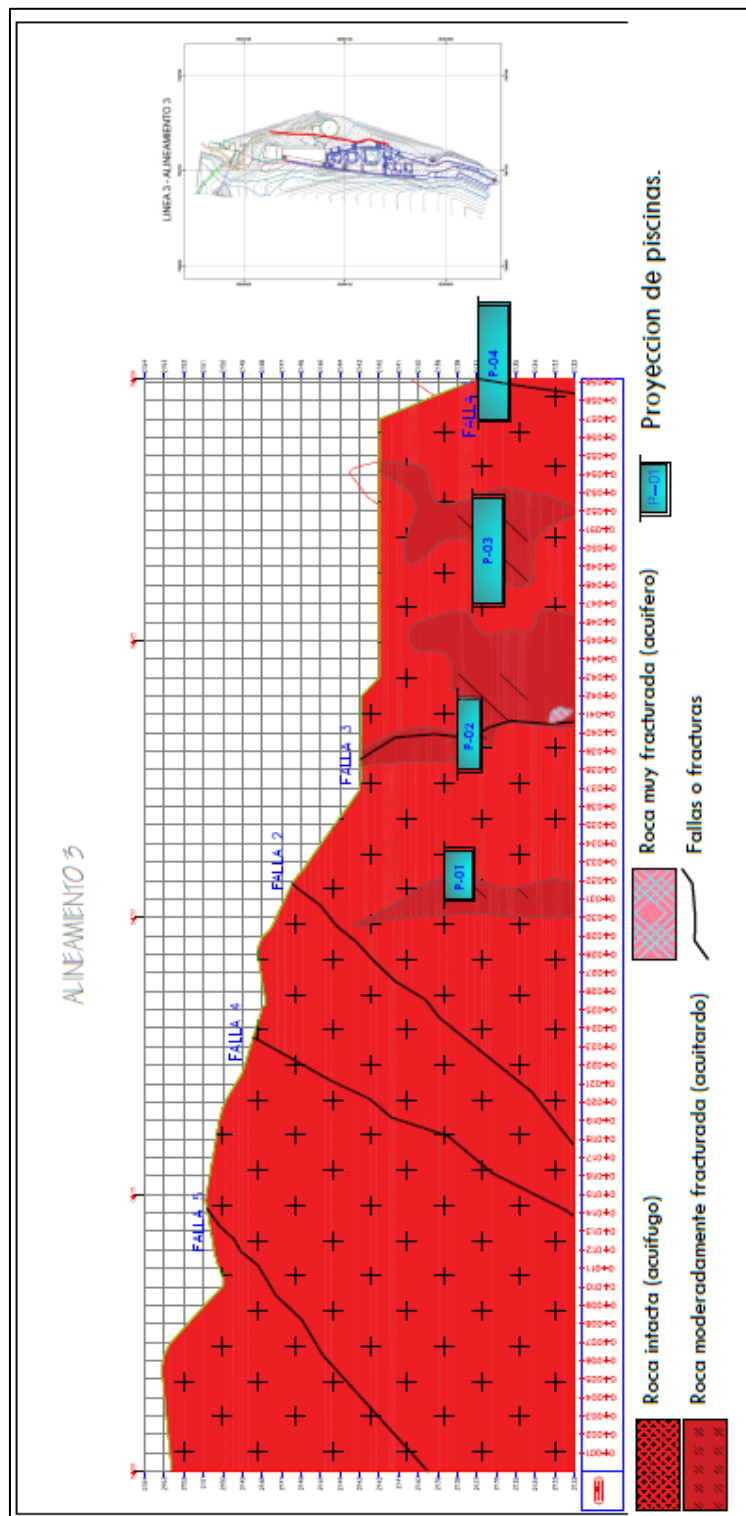
Representa la zona central de los baños termales de aguas calientes, está orientada al igual que la sección 1. El cuerpo de Acuitardo se observa entre los 10m y 40 m, en forma de hongos deformados entre las unidades hidrogeológicas de Acuifugo y los acuíferos.

Sección Hidrogeológica N.º 3

Representa la zona lateral del talud que se halla detrás del reservorio. Esta muestra en la sección el acuitardo en forma semi alargada, en la zona sur esta englobada en el macizo rocoso de roca intacta.



Figura 134. Sección Hidrogeológica N°3 mostrando las unidades hidrogeológicas.





7.2.3. Acuífero.

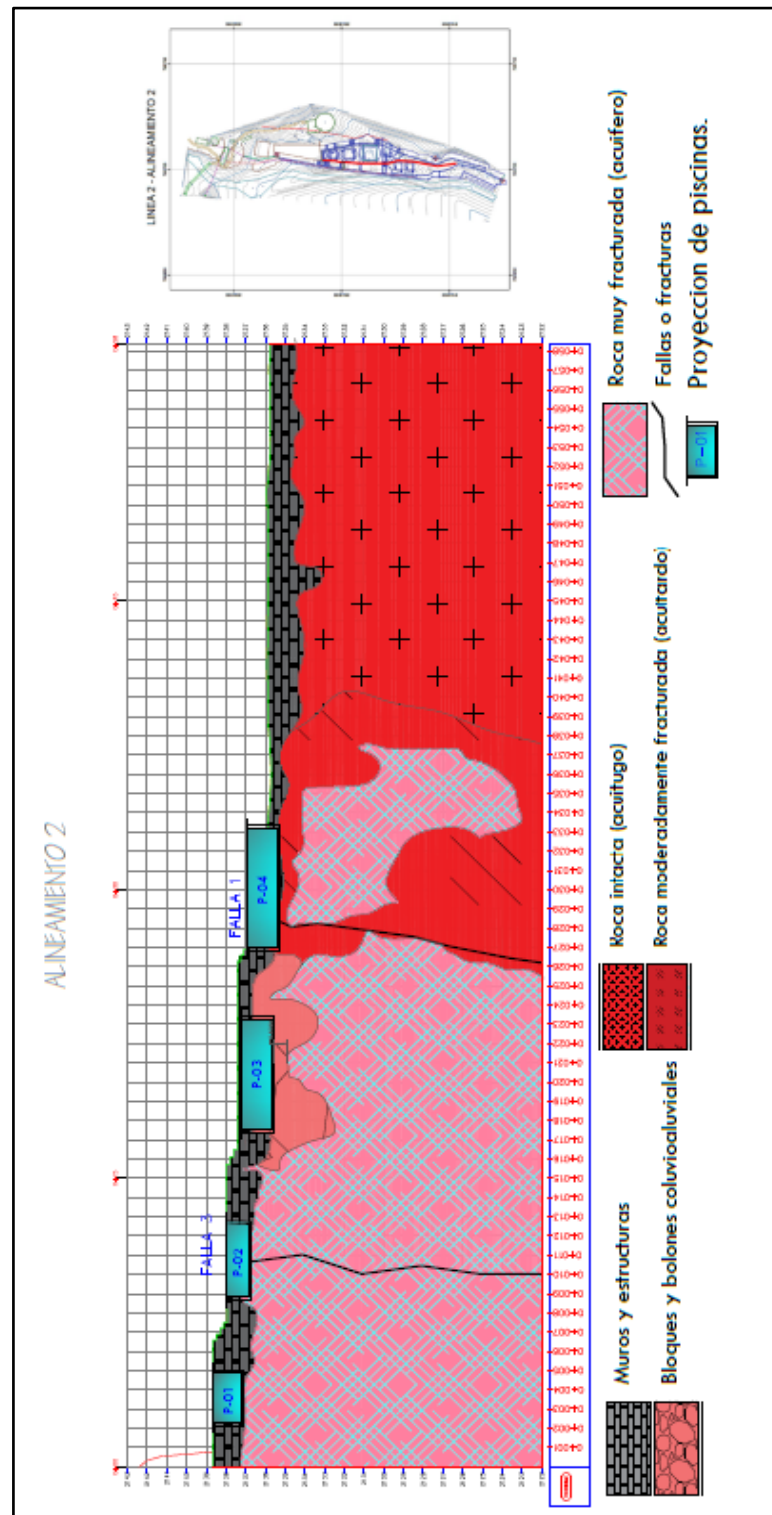
Esta unidad hidrogeológica está representada por las rocas graníticas del batolito de Machupicchu que tienen alto grado de fracturamiento asociado a fracturas y fallas que atraviesan la zona de los baños de aguas calientes, están dispuestas en forma perpendicular al cauce del río. Estas fracturas deben tener aberturas similares a las que existen en superficie y con longitudes que superan los 2 a 5 metros de longitud, con varios sistemas entrecortados, tal como se presentan las fallas de manera escalonada en superficie.

Se han identificado fallas que tienen una orientación perpendicular a la dirección de la quebrada Aguas Calientes, es decir Este oeste, por tanto, se puede afirmar que este sistema de falla es la principal estructura en el que se halla emplazada el acuífero de aguas calientes (ver mapa hidrogeológico)

Esta unidad está presente en la sección 2 de manera evidente, siendo de manera menos evidente y con menos espesor en las secciones laterales.



Figura 135. Sección Hidrogeológica N°2 mostrando las unidades hidrogeológicas.



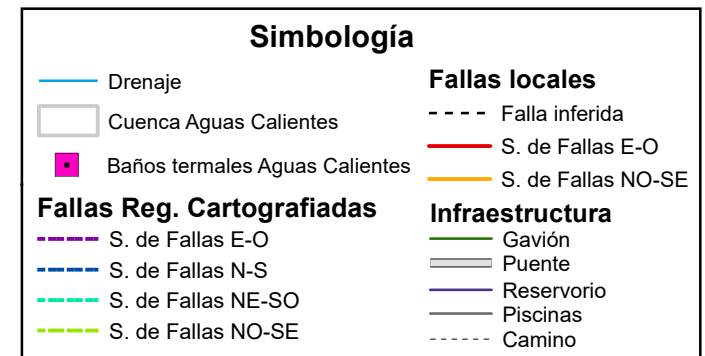
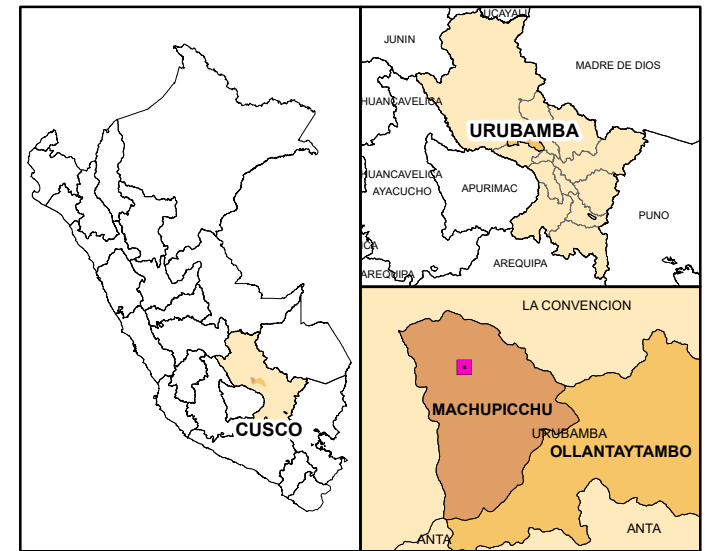
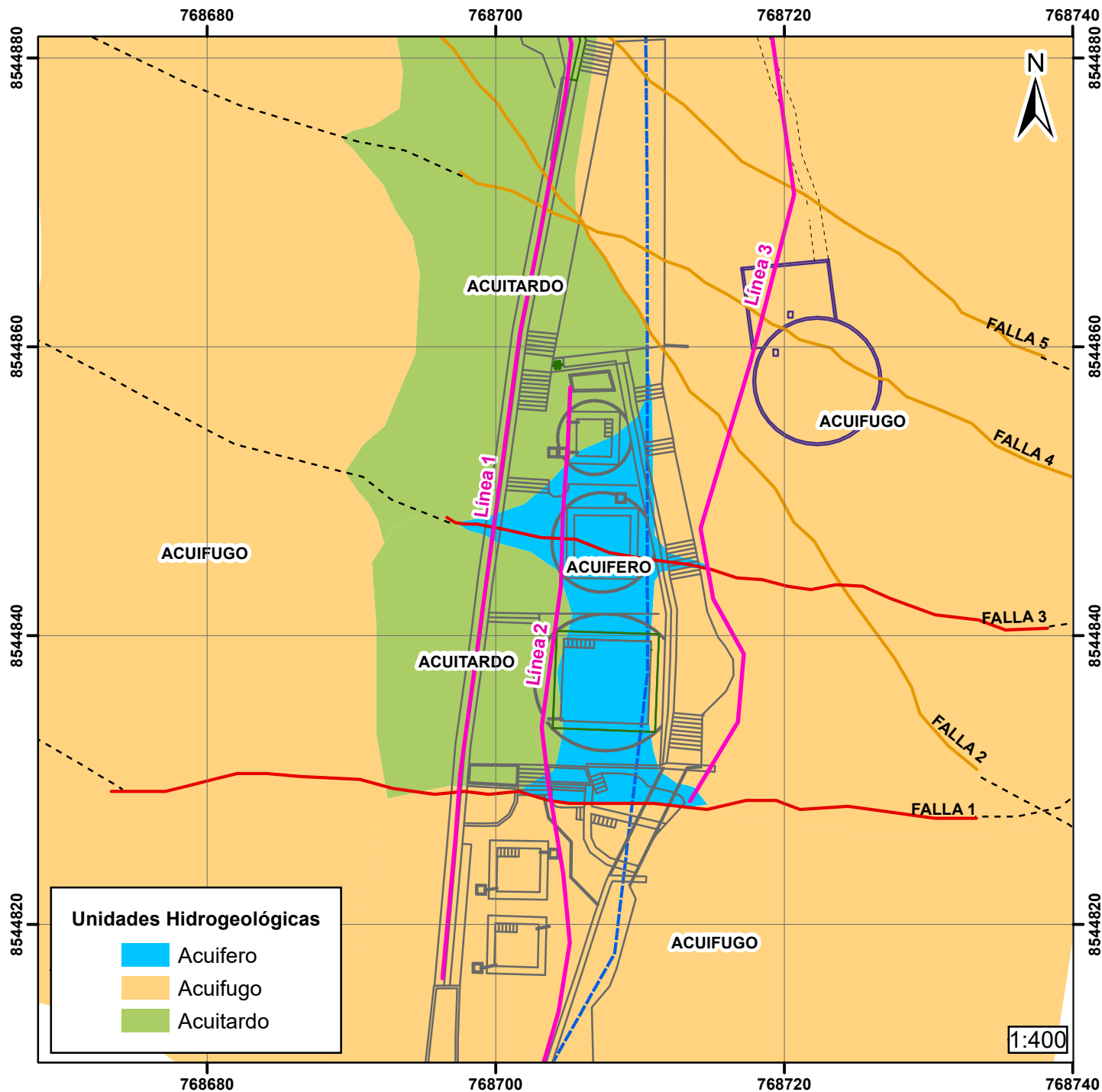


7.3. MOVIMIENTO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Para el movimiento de aguas subterráneas es necesario considerar la carga y descarga de los acuíferos, en este caso los volúmenes de carga son de carácter regional y que circulan profundidades superiores a los dos mil metros debajo de la superficie, siendo así es difícil identificar las zonas de recarga, sin embargo, considerando las zonas más elevadas de la cordillera se ha esquematizado el flujo de las aguas, tal como se aprecia en la siguiente ilustración.

7.3.1. *Mapa de unidades hidrogeológicas de las aguas termales*

Según el mapa elaborado se puede observar el acuífero fisurado en la parte central del balneario entre las fallas 1 y 3 y a lo largo de la falla N-S; a partir de la piscina 4 hacia el sur, en el talud de la margen izquierda y hacia la margen izquierda de la quebrada Aguas calientes se observan acuífugos; al lado oeste, entre los gaviones y el río se tiene un acuitardo en forma alargada con una dirección N-S.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA	
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA	
TESIS: "CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y GEOMECANICA DE LOS BAÑOS TERMALES DE AGUAS CALIENTES DEL DISTRITO DE MACHUPICCHU, PROVINCIA DE URUBAMBA, REGION CUSCO"	
MAPA: MAPA DE UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS DE AGUAS TERMALES	ESCALA: INDICADA
ELABORADOR POR: KATHERINE GUTIERREZ PERALTA - VANESSA I. VALVERDE GOYZUETA	MAPA N° 10
FUENTE DE DATOS: ING. LÓPEZ ZAPANA RONALD LUIS	DATUM: WGS 1984_UTM_ZONA_18S



7.3.2. Esquema Conceptual de movimiento de aguas subterráneas

En base al perfil topográfico y la interpretación de falla regional, se ha esbozado un flujo esquemático conceptual de las aguas y la surgencia en aguas Calientes.

Entre las principales zonas de recargada debido a la altura se encuentra la cordillera de Vilcabamba con presencia de pequeñas lagunas donde en el pasado se ubicaban glaciares, otra zona de recarga importante es el nevado de La Verónica que a través del deshielo del cuerpo glaciar se infiltran en las rocas del batolito de Machupicchu a través de sus fracturas y diaclasas, además la presencia de la falla inversa Ollantaytambo-Vilcabamba-Quimbiri, hace el papel de un conducto de estas aguas percoladas. La presencia de rocas metamórficas en el techo de la falla inversa actúa como una barrera hidrogeológica impidiendo el paso del agua hacia el NE, de esta forma los flujos subterráneos de estas aguas transiten tanto en sentido horizontal como vertical (formando acuíferos profundos). Estas aguas se encuentran a altas temperaturas y profundidades, por tener una condición crítica han disuelto elementos y minerales, de los cuales algunos pueden ser utilizados para el cálculo de temperatura por el método de geotermómetros naturales (como los cationes Na, K, Ca y Mg). Con ayuda de estos, se ha determinado la temperatura y profundidad del foco termal (147.4°C y 4.44 km aproximadamente). Las fallas locales de la quebrada Aguas Calientes interceptan en profundidad a la falla inversa Ollantaytambo-Vilcabamba-Quimbiri, y como consecuencia estas fallas locales juegan un papel importante en la surgencia de las aguas termales, ya que son un conducto de salida de las aguas de acuíferos profundos, siendo contaminados (disminuyendo la temperatura hasta 41°C en su fuente termal) por aguas meteóricas en su camino.

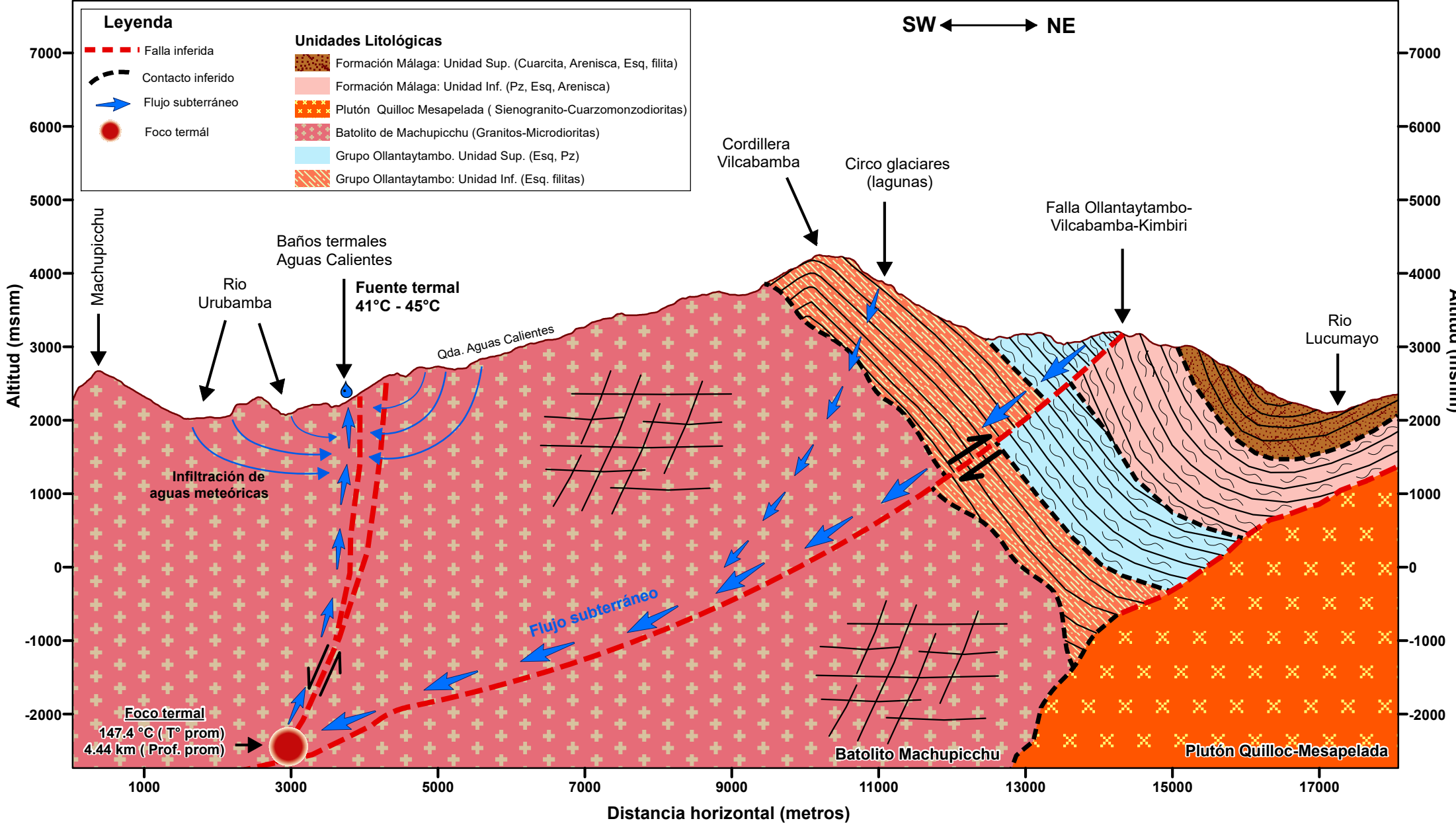
Además, de lo expuesto anteriormente podemos inferir que las aguas termales de Cocalmayo y Ccollpani, (ubicados al Oeste de aguas calientes) tienen el mismo origen que el balneario de aguas calientes, utilizando la misma falla inversa de Ollantaytambo-Vilcabamba-Quimbiri como

A continuación, se muestra la línea de sección donde se hizo el corte del esquema conceptual de movimiento de aguas subterráneas.

[illegible]

BR. VANESSA VALVERDE GOYZUETA - BR. GUTIERREZ PERALTA KATHERINE

ESQUEMA CONCEPTUAL DE MOVIMIENTO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS





CONCLUSIONES:

1. Regionalmente la zona de estudio se ubica en la cordillera oriental, pertenece a la quebrada Aguas Calientes la cual forma parte de la cuenca de Urubamba. Localmente la zona de estudio constituye pendientes muy abruptas, donde se evidenció cinco tipos de pendientes: Fuertemente inclinada, Moderadamente Empinada, Empinada, Muy Empinada y Extremadamente Empinada; además se presentan las siguientes unidades geomorfológicas: Cauce fluvial, Abanico Aluvial, Ladera de montaña, Pie de monte, Quebrada, y talud escarpado, que evidencia el sistema de fallas que controla el balneario de Aguas Calientes.
2. Regionalmente se ha identificado unidades estratigráficas del paleozoico inferior denominado formación Ollantaytambo y Málaga compuesto por rocas metamórficas como Pizarras, esquistos verdes, grises a negros con pirita, cuarcitas y lutitas bandeadas y exudaciones de azufre; en la zona de estudio principalmente aflora los intrusivos del permo-triásico denominado batolito de Machupicchu, compuesto por granito color blanco o gris y Microdiorita, además se identificó depósitos cuaternarios como depósitos coluviales conformado por bloques de granito que cayeron por gravedad y material descompuesto de rocas en grava; depósitos fluviales compuesto por grava, arena y cantos, y también se encuentra bloques de granito erosionado por el agua, y depósitos aluviales constituida por bloques de los intrusivos de dimensiones métricas inmersa en una matriz areno arcillosa lo que evidencia aluviones antiguos.
3. El batolito de Machupicchu se formó al interior de la corteza hace 246 millones de años, en un contexto rift continental, posteriormente durante la evolución andina las fallas NO-SE actuaron como fallas inversas, produciendo el mayor levantamiento de los andes por tanto tras una erosión de la parte superior de la corteza ha permitido aflorar los intrusivos,



seguido a ello se ha formado el río Urubamba controlado por la interacción de las fallas NO-SE denominada falla Central Hidroeléctrica Machupicchu y NE-SO llamada falla Urubamba, además debido al enfriamiento del magma se han formado sistemas de diaclasas. Localmente se ha identificado el sistema de fallas N-S este sistema está vinculada a la formación de la quebrada Aguas Calientes, sistema de fallas O-E perpendicular a la quebrada que favorece el flujo de las aguas subterráneas; y el sistema de fallas NO-SE tipo normales. Todo este sistema de fallas controla el comportamiento del batolito como acuífero además permiten que transiten las aguas y emerjan en superficie en el balneario de aguas Calientes.

4. El talud en la EMT 1 presenta un valor de SRM de 35.5 considerado Inestable el cual necesita un tratamiento de corrección, el talud en la EMT 2 presenta un valor de SRM de 35.5 considerado Inestable el cual necesita un tratamiento de corrección, el talud en la EMT 3 presenta un valor de SRM de 53.4 considerado Parcialmente Estable el cual necesita un tratamiento sistemático, el talud en la EMT 4 presenta un valor de SRM de 39 considerado Inestable el cual necesita un tratamiento de corrección, el talud en la EMT 5 presenta un valor de SRM de 53.4 considerado Parcialmente Estable el cual necesita un tratamiento Sistemático y el talud en la EMT 6 presenta un valor de SRM de 26 considerado Inestable el cual necesita un tratamiento de corrección. El coeficiente de permeabilidad secundaria promedio es $2.35E-04$ cm/s considerado como roca con permeabilidad secundaria media.
5. El caudal promedio obtenido de acuerdo al llenado de piscinas es 21.209 L/min. Para el análisis hidroquímico se extrajo 08 muestras de agua, 02 de agua de captación para consumo (M-1 y M-2) y 06 de aguas termales (M-3, M-4, M-5, M-6, M-7 y M-8). La temperatura de las muestras M-1 y M-2 es 14°C consideradas como frías y el de las



muestras M-3 a M-8 varía entre 33 y 45 °C clasificadas como Mesotermiales, el pH se encuentra en el intervalo 6.95 a 8.15 correspondiente a un medio básico, la conductividad eléctrica de las muestras M-1 y M-2 es 100 y 52 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivamente clasificándolos como agua potable, las muestras M-3 a M-8 va de 3120 a 5860 $\mu\text{S}/\text{cm}$ son aguas subterráneas pero debido a la profundidad a la que circulan y el tiempo de estación disuelven componentes de las rocas los cuales aumenta su conductividad, el contenido de carbonato de calcio de las muestras M-1 y M-2 son 72 ppm (agua dura) y 32.92 ppm (agua blanda); M-3 a M-8 va de 1435.2 a 2566.5 ppm consideradas como aguas muy duras. Según el diagrama de Stiff y Piper muestra que las aguas termales (M-3 a M-8) son de facie clorurada sódico-cálcica y de flujo regional según el diagrama de Scatter; en cambio las muestras M-1 y M-2 son bicarbonatadas cálcicas y de flujo intermedio. Además, los cationes han permitido determinar la temperatura de foco según los geotermómetros Na-K y Na-K-Ca son 173.9 y 120.8°C respectivamente; a su vez estos datos nos permitieron determinar la profundidad del foco según el gradiente geotérmico resultado en un intervalo de 3.56 km y 5.32 km.

6. Regionalmente se tienen dos zonas de recarga importante, la cordillera de Vilcabamba y el nevado la verónica, donde se ubica la falla inversa Ollantaytambo-Vilcabamba-Quimbiri, la cual actúa como conducto de las aguas meteóricas infiltrando estas hasta profundidades de 4.44 km y por gradiente geotérmico estas aguas llegan a temperatura de foco 147.4°C; las fallas locales ubicadas en aguas calientes intersecan en profundidad a la falla inversa permitiendo que estas aguas profundas surjan a superficie con temperatura promedio de fuente 41°C donde son aprovechadas como aguas balnearológicas recreativas. Con la interpretación de las 03 secciones Geoeléctricas han permitido establecer que el principal



acuífero fisurado se encuentra en la sección central con un ancho de 15 metros seguido por un acuitardo de 10 m, y nuevamente se evidencia el acuífero en un ancho de 2 m, y finalmente debajo de las piscinas N° 5 y 6 otro acuífero que no prosigue en profundidad. Las estructuras que están directamente vinculadas a la presencia de este acuífero son cinco fallas identificadas en el área de los baños termales, de las cuales las benéficas son las fallas 1 2 y 4 mientras que la falla 5 delimita el acuífero en general.



RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar análisis químicos de elementos traza e isotopos para determinar la zona de recarga de manera específica y determinar la edad de estas aguas subterráneas.
2. Se debe realizar análisis químicos de para determinar el contenido de elementos nocivos para la salud como por ejemplo el contenido de arsénico en los baños termales de aguas calientes.
3. Se recomienda que los acuíferos identificados sean explotados apropiadamente aprovechando su caudal y temperatura a la cual emergen a superficie.
4. Se recomienda que la fuente 1 se deje fluir de manera natural para ello, debe ser demolido la pared que se colocó ya que al no dejar fluir de manera natural las aguas termales, esta ejerce presión lo que provoca a que el flujo busque otras vías para emerger al exterior lo cual se evidencia en los manantes exteriores 1 y 2, y en la base de las piscinas 2, 3 y 4.
5. Se recomienda no utilizar perforaciones diamantinas para evitar los riesgos de estabilidad de taludes que existen en la zona y por estar a metros de tres metros de profundidad el acuífero.
6. Se recomienda tomar datos de temperatura y caudal periódicamente para determinar si existe una variación en estos parámetros.
7. Se recomienda tomar en cuenta las medidas de estabilización de talud y erosión del cauce.

En la zona del puente donde se encuentra las discontinuidades a favor del talud se recomienda la estabilización del talud mediante bulones de adherencia, aguas arriba del balneario zonas donde se encuentra caída de rocas se recomienda realizar desquinche. A lo largo del cauce como medida para evitar la erosión se recomienda realizar muros secos (peine) a lo largo del rio utilizando bolones de 2 m de diámetro a más; en la zona de



cabecera de cuenca se recomienda reducir el tamaño de los bloques mediante voladura controlada.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agua, M. L. (2009). *Las aguas minero - medicinales del Balneario de Almeida*. Almeida.
- ANA. (2010). *Inventario de fuentes de agua superficiales Cuenca del río Urubamba*. Cusco-Perú: Autoridad Nacional del Agua.
- ANA. (2012). *Delimitación y codificación de unidades hidrográficas del Perú*. Lima: Ministerio de Agricultura.
- Apaza Rojas, R. M., & Huamán Quispe, O. (2020). *Estudio Hidrogeológico con fines de determinar el potencial Hídrico en la Cuenca de Cachimayo, Dist. Santiago, Prov. Cusco, REg. Cusco - 2019*. Cusco: UNSAAC.
- Auge, M. (2008). *TIERRA: Red Temática de Ciencias de la Tierra*. Obtenido de <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/miguel/ProspeccGoelec.pdf>
- Aymerich Urzaiz, J. (2013). *Estudio y modelización del sistema geotérmico de Sierra Almagrera (Almería)*. España.
- Bécher Quinodóz, F., Blarasin, M., & Cabrera, A. (2011). *Caracterización Hidrogeoquímica Conceptual y Modelización en la Llanura Medanosa de Laguna Oscura - Córdoba - Argentina*. Argentina.
- Carlotto Caillaux, V., Cárdenas Roque, J., & Carlier, G. (2011). *Geología del Cuadrángulo del Cusco*. Lima: INGEMMET.
- Carlotto, Cárdenas, & Fidel. (2009). La geología, Evolución geomorfológica y geodinámica externa de la Ciudad Inca de Machupicchu, Cusco-Perú. *Asociación Geológica Argentina*, 725-747p.



- Carlotto, Cárdenas, Romero, Valdivia, & Tintaya. (1999). *Geología de los cuadrángulos de Quillabamba y Machupicchu, hojas 26-q y 27-q*. INGEMMET. Lima, Perú: Primera edición.
- Carlotto, V., Cárdenas, J., & Fidel, L. (2009). *Repositorio INGEMMET*. Obtenido de INGEMMET: <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/679>
- Collazo Caraballo, M. P., & Montaña Javier, J. (2012). *Manual de Agua Subterranea*. Montevideo, Uruguay: Denad Internacional SA.
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983). *Hidrología subterránea*. Barcelona: Omega SA.
- Domenico, P., & Schwartz, F. (1998). *Physical and Chemical Hydrogeology*. John Wiley & Sons.
- Egeler, C., & De Booy, T. (1961). Preliminary note on the geology of the Cordillera Vilcabamba with emphasis on the essentially pre-Andean . *Mijnb*, 120-136.
- Facundo Castillo, J. R., & González Hernández, P. (2005). *Hidrogeoquímica*. La Habana, Cuba: CENAMENT.
- FCIHS, F. C. (s.f.). *Hidrogeología*. Barcelona: FCIHS.
- Gerard, B., Robert, X., Audin, L., Gautheron, C., Berbet, M., Benavente, C., & Delgado, F. (2018). *Control de la exhumación de la Deflexión de Abancay (Andes del Perú) por procesos climáticos y/o tectónicos*. Lima: Sociedad Geológica del Perú.
- Gonzales de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuno, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid.
- Gutierrez Supa, F. J. (2023). *Estudio Hidrogeológico de los baños termales de La Raya, distrito de Marangani, provincia de Canchis, Cusco*. Cusco: UNSAAC.



- Guzmán Álvarez, K. E., & Huallpa Yucra, M. A. (2023). *Estudio Hidrogeológico de Aguas Subterráneas en el Balneario Pojpoquella Distrito de Ayaviri - Puno*. Cusco: UNSAAC.
- Hernández P., O., & Alexander E., G. C. (2011). Caracterización geofísica integrada de las aguas termales de la hostería Balneario El Batán, municipio de Cuitiva, Boyacá, Colombia. *Geología Colombiana*, 36(1), 57-72.
- Hernández Sampieri, R. (2014). *Metodología de la Investigación*. Mexico D.F.: McGrawHill Education.
- Hernández, F. A. (2012). *Métodos Geoeléctricos Aplicados a la Exploración de aguas Subterráneas y Termales*. Chile.
- Huamaní & Valenzuela. (2003). *Aguas termales y minerales en el Oriente Central del Perú*. INGEMMET. Lima, Perú: Boletín N°25, Serie D: Estudios Regionales.
- Ibañez, A., Moreno Ramón, S., Gisbert Blanquer, H., & M, J. (2011). *Morfología de las cuencas hidrográficas*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- INDECI PNUD. (2021). *Mapa de peligros y medidas de mitigación ante desastres de la Ciudad de Machupicchu*. INDECI. Machupicchu: Programa Ciudades Sostenibles.
- Juarez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (2005). *Mecánica de Suelo*. México: Limusa.
- López Geta, J. A., Fornés Azcoiti, J. M., Ramos Gonzalez, G., & Villarroya Gil, F. (2009). *Las aguas subterráneas*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- López Zapana, R. (2018). *Coeficiente de permeabilidad indirecta*. Cusco.



- Martínez Alfaro, P., Martínez Santos , P., & Castaño Castaño , S. (2006). *Fundamentos de Hidrogeología*. Madrid, Barcelona, México: Grupo Mundi-Prensa.
- Menegat, R. (2019). How Incas used geological faults to buil their settlements. *GSA Annual Meeting in Phoenix*, 2.
- Mijares, F. A. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Mexico: Grupo Noriega.
- Ministerio de agricultura. (2009). *Reglamento de clasificación de tierras por su capacidad de uso mayor*. Lima: DS N°0172009-AG.
- Municipalidad Distrital de Machupicchu. (2017). *Estudio Geológico para fines de Cimentación*. Machupicchu: Mejoramiento del Sistema de Agua y Desagüe del CC.PP Machupicchu.
- Núñez, T. (15 de noviembre de 2022). *Oxígeno*. Obtenido de https://www.revistaoxigeno.es/tecnica/baja-media-alta-montana-elige-tu-terreno_267897_102.html
- Ontiveros, S. (2003). Tomografía eléctrica.
- Orellana , E., & Mooney , H. (1972). *Two and three-layer master curves for wenner arrangement*. Madrid: Interciencia.
- OSINERGMIN. (2017). *Guía de criterios geomecánicos para diseño, contrucción, supervisión y cierre de labores subterráneas*. Lima: INVERSIONES IAKOB S.A.C.
- Panichi, C., & Badiola, R. (1948). *Utilización del Geotermómetro Na-K-Ca en la prospección preliminar de áreas geotérmicas* . Italia: Boletín Geológico Minero.



- Peña, Sima & Baratoux. (2007). Hidrogeología de las fuentes termales de Cajamarca y Churin para el desarrollo de las aguas termales y minerales. *Desarrollo de las aguas termales y minerales en el Perú*, 7.
- Pinagua. (2004). *Infraestructura hidrotermal*. Madrid: Instituto Tecnológico GeoMinero de España.
- Ramos Cabrera, W., & Minaya Encarnación, I. (2021). *Geología del cuadrángulo de Quillabamba*. Lima: INGEMMET.
- SAD. (SD). *SD*. SADS: SADS.
- Sanchez, J. (2008). *Evolución Geoquímica de las aguas subterráneas*. Universidad de Salamanca. Salamanca: .
- Silva, P. A. (s.f.). *Segundo encuentro de las aguas*. uruguay.
- Tapia Huacoto, E. (2016). *Caracterización Geoenergética de fuentes Termales: Pasanacollo, Acora, Ollachea, Cuyo Cuyo, Loripongo, y Puente Bello*. Puno: Universidad Nacional del Altiplano Puno.
- Vargas, V. (2010). Las fuentes termales en el Perú, estado y uso actual. *Sociedad Geológica del Perú*, 1175-1178.
- Werner, J. (1996). *Introducción a la hidrogeología*. Nuevo León: Universidad Autónoma de Nuevo León.



ANEXOS

ANEXO I: MATRIZ DE CONSISTENCIA

TÍTULO: "CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y GEOMECÁNICA DE LOS BAÑOS TERMALES DE AGUAS
CALIENTES DEL DISTRITO DE MACHUPICCHU, PROVINCIA DE URUBAMBA, REGION CUSCO"

Br(s):

**VALVERDE GOYZUETA VANESSA ISABEL
GUTIERREZ PERALTA KATHERINE**

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPOTESIS	METODOLOGÍA
¿Cuáles son las características hidrogeológicas y geomecánicas de los Baños Termales de Machupicchu Pueblo?	Determinar las características hidrogeológicas y geomecánicas de los Baños Termales de Aguas Calientes	Las características hidrogeología y geomecánica presentes en el área de estudio, constituyen acuíferos que dan las condiciones para la existencia de este balneario de aguas calientes.	Método de Investigación: Método Descriptivo Método Correlacional Diseño de Investigación: No experimental (Transversal)
IMPORTANCIA Y JUSTIFICACIÓN La presente investigación se justifica permitirá conocer las características hidrogeológicas y geomecánicas del balneario de Aguas calientes , ya que en la actualidad se desconoce las características del acuífero que alimenta al balneario. Así mismo pretende ampliar los conocimientos	OBJETIVOS ESPECÍFICOS: 1). Identificar las unidades geomorfológicas en la zona de estudio 2). Identificar las unidades geológicas en la zona de estudio 3). Identificar las estructuras (fallas y fracturas) en el área de estudio 4). Caracterizar el macizo rocoso con la clasificación geo-mecánica del RMR de Bieniawski y determinar la permeabilidad indirecta 5). Determinar los parámetros fisicoquímicos y su interpretación hidroquímica 6). Caracterizar las unidades hidrogeológicas mediante la aplicación del método de resistividad eléctrica	HIPOTESIS ESPECÍFICAS: 1). Las unidades geomorfológicas regionales como las montañas altas de la cordillera de Vilcabamba y los glaciares preexistentes favorecen en la infiltración de las aguas y por gradiente hidráulico estas se transportan hacia la quebrada Aguas Calientes. 2). Las unidades geológicas en la zona de estudio condicionan la composición química de las aguas termales. 3). Las estructuras (fallas y fracturas) regionales como la falla inversa Ollantaytambo-Vilcabamba-Quimbiri favorecen en la infiltración de aguas meteóricas y además las fallas hacen posible que las aguas termales emerjan a superficie. 4). El macizo rocoso en la zona de estudio presenta una clasificación buena según la clasificación geo-mecánica del RMR de Bieniawski y la permeabilidad indirecta es media según el grado de fracturamiento de la roca. 5). Los parámetros fisicoquímicos y la hidroquímica de las aguas termales dependen de la composición de las rocas mediante las cuales estas transitan, como el batolito de Machupicchu y las rocas metamórficas 6). El batolito de Machupicchu y su fracturamiento comprenden las unidades hidrogeológicas en la zona de estudio y se clasifica como un acuífero fisurado.	Enfoque: Mixto: Cualitativo y Cuantitativo



ANEXO II: ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DE AGUA.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE CIENCIAS

Av. de la Cultura 733 - Pabellón "C" Of. 106 1er. piso - Telefax: 224831 - Apartado Postal 921 - Cusco Perú



UNIDAD DE PRESTACIÓN DE SERVICIOS DE ANÁLISIS QUÍMICO
DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE QUÍMICA

INFORME DE ANÁLISIS

Nº0478-24-LAQ

SOLICITANTE : KATHERINE GUTIERREZ PERALTA
VANESSA VELVERDE GOYZUETA

MUESTRA : AGUAS

FUENTE : AGUA TERMAL, AGUAS CALIENTES-MACHUPICCHU
DISTRITO : MACHUPICCHU
PROVINCIA : URUBAMBA
REGION : CUSCO
FECHA : C/17/10/2024

RESULTADO ANALISIS FISICOQUIMICO:

	M-1	M-2
Dureza ppm	72.00	36.92
Calcio ppm	21.28	10.64
Magnesio ppm	4.14	1.84
Sodio ppm	4.00	3.00
Potasio ppm	0.25	0.19
Cloruros ppm	3.90	1.70
Sulfatos ppm	10.40	8.80
Bicarbonato ppm	39.10	24.60
Sales Solubles Totales ppm	172.90	88.70

ANALISIS DEL AGUA, JEAN RODIER, 9 EDICION

Cusco, 24 de Octubre 2024

Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco
Unidad de Prestación de Servicios de Análisis Químico
LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO
Melguedra Herrera Arístides
RESPONSABLE DEL LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE CIENCIAS

Av. de la Cultura 733 - Pabellón "C" Of. 106 1er. piso - Telefax: 224831 - Apartado Postal 921 - Cusco Perú



UNIDAD DE PRESTACIÓN DE SERVICIOS DE ANÁLISIS QUÍMICO
DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE QUÍMICA

INFORME DE ANÁLISIS

Nº0478-24-LAQ

SOLICITANTE : KATHERINE GUTIERREZ PERALTA
VANESSA VALVERDE GOYZUETA

MUESTRA : AGUAS

FUENTE : AGUA TERMAL, AGUAS CALIENTES-MACHUPICCHU
DISTRITO : MACHUPICCHU
PROVINCIA : URUBAMBA
REGION : CUSCO
FECHA : C/17/10/2024

	M-3	M-4
Dureza ppm	2552.00	1435.00
Calcio ppm	927.20	516.80
Magnesio ppm	40.48	25.76
Sodio ppm	1666.40	622.00
Potasio ppm	141.60	66.00
Cloruros ppm	2690.00	1050.00
Sulfatos ppm	506.80	310.90
Bicarbonato ppm	286.50	204.00
Sales Solubles Totales ppm	5940.00	3270.00

ANÁLISIS DEL AGUA, JEAN RODIER, 9 EDICION

Cusco, 24 de Octubre 2024

Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco
Unidad de Prestación de Servicios de Análisis Químico
Melipalodica Herrera Arístida
RESPONSABLE DEL LABORATORIO
DE ANÁLISIS QUÍMICO



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE CIENCIAS

Av. de la Cultura 733 - Pabellón "C" Of. 106 1er. piso - Telefax: 224831 - Apartado Postal 921 - Cusco Perú



UNIDAD DE PRESTACIÓN DE SERVICIOS DE ANÁLISIS QUÍMICO
DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE QUÍMICA

INFORME DE ANÁLISIS

Nº0478-24-LAQ

SOLICITANTE : KATHERINE GUTIERREZ PERALTA
VANESSA VELVERDE GOYZUETA

MUESTRA : AGUAS

FUENTE : AGUA TERMAL, AGUAS CALIENTES-MACHUPICCHU
DISTRITO : MACHUPICCHU
PROVINCIA : URUBAMBA
REGION : CUSCO
FECHA : C/17/10/2024

RESULTADO ANALISIS FISICOQUIMICO:

	M-5	M-6
Dureza ppm	2566.5	2656.50
Calcio ppm	919.2	916.60
Magnesio ppm	48.76	71.76
Sodio ppm	1491.00	1476.00
Potasio ppm	114.00	128.00
Cloruros ppm	2490.00	2476.00
Sulfatos ppm	491.80	436.40
Bicarbonato ppm	241.20	256.40
Sales Solubles Totales ppm	5644.00	5840.00

ANALISIS DEL AGUA, JEAN RODIER, 9 EDICION

Cusco, 24 de Octubre 2024

Seal of the University of San Antonio Abad del Cusco, Facultad de Ciencias, Departamento Académico de Química
Melguedes Herrera Arceles
RESPONSABLE DEL LABORATORIO DE ANALISIS QUIMICO



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE CIENCIAS

Av. de la Cultura 733 - Pabellón "C" Of. 106 1er. piso - Telefax: 224831 - Apartado Postal 921 - Cusco Perú



UNIDAD DE PRESTACIÓN DE SERVICIOS DE ANÁLISIS QUÍMICO
DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE QUÍMICA

INFORME DE ANÁLISIS

Nº0478-24-LAQ

SOLICITANTE : KATHERINE GUTIERREZ PERALTA
VANESSA VELVERDE GOYZUETA

MUESTRA : AGUAS

FUENTE : AGUA TERMAL, AGUAS CALIENTES-MACHUPICCHU
DISTRITO : MACHUPICCHU
PROVINCIA : URUBAMBA
REGION : CUSCO
FECHA : C/17/10/2024

RESULTADO ANALISIS FISICOQUIMICO:

	M-7	M-8
Dureza ppm	2653.00	2695.00
Calcio ppm	922.64	919.60
Magnesio ppm	67.16	79.12
Sodio ppm	1486.00	1624.00
Potasio ppm	130.00	14.20
Cloruros ppm	2460.00	2716.00
Sulfatos ppm	472.00	466.50
Bicarbonato ppm	248.20	256.20
Sales Solubles Totales ppm	5856.00	5977.00

ANALISIS DEL AGUA, JEAN RODIER, 9 EDICION

Cusco, 24 de Octubre 2024

Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco
Unidad de Prestación de Servicios de Análisis
LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO
Melguedes Herrera Arcofca
RESPONSABLE DEL LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO