

**CONTAMINACIÓN GEOGÉNICA EN
LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA
CUENCA DEL RÍO RÍMAC E
INTERCUENCA 1375539**

**GEOGENIC CONTAMINATION IN THE
GROUNDWATER OF THE RÍMAC'S
WATERSHED AND INTERBASIN
1375539**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA
Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

Presentado por:

D^a MAURA ALEJANDRA CHARCA HUARICALLO

Dirigido por:

Dr. FRANCISCO JAVIER LILLO RAMOS

Alcalá de Henares, a 03 de junio del 2019

AGRADECIMIENTOS

El haber tenido la oportunidad de desarrollar este máster ha sido gracias a muchas personas, que me impulsaron a seguir por el sendero del conocimiento del agua, bien que nos regala la naturaleza.

A la Fundación Carolina, por haberme brindado la oportunidad de desarrollar el máster y continuar con mi formación profesional y personal, dándome la alegría más grande de mi vida y motivación pasar seguir soñando.

Al Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, el cual me facilitó la información para el desarrollo de esta investigación, y por darme la oportunidad de conocer el Perú y descubrir la pasión que tengo por el agua. Al equipo del Programa de Hidrogeología que colaboró con la adquisición de la información en campo.

Agradezco al MSc. Ing. Fluquer Peña que sembró en mi la semilla de la curiosidad por aprender y conocer más sobre la ciencia del agua subterránea.

A mi tutor Dr. Francisco Javier Lillo Ramos por haberme brindado su apoyo y tutoría para el mejor desarrollo de esta investigación.

A los profesores del máster que siempre respondieron mis consultas; a mis compañeras *Las No Tan Valientes*, por sus bromas, risas, agobios e iras.

Agradezco a mis padres Judith y Oscar, por su amor incondicional, esfuerzo, apoyo y preocupación en mi bienestar. A mis hermanos Lalo y Fabri, porque me motivan a darles un buen ejemplo y decirles que si lo quieres lo puedes lograr, sólo hay que aferrarse. A mi abuelita Sara por enseñarme su gran fortaleza, a mis tías Yolita, Yrma y Lily que siempre están ahí pendientes de mí.

A mi compañero de vida y amigo Josemanuel, por ser mi apoyo, mi ferviente oyente y cómplice incondicional.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	4
TABLA DE ABREVIATURAS	7
RESUMEN.....	8
1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. JUSTIFICACIÓN.....	9
3. OBJETIVOS.....	10
4. CARÁCTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO	11
4.1. Localización y accesibilidad	11
4.2. Hidrografía	13
4.3. Climatología.....	15
4.4. Geología	18
4.4.1. Mesozoico.....	19
4.4.1.1. Jurásico	19
4.4.1.2. Cretácico.....	19
4.4.2. Cenozoico.....	22
4.4.2.1. Paleógeno.....	22
4.4.2.2. Neógeno	23
4.4.2.3. Cuaternario	23
4.4.3. Rocas ígneas.....	23
4.4.4. Rocas volcánicas	23
4.5. Rasgos estructurales	24
4.6. Hidrogeología	25
5. METODOLOGÍA	30
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	31
6.1. Características fisicoquímicas.....	33
6.1.1. pH.....	33
6.1.2. Temperatura	33
6.1.3. Conductividad Eléctrica.....	35
6.2. Facies hidroquímicas	37
6.2.1. Diagramas de Piper	37
6.3. Elementos traza	44
6.4. Evolución de las aguas subterráneas.....	48
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	49
7.1. Conclusiones	49
7.2. Recomendaciones	50
BIBLIOGRAFÍA.....	51
ANEXO 1	53
Cuadro resumen de las fuentes de agua subterránea muestreadas en la zona de estudio	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio.....	12
Figura 2. Mapa hidrográfico de la zona de estudio.....	14
Figura 3. Mapa climático de la zona de estudio.....	17
Figura 4. Mapa geológico de la cuenca del río Rímac e Intercuenca 1375539.....	20
Figura 4. (Continuación) Mapa geológico de la cuenca del río Rímac e Intercuenca 1375539.....	21
Figura 5. Mapa hidrogeológico de la cuenca del río Rímac e Intercuenca 1375539.....	28
Figura 5. (Continuación) Mapa hidrogeológico de la cuenca del río Rímac e Intercuenca 1375539.....	29
Figura 6. Localización de las fuentes de agua subterránea muestreadas en la cuenca del río Rímac e Intercuenca 1375539.....	32
Figura 7. Distribución del parámetro de pH en la zona de estudio.....	34
Figura 8. Distribución de la CE en la zona de estudio.....	36
Figura 9. Distribución espacial de los tipos de agua que se presentaron en el área de estudio.....	38
Figura 10. Diagrama de Piper y Scatter del tipo de agua bicarbonatada cálcica.....	39
Figura 11. Concentración de cloruro versus bicarbonatos en las muestras de agua subterránea.....	40
Figura 12. Diagrama de Piper y Scatter para aguas del tipo sulfatada cálcica.....	42
Figura 13. Diagrama de Piper y Scatter para aguas del tipo sulfatada cálcica magnésica.....	43
Figura 14. Diagrama de Gibbs donde se identifican procesos de Interacción agua roca para el área de estudio, basado en el artículo de Sandoval I. et al, 2016.....	44
Figura 15. pH versus concentración de arsénico (mg/L), a medida que aumenta el pH las concentraciones de Arsénico se han liberado en las aguas subterráneas, producto del desprendimiento de estos a partir de los sedimentos presentes en la zona de estudio....	45
Figura 16. Distribución de la concentración de arsénico (mg/L) en la zona de estudio....	47
Figura 17. Esquema conceptual hidrogeoquímico idealizado del área de estudio.....	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Población del área de estudio.....	11
Tabla 2. Estadística hidrológica del río Rímac.....	15
Tabla 3. Parámetros fisicoquímicos determinados en los puntos de agua subterránea. ...	30
Tabla 4. Método de análisis usados para las muestras de agua subterránea.....	31

TABLA DE ABREVIATURAS

INGEMMET Instituto Geológico Minero y Metalúrgico

OMS Organización Mundial de la Salud

SENAMHI Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología

ANA Autoridad Nacional del Agua

OSINERGMIN Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería

ECA Estándar de Calidad Ambiental

EPA Environmental Protection Agency

CONTAMINACIÓN GEOGÉNICA EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA CUENCA DEL RÍO RÍMAC E INTERCUENCA 1375539

RESUMEN

Para el desarrollo de este trabajo se realizaron salidas de campo con la finalidad de obtener información in situ de las fuentes de agua subterránea que se manifiestan de manera natural durante todo el año en la cuenca de estudio. La ejecución de los trabajos de campo se realizó durante los años 2012 a 2013, a cargo del Programa de Hidrogeología del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.

Del inventario de fuentes de agua subterránea dentro de la cuenca, el cual consistió en la recolección de datos del lugar, la medida de parámetros fisicoquímicos: pH, temperatura y CE; así como la toma de muestras para análisis de aniones y elementos traza. Se procedió con el análisis de la información, considerando el método de electroneutralidad para los resultados químicos de las fuentes de agua subterránea muestreadas.

A partir de ello se obtuvieron gráficas de Piper que aportaron con la caracterización hidroquímica de los manantiales, y en conjunción con la geología de la zona se determinó que existe una relación entre la hidroquímica y la litología presente en la cuenca. Así también se analizó la presencia de elementos traza, para determinar si existe algún valor anormal en las concentraciones de estos, debo mencionar que la investigación se desarrolló en una serie de tiempo estacional.

Del análisis se obtuvo que elementos traza como el Arsénico están presentes en las fuentes de agua subterránea en concentraciones superiores a 0.01 mg/L límite para agua de bebida normado por la Organización Mundial de la Salud. Debemos de considerar también que la descarga de flujo de estas aguas subterráneas va directo a cuerpos receptores, lo que podría ocasionar efectos adversos en las personas y los componentes del ecosistema. A partir de ello se recomienda proseguir con un plan de monitoreo en una serie de tiempo permanente para tener la certeza de su presencia en el tiempo, para luego establecer un tratamiento correctivo.

1. INTRODUCCIÓN

El Perú cuenta con grandes ríos que forman importantes cuencas como consecuencia de las masivas precipitaciones pluviales que se dan en los andes peruanos; las mismas que generan la presencia de agua subterránea al interactuar con determinada litología que exponen las cuencas hidrográficas.

La cuenca del río Rímac es una de las cuencas más importantes del Perú, pues abastece a la ciudad de Lima y alrededores con el 80 % de la demanda total de agua y el 17% de la demanda hidroenergética (ANA, 2010). Puesto que concentra aproximadamente a la tercera parte de la población nacional.

Sin embargo, a pesar de ser tan importante, la información en referencia a las aguas subterráneas es escasa. Además, este recurso hídrico es usado en las áreas rurales del estado siendo su principal fuente de bebida. Entonces a partir de este estudio se pretende reconocer las propiedades físicas y químicas que caracterizan a las aguas subterráneas de la cuenca.

Además de determinar la hidroquímica, haremos un énfasis en la presencia de los elementos traza que se encuentren en elevadas concentraciones de manera natural en el agua subterránea de la cuenca, pues consideraremos al medio geológico como condicionante en el cambio de las propiedades y composición del agua subterránea. Debemos tener presente que la exposición a largo plazo de metales como el Arsénico se ha relacionado con cánceres internos y de piel (National Research Council, 1999).

La información de este estudio será útil para abordar los problemas de los recursos hídricos, como la situación del agua subterránea en la cuenca, la protección de la fuente de agua y las estrategias de monitoreo y muestreo. Además de informar a las personas que deseen saber más sobre el estado del agua subterránea del cual hacen uso.

2. JUSTIFICACIÓN

Frente a la creciente demanda de recursos hídricos, la exploración de las aguas

subterráneas es una alternativa atractiva para el abastecimiento, en virtud de su abundancia y calidad. El recurso hídrico subterráneo es un bien que se torna estratégico para el desarrollo económico de la sociedad, debiendo ser protegido contra la contaminación.

Durante las últimas décadas, la cuenca del río Rímac ha sufrido una significativa disminución de la calidad y volumen de sus aguas. Siendo agresiva la contaminación a lo largo del río, creando un riesgo para la salud humana y para los componentes del ecosistema. En la parte alta de la cuenca existe minería formal, además de mineras inactivas, cuyos vertimientos fluyen hacia el cauce del río Rímac.

Evaluar el estado del recurso hídrico subterráneo del que se dispone en la cuenca, nos permitirá un aprovechamiento de manera razonable y óptima del recurso.

3. OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es evaluar la contaminación geogénica aquella que puede ocasionar peligro a la población que consume estas fuentes de agua subterránea.

Como objetivos secundarios se plantea:

- Caracterizar las fuentes de agua subterránea a partir de su composición química, permitiendo conocer el estado del recurso hídrico subterráneo.
- Identificar los puntos de agua subterránea que presenten altas concentraciones de origen natural de elementos traza que puedan tener repercusión toxicológica.

4. CARÁCTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.1. Localización y accesibilidad

El área de estudio se sitúa en la cuenca del río Rímac e Intercuenca del Pacífico 1375539 con una extensión de 3636,71 Km², localizada geográficamente en la región central y occidental del Perú.

Políticamente está dentro del departamento de Lima capital del Perú, abarcando las provincias de Lima, Huarochirí y la provincia constitucional del Callao (Figura 1); concentrando aproximadamente a la tercera parte de la población nacional experimentando un ritmo acelerado de crecimiento poblacional. El INEI estima que la población de Lima Metropolitana tendría 9 millones 977 mil habitantes asentados (Tabla 1).

Tabla 1.
Población del área de estudio.

Departamento	Provincia	Distritos	Población
Lima	Lima	43	8 890 792
	Huarochirí	25	72 335
	Callao*	7	1 013 935
Total			9 977 062

Fuente: (INEI, 2015)

*Provincia constitucional

Su área de influencia abarca las siguientes coordenadas UTM dentro de la zona 18 Sur, Datum WGS 84:

263600 E, 8733130 N y 38500 E, 8733130 N

263600 E, 8642500 N y 38600 E, 8642500 N

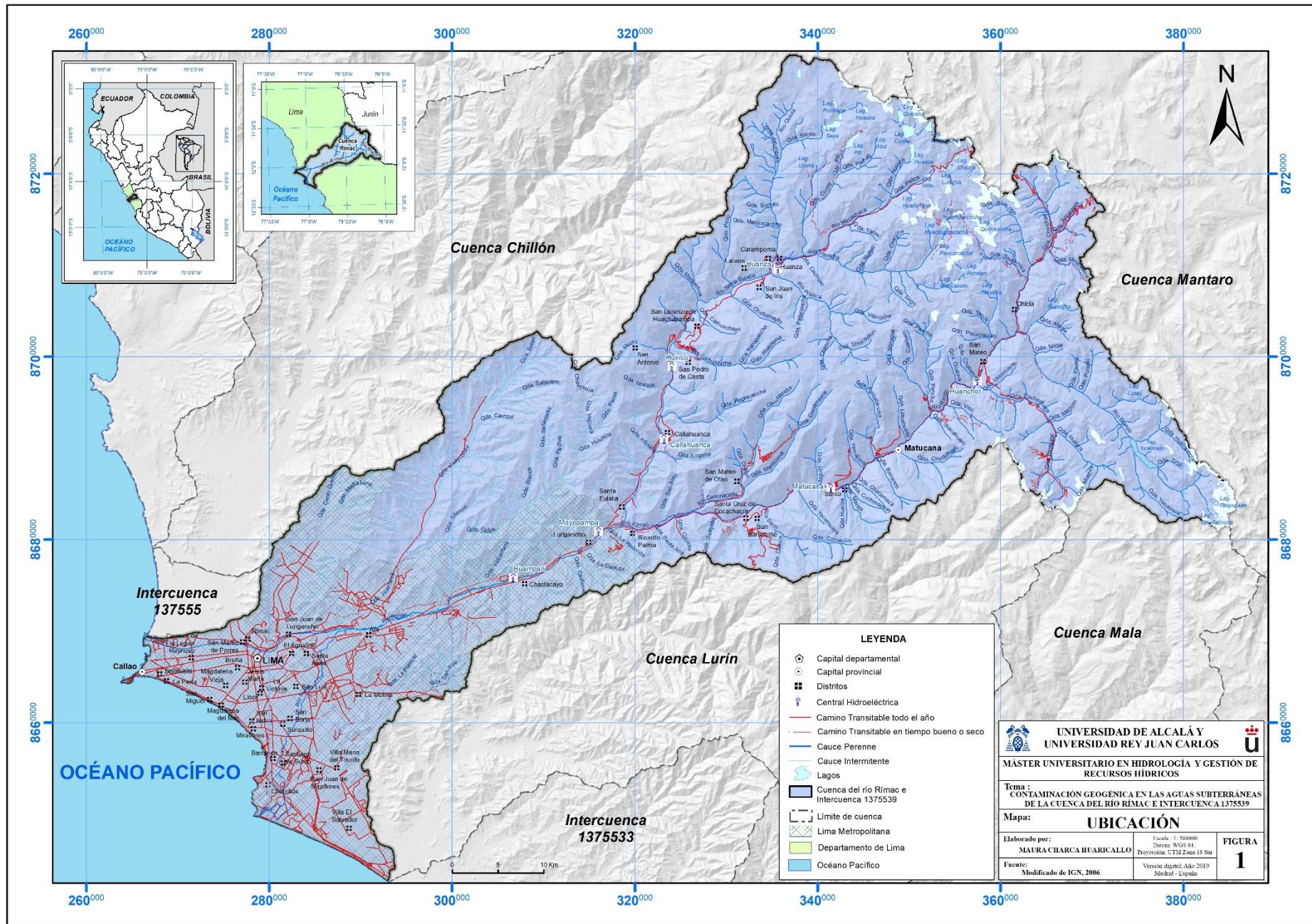


Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio.

La zona de estudio pertenece a la vertiente hidrográfica del Pacífico, cuyos límites hidrológicos son: al Norte con la cuenca del río Chillón; al Sur la cuenca del río Lurín y la cuenca del río Mala; al Este limita con la cuenca del río Mantaro y al Oeste con el Océano Pacífico.

El acceso a la cuenca desde la ciudad de Lima es por la carretera central asfaltada, llegando hasta Ticlio (4818 m.s.n.m.) punto más elevado y principio de la cuenca del río Rímac. A esta vía se conectan carreteras afirmadas y trochas carrozables, que sirven de acceso a los centros poblados y centros mineros dentro de la cuenca.

4.2. Hidrografía

El río Rímac se origina en la vertiente occidental de la Cordillera de los Andes a una altitud aproximada de 5508 m.s.n.m. en el nevado Pacay, con una longitud de 132 Km y cuyos afluentes principales son el río Santa Eulalia y el río San Mateo, los que confluyen en las cercanías de la localidad de Chosica dando origen al río principal. El mismo que atraviesa la ciudad de Lima hasta desembocar en el Océano Pacífico.

La cuenca del río Rímac está constituida por 9 unidades hidrográficas menores como se muestra en la Figura 2. las mismas que están asociadas a su río o quebrada principal.

Asimismo, cuenta con un sistema hídrico conformado por 15 lagunas reguladas que aseguran el caudal del río Rímac con una capacidad de 77 Hm³, en la cuenca Santa Eulalia; y la represa de Yuracmayo con una capacidad de 48,3 Hm³, en la Cuenca Blanco (Sedapal, 2016). Además de ello la cuenca presenta aporte de agua de trasvase que está dirigido al uso energético y poblacional, su regulación es significativa en el periodo de estiaje. El aporte por trasvases y regulaciones del sistema Marcapomacocha (cuenca Mantaro) es de 157,05 Hm³. El total de sistemas de regulación y trasvases es de 282,35 Hm³.

La importancia hidroenergética de la cuenca se percibe a lo largo del recorrido del río Rímac, en el que se ubican siete centrales hidroeléctricas: Huanza, Huinco, Callahuanca, Huanchor, Matucana, Moyopampa y Huampani (Osinermin, 2015).

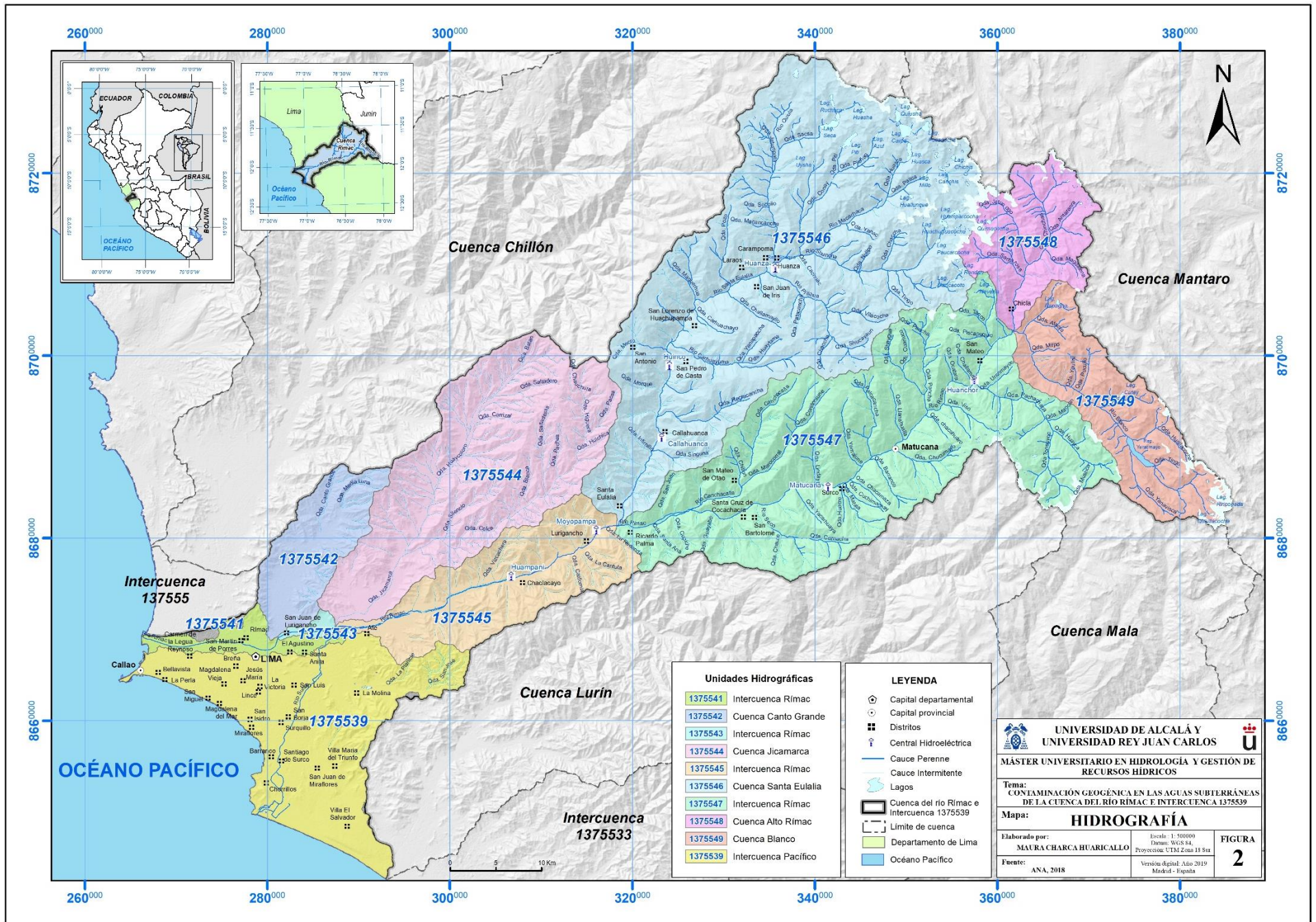


Figura 2. Mapa hidrográfico de la zona de estudio.

El caudal del río Rímac varía durante la época de avenida y estiaje (Tabla 2), el mismo que recibe a lo largo de su recorrido diversos vertimientos como: mineros (relaves, aguas ácidas y otros), industriales (efluentes industriales) y domésticos, así como todo tipo de residuos sólidos.

Tabla 2.
Estadística hidrológica del río Rímac.

N°	Vertiente	Río	Estación	Estadísticas de caudales (m ³ /s)		
				Promedio	Máximo	Mínimo
1	Pacífico	Rímac	Chosica	25,43	79,68	15,89

4.3. Climatología

La cuenca del río Rímac, está influenciada por su ubicación en el borde del anticiclón del Pacífico del Sur, la corriente de Humboldt y la presencia de la Cordillera Andina. Estos elementos definen las tendencias en el comportamiento de los parámetros meteorológicos.

Las características climáticas están sustentadas en información meteorológica de aproximadamente veinte años desde 1965 a 1984; con lo que se formuló los índices climáticos y el trazado de las zonas de acuerdo a la clasificación de climas de Werren Thornthwaite (Senamhi, 2002).

Dentro del área de estudio se ha distinguido las siguientes zonas (Figura 3):

- **Zona de clima semicálido (Desértico-Árido-Subtropical, E(d)B'1H3°)**, con temperaturas media de 18 a 19°C, descendiendo en los niveles más elevados de la región. Esta zona climática se extiende hacia el litoral costero, donde hay presencia de cielo nuboso y escasa o nula precipitación, tipificando así a una zona árida. Las lluvias son muy escasas en la mayor parte del año.

- **Zona de clima semiseco-frío (C (o, i, p) B´3H3°)**, este clima es propio de los valles interandinos bajos e intermedios situados sobre los 1000 y 3500 m.s.n.m. Las temperaturas sobrepasan los 20°C y la precipitación anual se encuentra por debajo de los 500 mm, aunque en las partes más elevadas y orientales, pueden alcanzar los 1200 mm. año cuando se produce el Fenómeno del Niño, ocasionando lluvias de moderada a fuerte intensidad.
- **Zona de clima lluvioso semifrígido (de tundra, B(i)D´H3°)**, este tipo climático es propio de la región andina, se da sobre los 3500 a 5000 m.s.n.m. Se caracteriza por presentar precipitaciones anuales en promedio de 700 mm, temperaturas anuales de 7°C y nieves perpetuas en alta montaña. Presenta veranos lluviosos e inviernos secos con heladas moderadas.

La precipitación, en la parte baja de la cuenca, pocas veces excede los 50 mm/año mientras que en la parte alta o cuenca húmeda la precipitación pasa los 1000 mm/año (ANA, 2010).

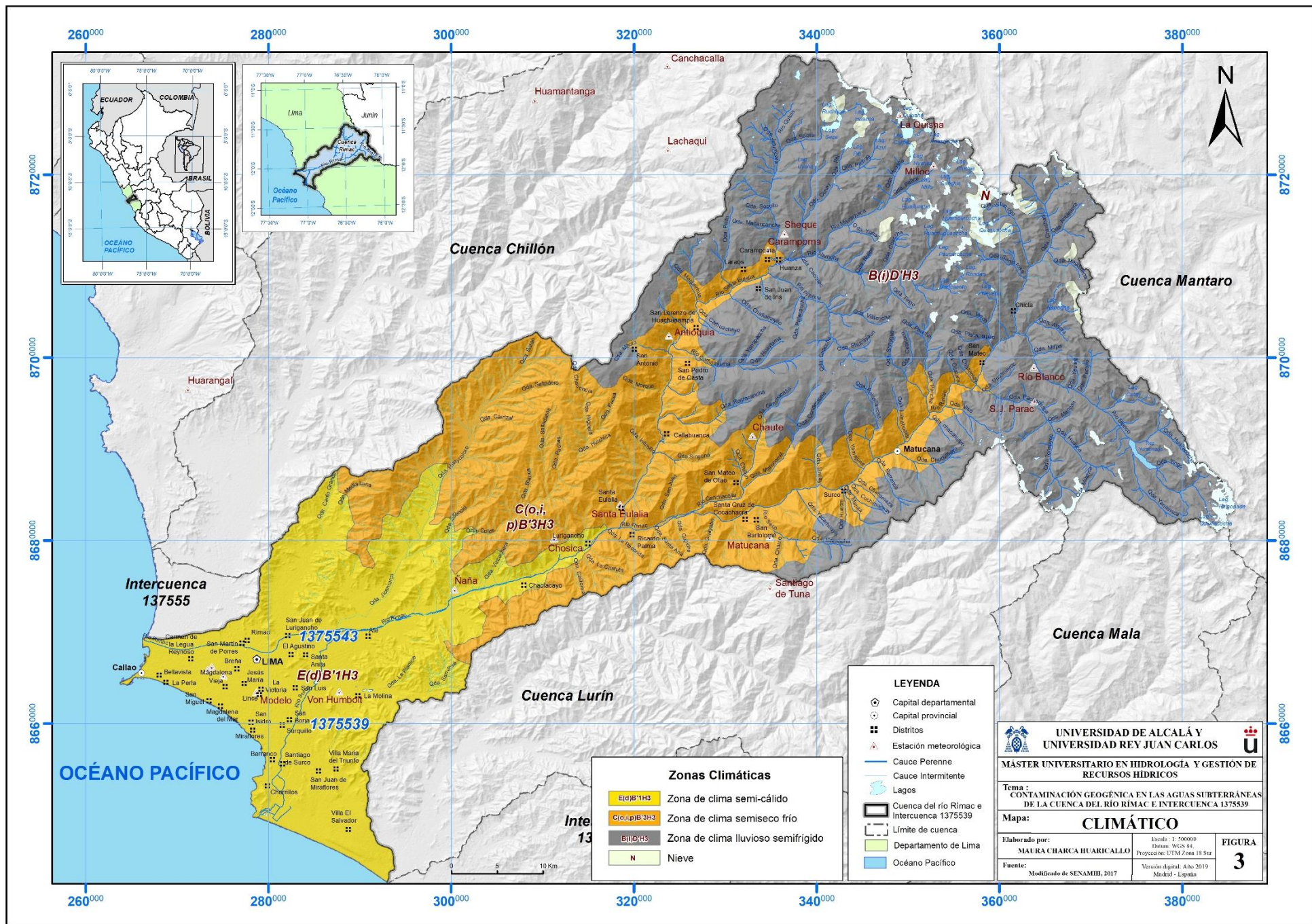


Figura 3. Mapa climático de la zona de estudio.

4.4. Geología

En la cuenca del río Rímac se ha desarrollado la sedimentación coetáneamente con la intensa actividad volcánica, la misma que en el sector costanero, tanto de Norte a Sur como de Oeste a Este, se interdigita con la secuencia sedimentaria, para hacerse predominantemente volcánica a lo largo de la faja del borde occidental andino, coincidiendo con la zona de emplazamiento del Batolito de la Costa (Palacios et al., 1992).

El ciclo sedimentario más antiguo se evidencia en el sector Norte y Noreste de Lima, que corresponde a una facies volcánico-sedimentaria de edad Jurásico Cretácico, dentro de la cual se puede reconocer a la Formación Arahua una de las unidades más antiguas, y hacia el Oeste al Grupo Puente Piedra con volcanismo predominante cuyos focos magmáticos estuvieron hacia el occidente y cuya edad es de fines del Jurásico y comienzos del Cretácico. Le sigue un ciclo eminentemente sedimentario clástico de edad Neocomiano inferior hacia la parte oriental unas facies volcánicas denominadas como Formación Yangas, luego deviene en el Neocomiano superior un tercer ciclo con facies arcillo calcárea representado por Formaciones Pamplona y Atocongo, las mismas que constituyen una unidad sedimentaria continua. Finalmente, en el Albiano deviene un ciclo sedimentario volcánico con un volcanismo continuo hasta probablemente el Cenomaniano, se presenta controlado por la presencia de diferentes focos de emisión magmática ubicados en el sector oriental del área. Este ciclo está representado por el Grupo Casma, el cual ha sido diferenciado en diferentes formaciones, constituidas por una acumulación volcánica monótona sin fósiles y pobremente estratificadas.

La sedimentación mesozoica al este subyace discordante a la serie continental representada por una gruesa acumulación predominantemente volcánica que ocupa el sector Noreste de la cuenca.

Hacia la zona Suroeste de la cuenca se emplaza el Batolito de la Costa que ha intruido al paquete sedimentario y volcánico causando un metamorfismo térmico notable, silicificando las rocas preexistentes y/o dando lugar a pizarras, cuarcitas y

mármoles. Así mismo, en el área hay emplazamiento de numerosos diques andesíticos, vinculados al magmatismo de Casma o manifestaciones tardías del Batolito.

En la zona andina de la cuenca, se denota el emplazamiento de rocas volcánicas del Cenozoico, así como depósitos de actividad glacial cuaternaria en forma de fluvio glaciares; en la zona costera sobre las secuencias marina Mesozoica se asientan depósitos cuaternarios aluviales, fluvio aluviales y eólicos.

La estratigrafía general de la cuenca del río Rímac e Intercuenca 1375539, se ha elaborado en base a la información de las cartas geológicas realizadas por el INGEMMET a escala 1:100 000, de los cuadrángulos de Lima (Hoja 25-i); Lurín (Hoja 25-j); Chancay (Hoja 24-i) y Chosica (Hoja 24-j).

A continuación, hacemos una descripción litológica de las unidades geológicas presentes en la cuenca del río Rímac e Intercuenca 1375539 (Figura 4).

4.4.1. Mesozoico

4.4.1.1. Jurásico

Hacia la parte central de la cuenca del río Rímac se aprecia la formación Arahua, la cual es atravesada por fallas locales de dirección NW-SE; compuesta principalmente por metavolcánicos andesíticos con lodolitas calcáreas, calizas bituminosas, andesitas, hornfels. Sin embargo, hacia la costa, se tiene el Grupo Puente Piedra, con la Formación Ventanilla cuya litología consiste en limolitas y arcilla abigarradas intercaladas con limolitas y areniscas limosas finamente estratificadas.

4.4.1.2. Cretácico

En la cuenca del río Rímac, se muestra hacia el Noreste la Formación Jumasha compuesta de calizas micríticas gris pardas a beige en capas medias a gruesas, intercaladas con calizas nodulares. Además de la presencia del Grupo Gollarisquizga, con las Formaciones Chúlec - Pariatambo, Santa-Carhuaz y Chimú,

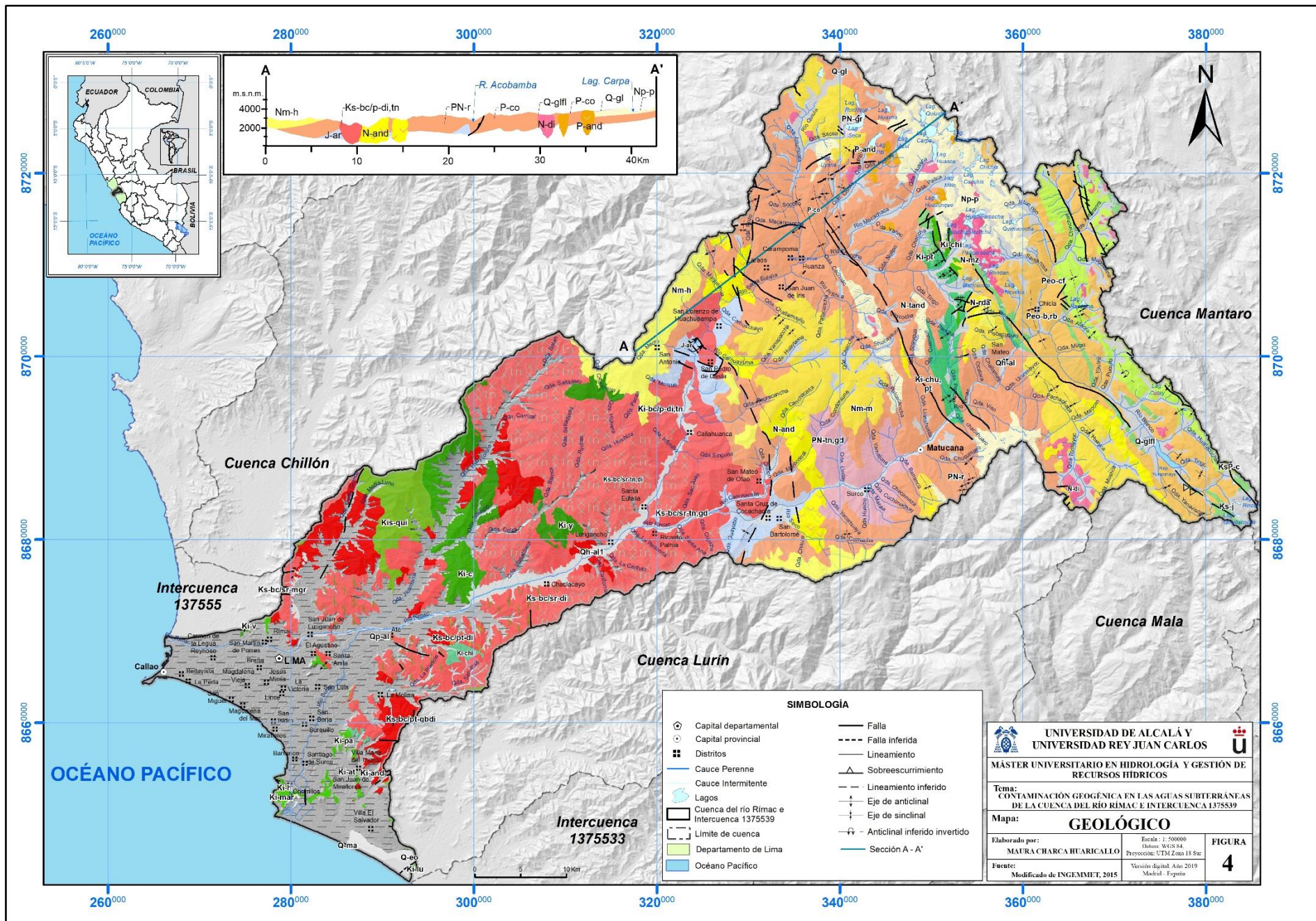


Figura 4. Mapa geológico de la cuenca del río Rímac e Intercuenca 1375539.

LEYENDA

ERA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	Simbología	ROCAS INTRUSIVAS	Simbología
CENOZOICO	Cuaternario	Holoceno	Depósito marino	Q-ma	Traquiandesita Andesita Riodacita Granito Tonalita, granodiorita Diorita Monzonita Andesita Batolito de la Costa - Super Unidad Santa Rosa - Tonalita, diorita Batolito de la Costa - Super Unidad Santa Rosa - diorita Batolito de la Costa - Super Unidad Santa Rosa - monzogranito Batolito de la Costa - Super Unidad Santa Rosa - tonalita, granodiorita Batolito de la Costa - Super Unidad Patap - gabrodiorita Batolito de la Costa - Super Unidad Patap - diorita Batolito de la costa - Super Unidad Paccho - diorita, tonalita Andesita	N-tand
			Depósito eólico	Q-eo		N-and
			Depósito aluvial	Qh-al		N-rda
		Pleistoceno	Depósito aluvial	Qp-al		PN-gr
			Depósito glacial	Q-gl		PN-tn,gd
			Depósito glacial, fluvial	Q-gfl		N-di
	Neógeno	Plioceno	Formación Pacococha	Np-p		N-mz
		Mioceno	Formación Millotingo	Nm-m		P-and
	Paleógeno		Oligoceno	Formación Huarochiri		Nm-h
		Formación Rímac		PN-r		Ks-bc/sr-di
		Eoceno	Formación Colqui	P-co		Ks-bc/sr-mgr
			Formación Carlos Francisco	Peo-cf		Ks-bc/sr-tn,gd
Paleoceno		Formación Bellavista, Río Blanco	Peo-b, rb	Ks-bc/pt-gbdi		
		Formación Casapalca	KsP-c	Ks-bc/pt-di		
MESOZOICO	Cretácico	Superior	Formación Jumasha	Ks-j	Ki-bc/p-di,tn	
		Inferior	Gpo. Collasiquiza	Formación Chúlec Pariatambo	Ki-chu, pt	Ki-and
				Formación Santa Carhuaz	Ki-s,ca	
				Formación Chimú	Ki-chi	
			Gpo. Casma	Formación Quilmaná	Kis-qui	
				Formación Chilca	Ki-chil	
			Gpo. Lima	Formación Atocongo	Ki-at	
				Formación Pamplona	Ki-pa	
				Formación Lurín	Ki-lu	
				Formación Marcavilca	Ki-mar	
			Gpo. Morro Solar	Formación Herradura	Ki-h	
				Formación Salto del Fraile	Ki-sf	
				Formación Yangas	Ki-y	
			Gpo. Puente Piedra	Formación Ventanilla	Ki-v	
				Jurásico	Superior	

Figura 4. (Continuación) Mapa geológico de la cuenca del río Rímac e Intercuenca 1375539.

compuesto de calizas claras y oscuras formando secuencias de grano y estrato creciente; seguido de limoarcillitas rojas intercaladas con areniscas blancas y calizas grises. La Formación Chimú está constituida de areniscas cuarzosas blancas intercalado con limo arcillitas.

Sin embargo, hacia la costa se exponen el Grupo Morro Solar conformado por la Formación Salto del Frayle, Herradura y Marcavilca cuya composición litológica se trata de rocas sedimentarias como areniscas, calizas micríticas, limolitas y arcillas. Sobreyaciendo a este se tiene al Grupo Lima que agrupa a las formaciones de Atocongo, Pamplona y Lurín, con un conjunto de rocas sedimentarias conformada por calizas altamente silicificadas, areniscas intercaladas con lutitas; y calizas micríticas.

En poca extensión dentro de la cuenca se tiene secuencias volcánicas del Grupo Casma.

4.4.2. Cenozoico

4.4.2.1. Paleógeno

En la época del Paleoceno, la sedimentación de las capas rojas continentales continuo, producto de ello se tiene la Formación Casapalca, constituida por areniscas rojas intercaladas con limolitas, limoarcillitas, conglomerados, yeso y calizas, su mejor exposición está al Noreste de la cuenca del río Rímac. Sin embargo, en el área de estudio, existe la predominancia de la Formación Colqui, cuya litología consta de andesitas intercaladas con lodolitas y areniscas, brechas tobáceas, lavas porfiríticas.

También se expone una secuencia volcánica andesítica de la Formación Rímac; cuya litología consta de intercalaciones de flujo andesíticos porfiríticas grises. Además, se tiene la Formación Carlos Francisco compuesto hacia la base de conglomerados y gravas, la parte media de lavas andesíticas y hacia la parte superior tobas rojizas intercaladas con lapilli y areniscas tobáceas. En menor extensión se tiene a la Formación Bellavista, Río Blanco; cuya litología la componen

calizas margosas pardas amarillentas.

4.4.2.2. Neógeno

Se tiene expuesta a la Formación Huarochirí que aflora en el centro de la cuenca Rímac, compuesta de tobas riolíticas a riodacitas, ignimbritas riolítica color rosado. También está presente la Formación Millotingo, que consta de andesitas intercaladas con lodolitas y areniscas, brechas tobáceas, lavas porfíricas. Sin dejar de lado la presencia de la Formación Pacococha, cuya predominancia litológica volcánica la compone una intercalación de tobas de cristales, lavas andesíticas afaníticas, brechas y tobas cristalolíticas.

4.4.2.3. Cuaternario

En la llanura costera de la cuenca, se tiene la presencia de sedimentos fluvio-aluviales compuesto de gravas, intercaladas con limos, arenas, que han formado el cono aluvial, sobre el cual se encuentra un gran porcentaje de la ciudad de Lima; también se cuenta con depósitos eólicos compuesto primordialmente de arenas cuarzosas. Pero hacia el Noreste de la cuenca, al pie de las laderas ubicamos materiales poco consolidados conformados por gravas angulosos a subangulosos, intercalados con arenas, arcillas y limos.

4.4.3. Rocas ígneas

La presencia de rocas intrusivas se da ampliamente en la parte media de la cuenca, con las Super Unidades de Paccho, Patap y Santa Rosa, agrupando a dioritas, tonalitas, granodioritas, tonalitas, gabrodioritas, monzogranito y doleritas.

4.4.4. Rocas volcánicas

En este grupo están incluidos intrusiones menores, distribuidas en toda la cuenca, pero en poca extensión conformado por andesitas, riodacita y tranquiandesitas, habiendo sucedido en el Neógeno y Paleógeno.

4.5. Rasgos estructurales

La evolución tectónica de la cuenca data del Cretácico hasta probablemente el Cuaternario. En el sector occidental es evidente un sistema de fallas longitudinales, vinculadas a una fase de compresión intracretácica, así como un sistema de fracturas y fallas transversales que obedecen a procesos tectónicos de compresión post Batolito. El sistema de fallas longitudinales muestra una dirección NO-SE, paralela a la cadena andina.

Además, se tiene fallamientos transversales que son de menor longitud. Situadas hacia la zona costera de la cuenca, dentro de este grupo se tiene a la Falla Chorrillos, que afecta a la Formación Salto de Fraile a la altura del Club Regatas, con un rumbo E-O, de movimiento normal. La falla Salto del Fraile, que pone en contacto a la Formación Herradura con la Formación Salto del Fraile, con rumbo de N75°E de movimiento sinextral normal. La Falla El Túnel, que afecta a las Formaciones Salto Fraile y Herradura, paralela al túnel de la Herradura, con un rumbo de N60°E de movimiento siniestral normal. La Falla Chira afecta a la Formación Marcavilca en la playa la Chira, con rumbo de N5°O de movimiento dextral normal. La Falla Cuello de Villa afecta a las formaciones Herradura y Marcavilca a la altura de la localidad de Villa, con rumbo N-S y de movimiento dextral normal.

Hacia la cordillera andina se presentan rocas Cretácicas plegadas, cuyos afloramientos están distribuidos en fajas pequeñas a medianas orientadas en sentido NO-SE. En el área de Sangrar-Túnel Transandino, se muestran calizas cretáceas falladas en un sistema inverso NO-SE con respecto a la Formación Casapalca.

En el sector de Tambo de Viso -Venturosa, entre el valle Rímac y la quebrada Huanchurina, la cabecera del Valle Santa Eulalia, se observan anticlinales y sinclinales orientados en sentido NO-SE. En Tambo de Viso se muestran calizas cretáceas con pliegues apretados en chevron. En el valle del Rímac esta secuencia cretácica presenta fallas de tipo normal e inverso con respecto a la serie volcánica del Paleógeno.

En el sector del puente Infiernillo se muestran fallas inversas que han cortado a las calizas del Jumasha y a un miembro de la Formación Carlos Francisco, con dirección NO-SE.

La Formación Casapalca muestra anticlinales y sinclinales de eje NO-SE, estos plegamientos han sido cubiertos por la Formaciones Carlos Francisco, Bellavista y Río Blanco.

También destaca una falla inversa tipo cabalgamiento de Pomacocha-Ticlio, mostrando escamas de caliza Jumasha entre las capas rojas de la Formación Casapalca.

La secuencia volcánica de la cuenca presenta algunas fallas longitudinales tipo normal o inverso, de orientación NO-SE, tales como La Falla Huampara, que pone en contacto a la Formación Rímac con las Formación Santa, Carhuaz. La Falla Coluta Umazamba, que atraviesa el valle Macachaca, pone en contacto a la Formación Colqui con la Formación Rímac, y en parte con las calizas cretácicas (Salazar y Humberto, 1983).

4.6. Hidrogeología

La cuenca del río Rímac situada en la región hidrográfica del Pacífico, presenta su zona de recarga hacia la cordillera de los Andes, donde encontramos acuíferos fisurados volcánico-sedimentarios como el Colqui y Rímac del Paleógeno que son afectadas por fallas longitudinales de dirección NO-SE, las mismas que les confieren una alta permeabilidad a estas litologías (Figura 5).

Estos acuíferos reciben gran aporte de agua en temporada de verano, ya que se producen las mayores precipitaciones (sobre los 1000 mm al año según la ANA), saturando de agua a los materiales volcánico sedimentario en sus primeros metros de espesor, dándose la recarga por precipitación. En cuanto a la zona de descarga esta se manifiesta por la presencia de manantiales, cuyos flujos de agua se acumulan en las altiplanicies originando bofedales altoandinos; así también contribuyen con agua a las quebradas formando riachuelos.

Los acuíferos en rocas volcánicas sedimentaria presentan un comportamiento variable, siendo importantes como zona de recarga, por su extensión y la precipitación que soportan. De acuerdo al mapa hidrogeológico (Figura 5) la dinámica del flujo sería de NE-SO.

En el sector noreste de la cuenca en pequeñas extensiones se presentan los acuíferos fisurados kársticos como el Jumasha y Chúlec -Pariatambo, así también el acuífero sedimentario Chimú. Constituido por rocas sedimentarias del Cretácico las cuales han sido afectadas por fallas longitudinales de dirección NO-SE, así como fallas transversales produciendo plegamientos, que contribuyen a la permeabilidad de estas rocas.

Se exponen también materiales cuaternarios en esta parte de la cuenca, que se encuentran rellenando valles, los depositados en terrazas y algunos materiales de altiplanicies; cuya litología está compuesta de gravas, arenas y matriz limosa, constituyendo así acuíferos libres de poca extensión y espesor.

Hacia la zona de la costa se aprecia el acuífero libre de amplia extensión y espesor saturado variable, expone materiales no consolidados cuya litología se compone hacia la base de gravas redondeadas en capas de materiales finos. La disposición en capas ha sido producto de la deposición de material a lo largo del tiempo por el río Rímac. Este acuífero tiene conexión hidráulica con el río Rímac dándose así la recarga del acuífero; por otro lado, las filtraciones de agua de riego de las áreas verdes también estarían recargándolo, puesto que en esta parte de la cuenca la precipitación es de 50 mm (ANA, 2010). En este acuífero se han distribuido pozos de los cuales se extrae agua subterránea para abastecimiento de la población en épocas de estiaje.

Algunos materiales geológicos no transmiten agua subterránea a rangos significantes, mientras otros sólo permiten pequeñas cantidades de flujo a través de ellos, estos son los denominados acuitardos respectivamente. Aunque ellos no transmiten mucha agua, ellos influyen en los movimientos del agua a través de los acuíferos (Brassington, 2007).

En la cuenca del río Rímac e Intercuenca 1375539 la mayor parte de la superficie está conformada por acuitardos, ubicándolas en la parte baja y media de la cuenca principalmente (Figura 5). Estas unidades ocurren como grandes cuerpos intrusivos del Batolito de la Costa (cuenca media) y algunas otras rocas de poca extensión que se manifiestan en forma de diques y venas (cuenca alta).

Esta unidad hidrogeológica no presenta porosidad primaria, y tienen una permeabilidad insignificante. Sin embargo, el intemperismo y tectonismo de la zona, le imparten una porosidad secundaria, así como una permeabilidad variable. En estos materiales la única forma de circulación que tiene el agua subterránea es a través de fallas y/o fracturas regionales.

Se ha determinado también acuitardos volcánicos sedimentarios a las formaciones Huarochirí, Millotingo, Quilmaná, Chilca y Arahua; las mismas que afloran en la parte media y baja de la cuenca. Debido a las propiedades hidrogeológicas que tienen sus materiales por su baja porosidad y permeabilidad, ya que llegan a saturarse de agua en su interior, pero la transmisibilidad es muy lenta.

También se ha diferenciado a los acuitardos sedimentarios dentro de los cuales se tiene a las formaciones Bella Vista – Río Blanco, Casapalca, Santa-Carhuaz, a las formaciones del Grupo Lima, Grupo Morro Solar y Grupo Puente Piedra. Afloran en poca extensión cada formación, pero conjuntamente son una gran unidad acuitarda de escaso interés hidrogeológico.

Estos acuitardos actúan como barreras dentro de la cuenca, y por sus escasas propiedades de porosidad y permeabilidad, contribuyen más al aporte de agua hacia los acuíferos superficiales, que a la recarga de acuíferos más profundos.

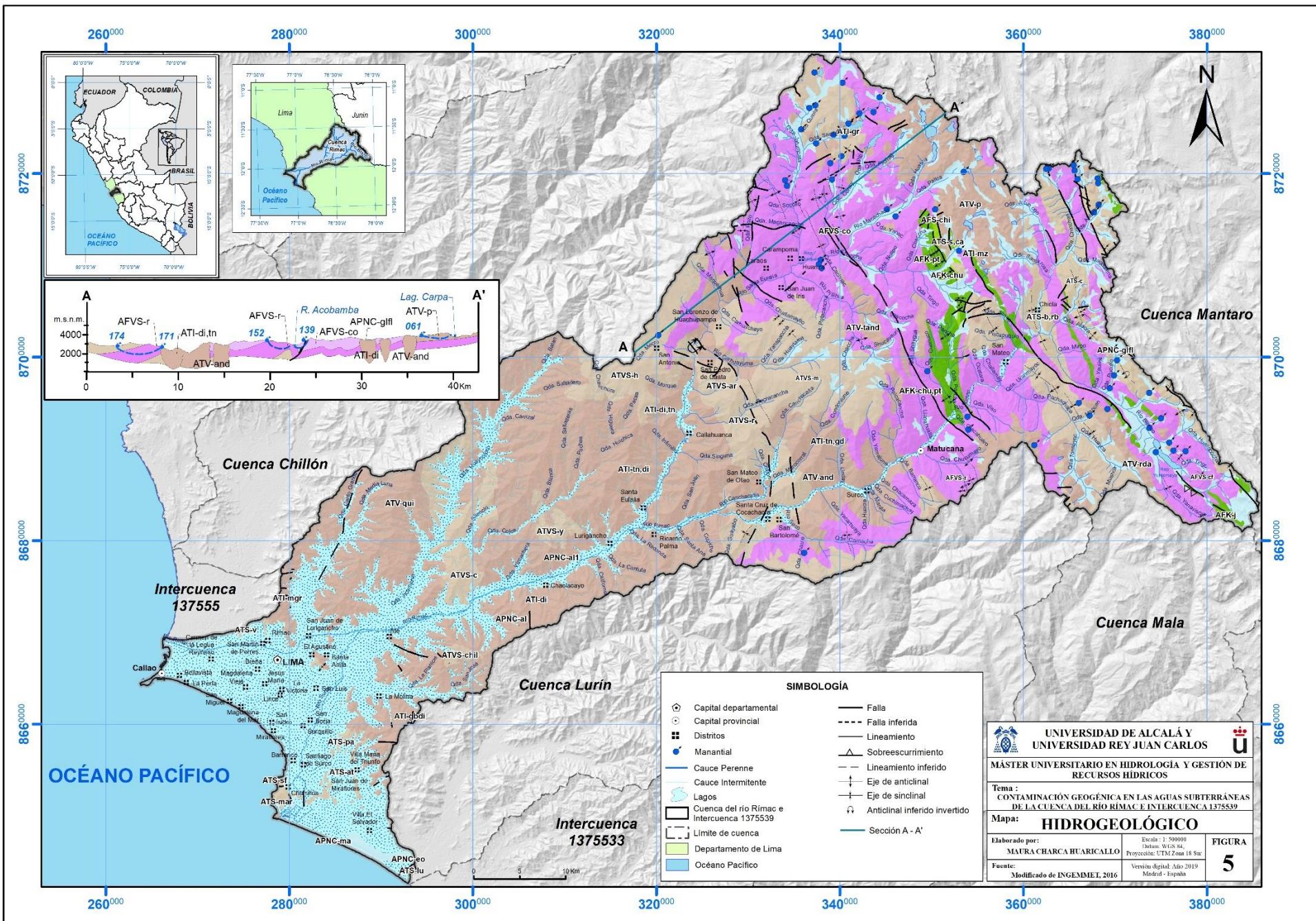


Figura 5. Mapa hidrogeológico de la cuenca del río Rímac e Intercuenca 1375539.

LEYENDA

ERA	SISTEMA	SERIE	CLASIFICACIÓN	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	LITOLOGÍA	HIDROGEOLOGÍA	Simbología					
CENOZOICO	Cuaternario	Holoceno	Acuífero	Depósito marino Depósito eólico Depósito aluvial Depósito glacial, fluvial	Arenas y cantos bien clasificados Arenas cuarzosas Arenas, cantos redondeados a subredondeados, bolos Bloques rocosos subangulosos a subredondeados, rellenos con arcillas, limos y arenas	Acuíferos libres de poco espesor recargados por las precipitaciones, y el cauce del río. Presencia de surgencias.	APNC-ma					
		Pleistoceno					APNC-eo					
							APNC-al					
		Neógeno					Plioceno	Acuitardo	Volcánico	Formación Pacococha	Intercalación de tobas de cristales y lavas andesíticas afaníticas	Acuitardo de baja porosidad, se expone hacia la cordillera occidental
	Mioceno		Volcánico Sedimentario	Formación Millotingo	Andesitas intercaladas con lodolitas y areniscas	Materiales de baja porosidad.	ATVS-m					
			Volcánico	Formación Huarochirí	Tobas riolíticas a riolodacitas		ATVS-h					
	Paleógeno	Oligoceno	Acuífero	Fisurado Volcánico Sedimentario	Formación Rímac	Intercalaciones de flujos andesíticos porfíricos grises con tobas de cristales rosáceo a parduzca y areniscas subordinadas	Acuíferos por fisuración, albergan agua en los primeros metros del espesor litológico.	AFVS-r				
					Formación Colqui	Andesitas intercaladas con lodolitas y areniscas		AFVS-co				
					Formación Carlos Francisco	Conglomerados, gravas, lavas andesíticas, tobas rojizas intercaladas con lapilli y areniscas tobáceas		AFVS-cf				
		Eoceno	Acuitardo	Sedimentario	Formación Bellavista, Río Blanco	Calizas margosas pardas amarillentas	Materiales de baja porosidad	ATS-b, rb				
					Formación Casapalca	Areniscas rojas intercaladas con limolitas, limoarcillitas, conglomerados, yeso y calizas.		ATS-c				
					Formación Jumasha	Calizas micríticas en capas medias o gruesas, intercaladas con calizas nodulares		AFK-j				
MESOZOICO	Cretácico	Superior	Fisurado Karstico	Formación Chúlec Pariatambo	Calizas que forman secuencias de grano y estrato creciente	Acuíferos locales por fisuración y disolución	AFK-chu, pt					
				Acuitardo	Sedimentario	Gpo. Guanajuata	Formación Santa Carhuaz	Limoarcillitas rojas intercaladas con areniscas blancas y calizas grises	Materiales impermeables	ATS-s,ca		
							Formación Chimú	Areniscas cuarzosas blancas intercalado con limoarcillitas grises y niveles de carbón	Acuífero local por fisuración	AFS-chi		
							Acuífero	Fisurado Sedimentario	Gpo. Guanajuata	Rocas ígneas	Agrupar a las rocas intrusivas que forman parte del Batolito de la Costa e intrusivos menores	Materiales impermeables que se comportan como barreras hidráulicas.
				Volcánico Sedimentario	Gpo. Costa	Formación Quilmaná				Piroclastos y derrames andesíticos masivos	Materiales impermeables hacia la zona costera de la cuenca del río Rímac.	ATVS-qui
						Formación Chilca				Tobas líticas y vítricas con intercalaciones de brechas volcánicas		ATVS-chil
		Inferior	Acuitardo	Sedimentario	Gpo. Lima	Formación Atocongo	Calizas gris clara a beige, altamente silicificado por metamorfismo termal	Materiales impermeables hacia la zona costera de la cuenca del río Rímac.	ATS-at			
						Formación Pamplona	Areniscas intercalados con lutitas y calizas, con algunos niveles de margas calcáreas		ATS-pa			
						Formación Lurín	Calizas micríticas grises con estratos de limolitas		ATS-lu			
						Formación Marcavilca	Areniscas cuarzosas de grano medio a fino		ATS-mar			
						Formación Herradura	Calizas gris oscuras, limoarcillitas con areniscas pardas		ATS-h			
						Formación Salto del Fraile	Arenisca gris verdosas, limolitas abigarradas y areniscas cuarzosas grises		ATS-sf			
Jurásico	Superior	Volcánico Sedimentario	Gpo. Huari e Pírida	Formación Yangas	Andesitas masivas, lodolitas, margas silicificadas con chert	ATS-y						
				Formación Ventanilla	Limolitas y arcillas abigarradas intercaladas con limolitas y areniscas limosas	ATS-v						
				Formación Arahuay	Metavolcánicos andesíticos con lodolitas calcáreas, calizas bituminosas, andesitas, hornfels	ATVS-ar						

Figura 5. (Continuación) Mapa hidrogeológico de la cuenca del río Rímac e Intercuenca 1375539.

5. METODOLOGÍA

El inventario y muestreo de los puntos de agua subterránea se realizó en los años 2012 a 2013 por el equipo técnico del Programa de Hidrogeología del INGEMMET. Para lo cual se recopiló información de ubicación, coordenadas geográficas, parámetros fisicoquímicos además de recolectar muestras para el respectivo análisis químico.

En la tabla 3 se muestra los parámetros fisicoquímicos que se midieron con el equipo multiparamétrico portátil Orion Star A329, además de los parámetros químicos que fueron analizados en laboratorio.

Tabla 3.
Parámetros fisicoquímicos determinados en los puntos de agua subterránea.

Parámetro	Unidad
Temperatura (T)	°C
Conductividad Eléctrica (C.E.)	μS/cm
Potencial de hidrogeniones (pH)	Unidades de pH
Aniones mayoritarios Cl ⁻ , HCO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , F ⁻ y NO ₂ ⁻	mg/L
SiO ₂	mg/L
Cationes mayoritarios Ca, Mg, Na, K	mg/L
Elementos Traza As, Fe, Mn, Mo y Zn	mg/L

Para el desarrollo del estudio se recolectó 54 muestras de agua subterránea en botellas de polietileno de 500 ml, una muestra se filtra con membranas de 0,45 μm y se preserva con ácido nítrico (pH<2) para estabilizar los metales disueltos de la solución, para determinar cationes y elementos traza; y otra muestra para aniones. Dichas muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Química de INGEMMET, la metodología de análisis se describe según la tabla 4.

Tabla 4.
Método de análisis usados para las muestras de agua subterránea.

N°	Parámetro de Análisis	Metodología de análisis	Analito
1	Alcalinidad Total	Volumétrico, Titrimétrico, pH 4.5, SM 2320-B	Carbonato (CO ₃ ⁻) y Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)
2	Aniones	Cromatografía Iónica EPA Method 300.0/ Determination of inorganic anions by ion chromatography	Nitrito (NO ₂ ⁻), Nitrato (NO ₃ ⁻), Fluoruro (F ⁻), Cloruro (Cl ⁻), Sulfatos (SO ₄ ²⁻)
3	Metales Disueltos	Espectrometría de emisión atómica por plasma acoplado inductivamente (ICP-OES)	Digestion EPA Method 200.7 Na, Mg, K, Ca, Sr, Li, SiO ₂ , Al, As, B, Ba, Ce, Cr, Cu, Fe, Mn, Ti, Zn, S*
		Espectrometría de masa por plasma acoplado inductivamente (ICP-MS)	Digestion EPA Method 200.8 Ag, Al, As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Th, Tl, U, V, Zn, Sr*, Li* B*, Bi* Ce*, La*, Sn*, Ti*, Y*, W*

Antes de empezar con las interpretaciones hidroquímicas, se verificó la calidad de los análisis químicos de laboratorio y la condición de electroneutralidad, que la suma del peso equivalente de los cationes sea igual a la suma del peso equivalente de los aniones. Esta verificación se lleva a cabo habitualmente calculando el error del balance iónico de los iones principales. Se puede lograr un error de balance iónico de menos del 5% con un equipo analítico moderno y ciertamente menos del 10% (Hiscok, 2005).

$$\% \text{ Error} = \frac{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}} \times 100$$

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Uno de los objetivos del estudio es la caracterización hidroquímica de las aguas subterráneas, por lo que se realizó muestreos puntuales generales en los 54 manantiales permanentes dentro de la cuenca (Figura 6), algunos de ellos son usados para bebida de personas y animales, así como para riego de pastizales. El análisis del presente estudio se enfoca en la presencia de elementos traza disueltos en el agua subterránea, por lo que se presentará la distribución de sus concentraciones dentro de la cuenca, y después sus relaciones con otros iones y las propiedades físicas del agua.

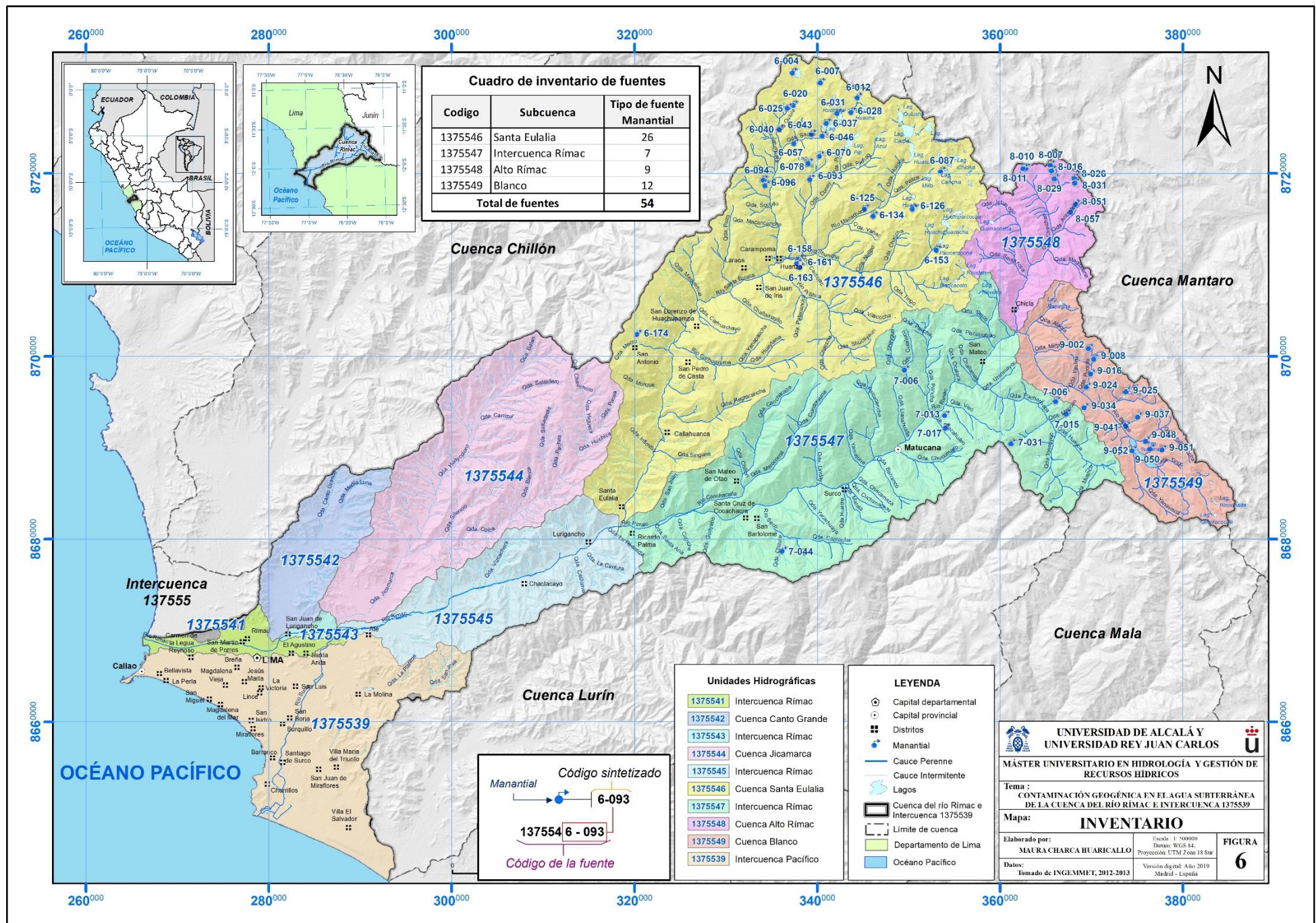


Figura 6. Localización de las fuentes de agua subterránea muestreadas en la cuenca del río Rímac e Intercuenca 1375539.

6.1. Características fisicoquímicas

Los parámetros físicos del agua como son el potencial de hidrogeniones (pH), conductividad eléctrica (CE) y temperatura han sido medido in situ durante el periodo de muestreo. Por lo que sus resultados se detallan a continuación.

6.1.1. pH

El pH es una medida de acidez o alcalinidad del agua subterránea, es importante la medida de este parámetro porque controla muchas de las reacciones químicas involucradas en el agua subterránea y también influye fuertemente en la presencia o ausencia de arsénico, hierro, manganeso y nitrógeno (Davidson y Wilson, 2011).

Los valores de pH se registraron en los 54 manantiales (Figura 7), los mismos que fluctúan entre 3,42 a 9,25, con un promedio de 7,64 (n=54). De lo cual 3 manantiales mostraron valores de pH entre 3,42 (6-020, Huancatahui) a 4,28 (6-031, Corral Amarillo 1) con una tendencia ácida; 46 manantiales presentaron valores de pH en el rango de 6,83 (6-134, Coropashca) a 8,41 (8-011, Antajasha 3) aguas neutras; y 5 manantiales con valores de pH entre 8,53 (9-024, Callona) a 9.25 (9-034, Patacancha 2) aguas con tendencia alcalina.

El pH del agua subterránea puede afectar a las concentraciones de muchos elementos traza en el agua subterránea, incluyendo el Cadmio, Cobalto, Cobre, Plomo, Níquel y Zinc. Estos elementos trazas comúnmente existen como iones de cargas positivas, o cationes, que son más propensos a ser absorbidos, o adheridos, a recubrimientos de óxidos de metal en sedimentos del acuífero a un pH alto (Warner y Ayotte, 2014).

6.1.2. Temperatura

La distribución espacial de la temperatura en un acuífero depende de la conductividad térmica e hidráulica del medio, de la relación longitud/profundidad de la cuenca, configuración del nivel freático, distribución de la temperatura ambiente respecto a las zonas de recarga y descarga, etc. La temperatura de las aguas subterráneas es muy poco variable (Custodio y Llamas, 2001).

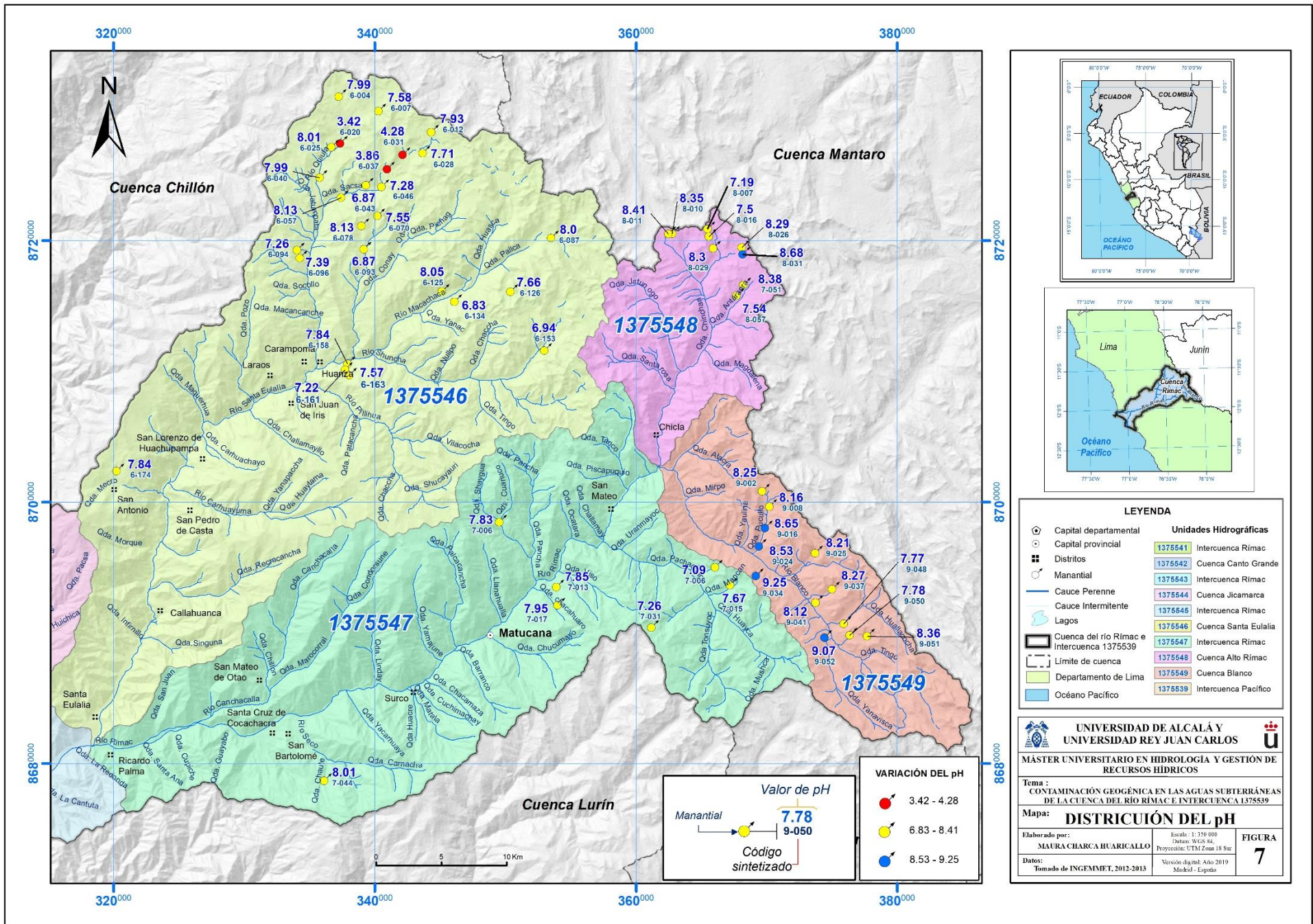


Figura 7. Distribución del parámetro de pH en la zona de estudio.

Los manantiales muestran temperaturas en el rango de 3,3°C (8-011, Antajasha 3) a 17,4°C (7-044, Chaute), con un valor promedio de 8,4 °C.

6.1.3. Conductividad Eléctrica

La medida de la conductividad eléctrica (CE) de una solución es un indicador de las sales disueltas, este hecho es posible porque el agua subterránea es una solución electrolítica con componentes disueltos presentes en forma iónica (Hiscok, 2005).

La conductividad eléctrica del agua subterránea dentro de la cuenca varía en el rango de 49,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (8-007, Pucacocha 2) a 954,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (7-044, Chaute) con un valor promedio de 226,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 8). Si los valores los comparamos con los Estándares de Calidad Ambiental de Perú (ECA) para agua, según la Categoría 1 Clase A2 cuyo límite es de 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, los valores estarían por debajo de este valor.

En la zona de estudio se observa que 8 manantiales presentan valores de CE menor a 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 8), los mismos que se encuentran situados en zonas de mayor altitud (4272 a 4941 m.s.n.m.), que evidencian el poco tiempo de contacto entre las aguas de infiltración y el acuífero por lo que no es suficiente para adquirir mineralización.

En general a partir de este parámetro se podría indicar que son aguas con mineralización baja y de poco tiempo en contacto con el acuífero. Sin embargo, este valor no es suficiente para indicar el estado del agua subterránea, en líneas posteriores analizamos los elementos que están presentes, ya que también es necesario saber de qué está compuesta el agua.

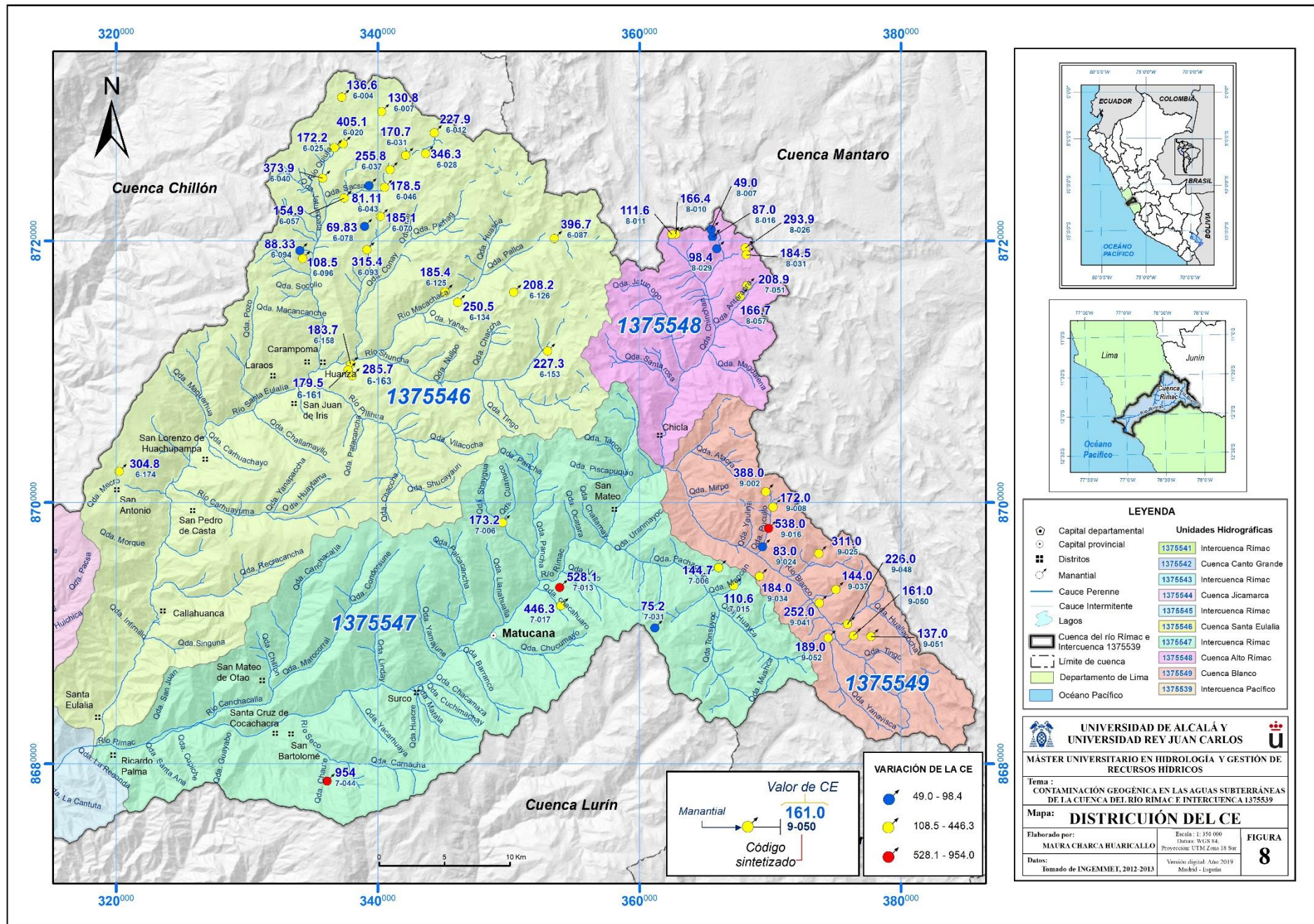


Figura 8. Distribución de la CE en la zona de estudio.

6.2. Facies hidroquímicas

Para determinar las facies hidroquímicas se ha analizado los 54 manantiales pertenecientes a los diferentes acuíferos existentes en la cuenca. Debido a la gran variedad de componentes y características fisicoquímicas del agua subterránea, nos exige la clasificación a fin de informar de forma sencilla la composición química o sobre algunos aspectos de esta. En este estudio se optó por el uso de diagramas de Piper.

6.2.1. Diagramas de Piper

El agua subterránea acumula solutos con la distancia recorrida a lo largo de su trayectoria, entonces a partir de las concentraciones de los iones mayoritarios se ha determinado el tipo de agua de los 54 manantiales muestreados. La información química se ha agrupado en 3 tipos de agua: bicarbonatada cálcica, sulfatada cálcica y sulfatada cálcica magnésica (Figura 9).

El grupo del tipo bicarbonatada cálcica, es el predominante agrupando a 36 manantiales que están sobre los 3520 m.s.n.m. a 4941 m.s.n.m. cuyos afloramientos de agua en superficie se asocian a las formaciones volcánicas sedimentarias Rímac, Colqui que se encuentran en contacto con los depósitos cuaternarios. La CE de este tipo de agua está en el rango de 49,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 388,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ estando por debajo de los 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ asociado a la meteorización de silicatos presentes en los flujos andesíticos y tobas de la Formación Colqui y Rímac; con valores de pH entre 6,87 y 9,25, mostrando una tendencia alcalina, debido a la presencia de bicarbonato en el agua que va de 31,13 a 178,74 mg/L que le confieren esta característica.

En cuanto a las concentraciones de calcio presente en las muestras este va de 8,33 mg/L a 72,44 mg/L; las aguas dulces presentan valores entre 10 y 250 mg/L frecuentemente (Custodio y Llamas, 2001). La presencia de Ca^{2+} en el agua subterránea está controlada por procesos de precipitación-disolución en el sistema carbonato-bicarbonato (pCO_2 y pH) y por el intercambio catiónico con la fase sólida (Na^+ , Mg^{2+} , etc).

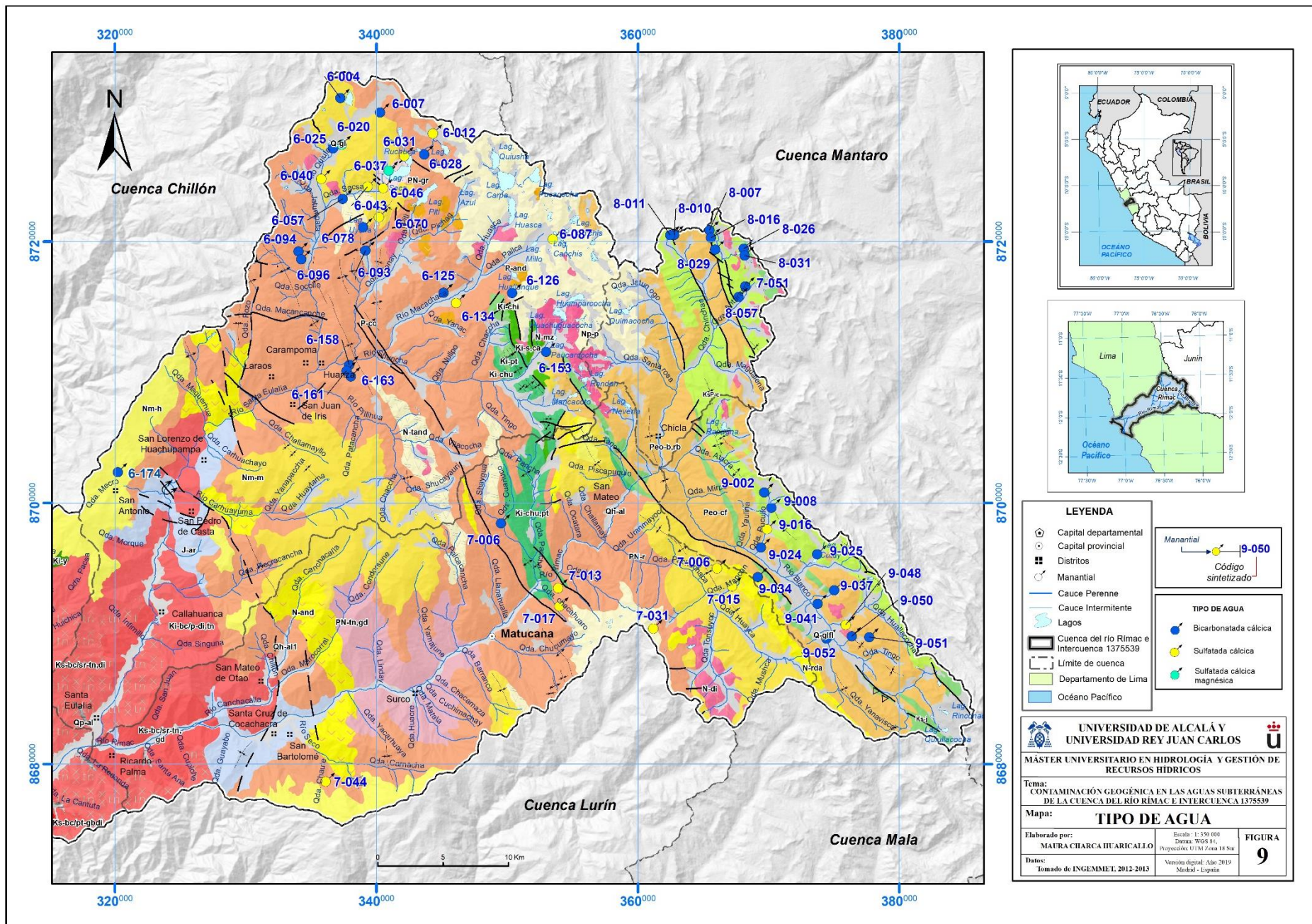


Figura 9. Distribución espacial de los tipos de agua que se presentaron en el área de estudio.

De acuerdo al diagrama Scatter (Figura 10) se usó la relación $\text{Na}^+ + \text{K}^+ \text{ vs } \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$ propuesta por Mifflin (1988) para determinar el sistema de flujo en base a la composición química. Se observa que las concentraciones de los aniones no superan los 10 meq/L, y las concentraciones de los cationes es inferior a 1 meq/L, por ello se podría decir que son aguas de flujo local de poco recorrido, la evolución de estos flujos con relación al tiempo de circulación es corta y de poca profundidad. Mostrando áreas de drenaje de rocas relativamente menos permeables (Bouamama, 2000), que se forman a partir de la recarga de agua y disolución de los minerales de silicatos a lo largo de la trayectoria del flujo.

A partir del cálculo de Índice de Maduración (MI) los valores para este grupo de muestras están entre 0,001 a 0,030 indicando tiempos de residencia cortos.

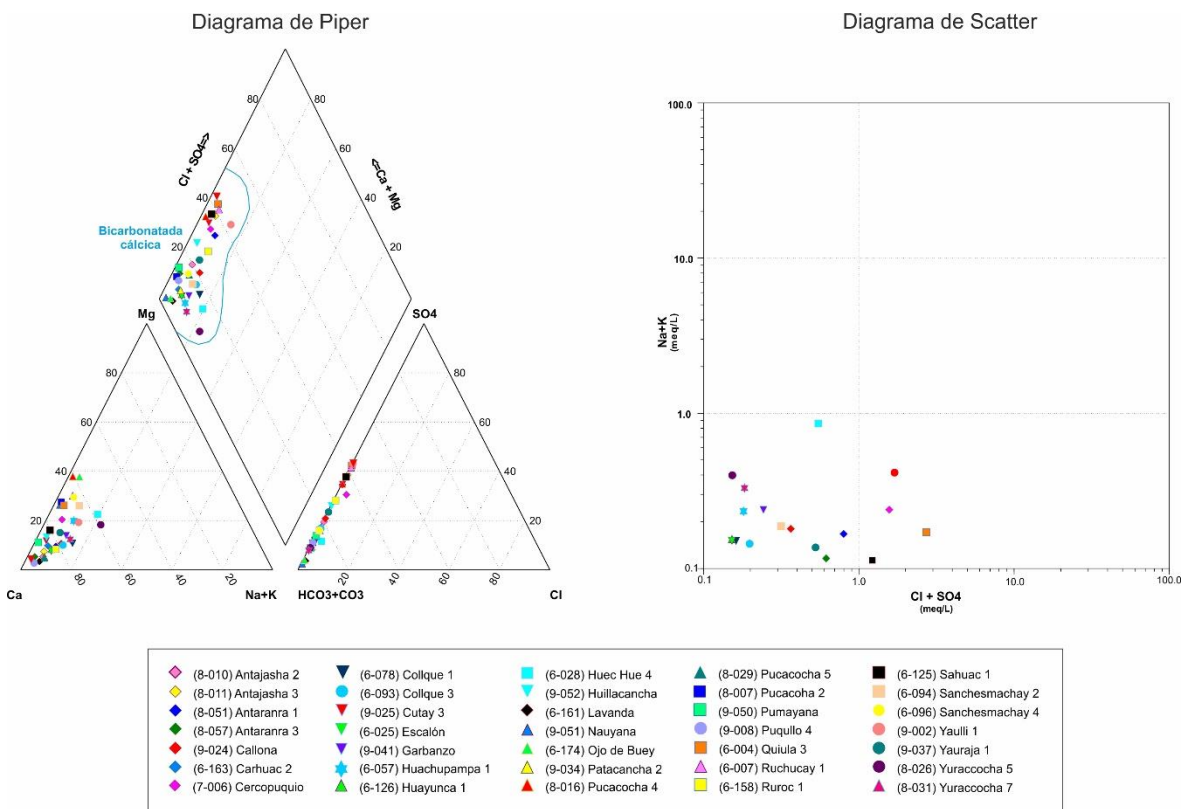


Figura 10. Diagrama de Piper y Scatter del tipo de agua bicarbonatada cálcica.

Al establecer la relación iónica entre el HCO_3^- y Cl^- , se presentan valores inferiores a 0,06 lo cual identifica a aguas continentales, pues el índice para aguas continentales debe estar ente 0,1 a 5; en la figura 11 se muestra que los bicarbonatos tienen predominancia sobre ion cloruro, demostrando que existe una

relación litológica con rocas volcánicas presentes en la cuenca, pues estas presentan HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe tot .

La relación de estroncio y calcio (Sr/Ca) se pueden usar para identificar el grado de interacción de los flujos de agua con la roca. El estroncio puede reemplazar el calcio y el magnesio en los minerales de carbonato, por lo que debería aumentar a medida que los minerales de carbonato se disuelven (Hershey et al., 2010). El agua subterránea que ha experimentado muy poca interacción agua-roca tendrá una relación Sr/Ca menos de 0,02; para el grupo de estas muestras, se tiene un grupo de 33 manantiales que presentan valores de 0,001 a 0,019, y otro grupo de 3 manantiales que muestran valores de 0,031 a 0,038 que indican una interacción limitada entre agua y roca o que las aguas subterráneas no se saturaron completamente con calcio.

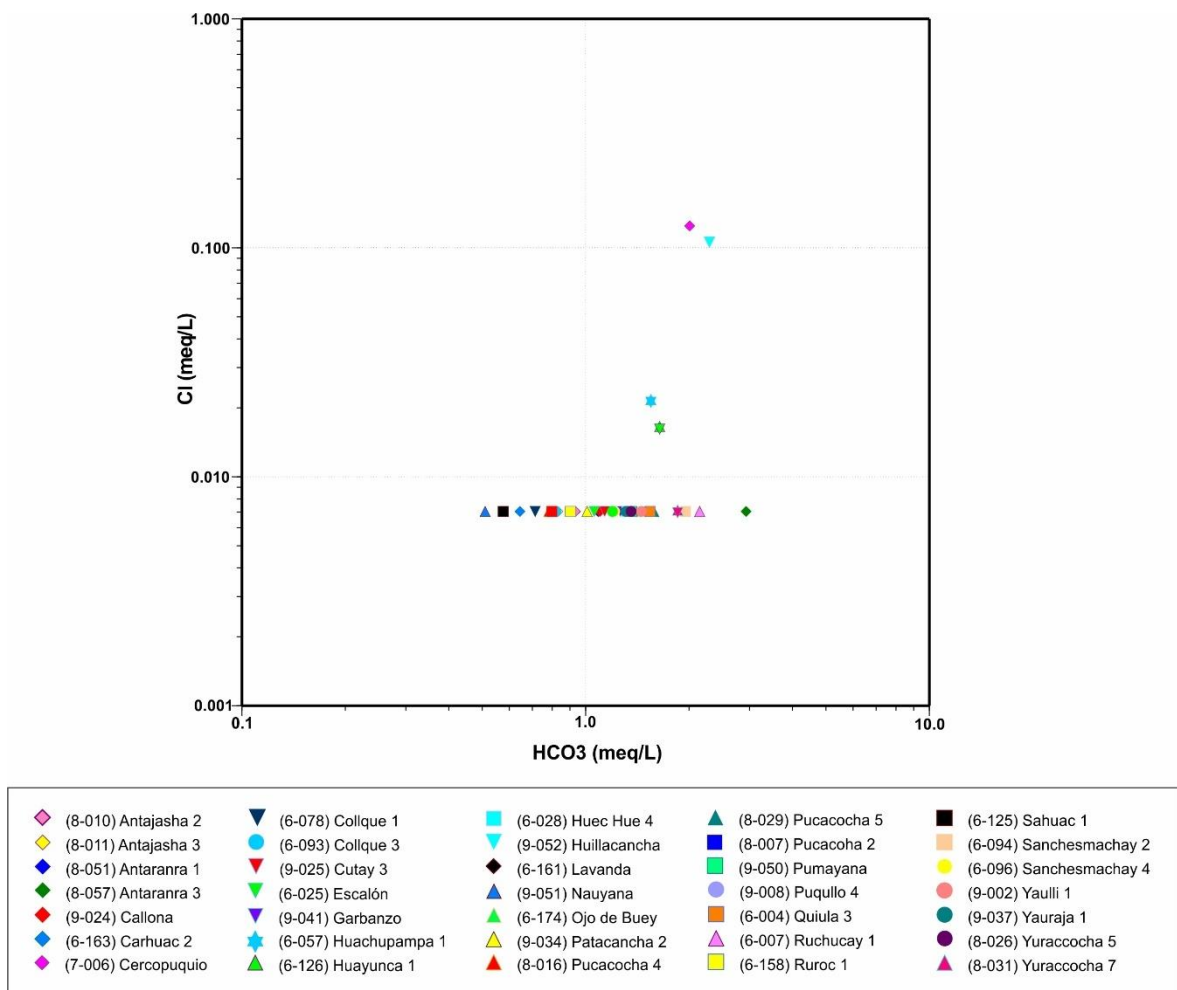


Figura 11. Concentración de cloruro versus bicarbonatos en las muestras de agua subterránea.

El grupo del tipo sulfatada cálcica agrupa a 16 manantiales, como puede observarse en diagrama de Piper (Figura 12) estas fuentes se ubican sobre los 2533 m.s.n.m. y 4885 m.s.n.m. afloran en superficie en contacto con las Formaciones Millotingo, Colqui, Pacococha y los depósitos cuaternarios.

El pH de este grupo varía entre 4,28 a 8,65, presentando a la fuente Corral Amarillo 1 (6-031) con un valor bajo de pH igual a 4,28 con una tendencia corrosiva para los metales y en combinación con otros factores aceleran notablemente su corrosión (Viatcheslav V., 2016). La CE esta entre 75,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 954,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ valores que si son comparados con el valor de CE que es de 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ expuesto en el ECA de agua para la categoría A clase 2 de Perú estarían por debajo del límite.

Las concentraciones de SO_4^{2-} están entre 18,63 mg/L a 184,0 mg/L. Este ion aumenta a medida que disminuye la cota en algunos manantiales. El Ca^{2+} se presenta en el rango de 8,84 mg/L a 80,90 mg/L, debido a las plagioclasas presentes en las andesitas del acuífero volcánico sedimentario de la cuenca. De acuerdo con Toth (1963,1970), las aguas asociadas a flujos de mayor recorrido y profundidad adquieren progresivamente CE y temperatura más elevadas y sus facies se van modificando desde bicarbonatadas a sulfatadas, y finalmente a cloruradas. La relación $\text{Cl}/\text{SO}_4^{2-}$ aumenta con la CE lo que indicaría una evolución hidrogeoquímica.

Respecto al diagrama Scatter (Figura 12), se aprecia que los componentes aniónicos no superan los 10 meq/L y los cationes tampoco superan 1 meq/L. Se puede decir que son aguas de flujo local de poco tiempo de tránsito en contacto con rocas volcánicas sedimentarias antiguas. Con respecto a su MI el valor se encuentra entre 0,0001 a 0,012 indicando tiempos de residencia corta, asociado a zonas de descarga.

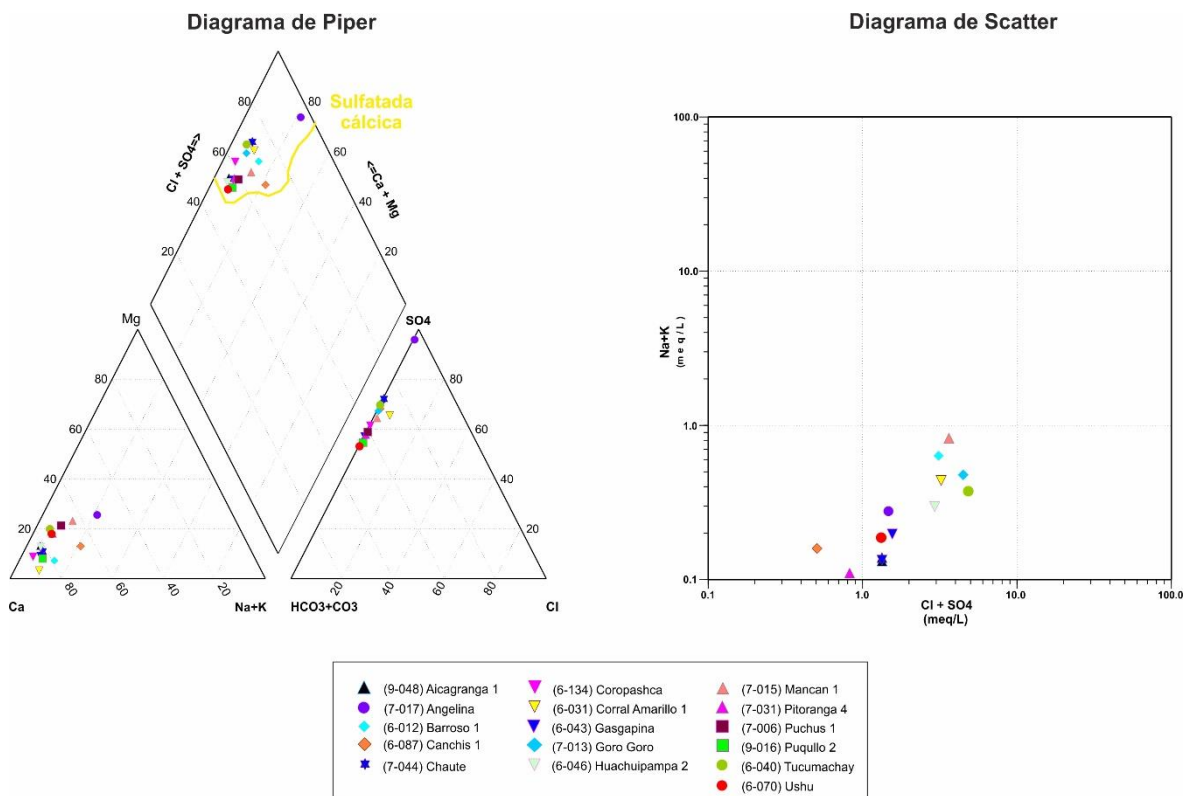


Figura 12. Diagrama de Piper y Scatter para aguas del tipo sulfatada cálcica.

El grupo del tipo sulfatada cálcica magnésica según el diagrama de Piper (Figura 13) agrupa a 2 fuentes Huancatahui (6-020) y Sacsá 2 (6-037), que afloran sobre los 4435 m.s.n.m en contacto litológico entre los depósitos glaciares y la Formación Millotingo.

Este grupo presenta valores de pH de 3.42 y 3.86 aguas con tendencia ácida, CE de 405,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 255,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Estas fuentes muestran un enriquecimiento en el ion sulfato, parecen estar controladas por la existencia de las andesitas, brechas y lavas porfíricas de la Formación Millotingo poco permeable.

El índice de madurez calculado es bajo siendo de 0,003 y 0,005, lo que indica que se trata de agua menos madura, con reducidas fases de disolución-precipitación.

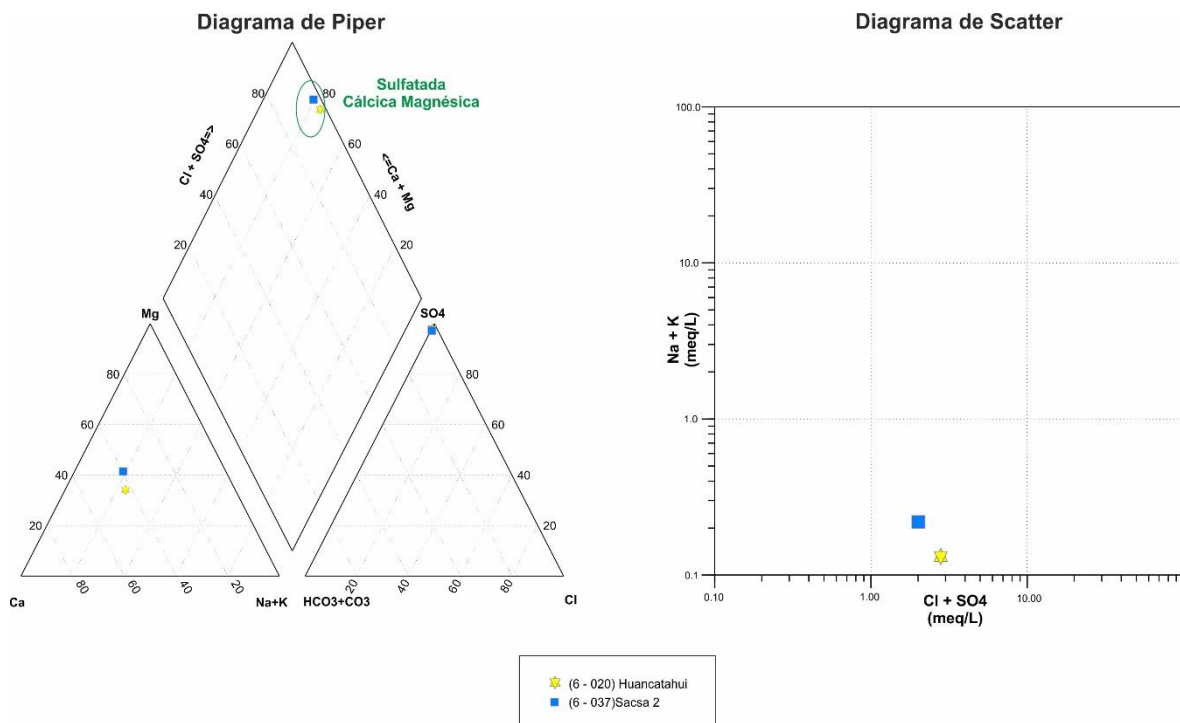


Figura 13. Diagrama de Piper y Scatter para aguas del tipo sulfatada cálcica magnésica.

Durante la meteorización y la circulación del agua en rocas y suelos, los iones se filtran y se disuelven en el agua subterránea. Las formaciones geológicas, la interacción agua-roca y la movilidad de los iones son factores primordiales que influyen en la geoquímica de las aguas subterráneas. En la figura 14 TDS versus $Cl/(Cl+HCO_3^-)$ son usados para identificar los procesos de interacción agua-roca; del gráfico se observa que la mayor parte de los manantiales se sitúan en la región de dominio de la roca, lo que indica la intemperización química inducida por la precipitación junto con la disolución de minerales formadores de roca que han contribuido en la modificación de la química del agua subterránea.

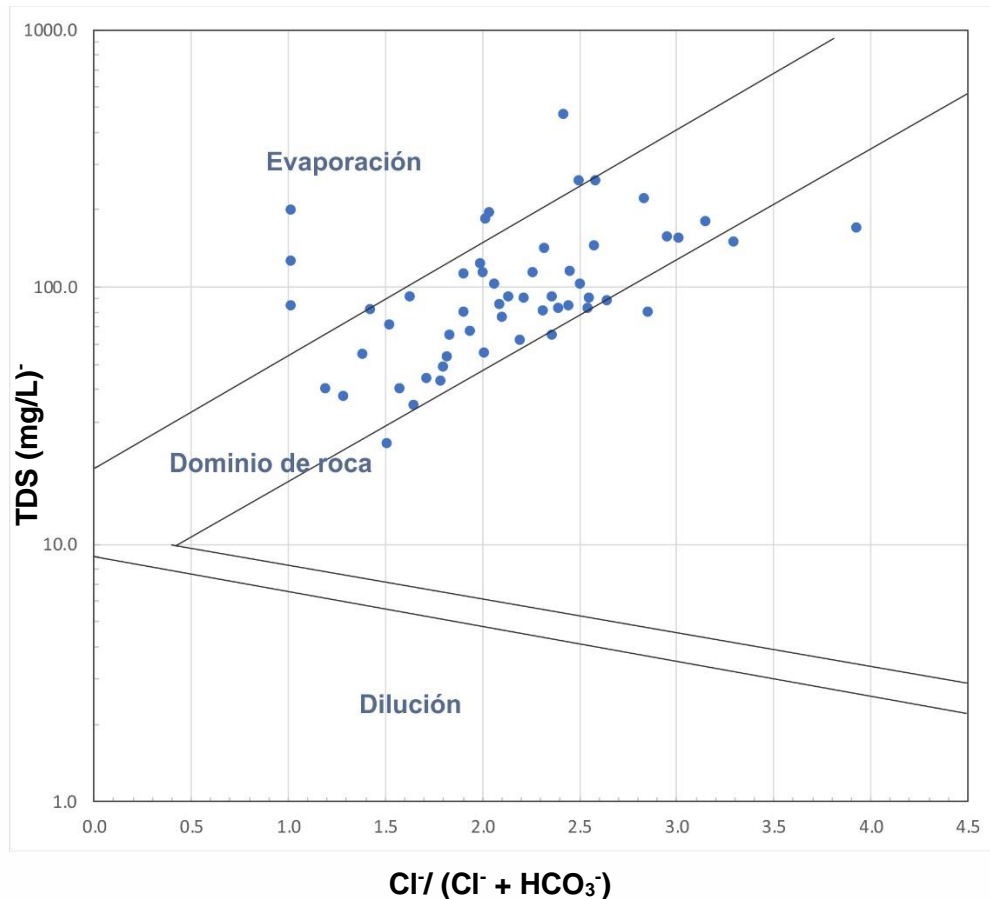


Figura 14. Diagrama de Gibbs donde se identifican procesos de Interacción agua roca para el área de estudio, basado en el artículo de Sandoval I. et al, 2016.

6.3. Elementos traza

Dentro de los elementos traza que se ha detectado concentraciones está el Arsénico, el cual está presente en los 54 manantiales en el rango de 0,011 mg/L a 0,103 mg/L, con un valor promedio de 0,037 mg/L; si este valor se compara con lo establecido por la OMS cuyo límite es de 0,01 mg/L para agua de bebida, este límite se estaría excediendo.

Un contaminante es definido según el EPA como alguna sustancia o materia física, química, biológica o radiológica que tiene un efecto adverso sobre el aire, agua o suelo.

La concentración de ciertas sustancias tóxicas u otras más allá de los límites aceptables para el consumo humano puede tener lugar debido a la disolución de

los materiales del acuífero. El aumento de la concentración de fluoruro, arsénico, hierro y otros metales pesados en el agua subterránea generalmente se debe a este tipo de contaminación (Singhal y Gupta, 2010). La calidad natural de agua de bebida depende primordialmente de la geología y suelos de la cuenca, otros factores tales como uso de la tierra y disposición de contaminantes son también importantes.

En promedio las rocas de origen ígneo, volcánico en especial las cenizas, contienen alto As excepcionalmente y son a menudo la causa de las aguas con alto As, pero en promedio, los vidrios volcánicos incorporan aproximadamente 6mg/Kg de As (Smedley et al. 2002).

La cantidad de un elemento traza que es absorbido por los sedimentos del acuífero o disueltos en el agua subterránea depende de la cantidad de óxidos de metal y de carbón orgánico disuelto presente. Además, a pH casi neutro (pH alrededor de 7) y bajo condiciones óxicas, los recubrimientos de óxido metálico (tales como óxido de hierro) son estables, pero bajo condiciones anóxicas (al mismo pH), estos sedimentos pueden disolverse, liberándose en el agua subterránea elementos traza absorbidos a ellos (Warner y Ayotte, 2014). Este proceso se hace visible en la figura 15, a pH alto las concentraciones de Arsénico presentan una distribución variable en el agua subterránea de los acuíferos, sin embargo, a pH ácido también se tiene concentraciones de As. por encima del límite normado.

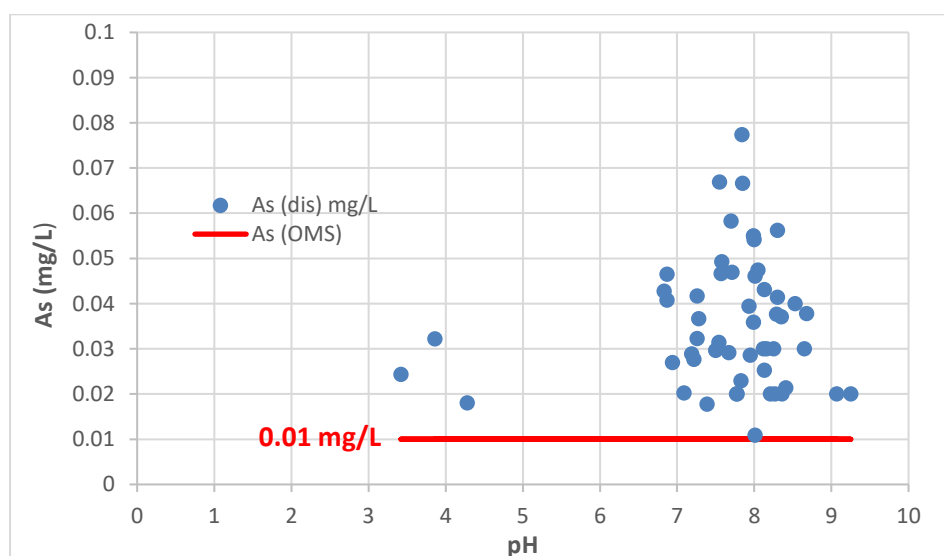


Figura 15. pH versus concentración de arsénico (mg/L), a medida que aumenta el pH las concentraciones de Arsénico se han liberado en las aguas subterráneas, producto del desprendimiento de estos a partir de los sedimentos presentes en la zona de estudio.

En la zona de clima lluvioso semifrío, donde los acuíferos fisurados volcánico-sedimentarios están distribuidos reciben gran cantidad de recarga en forma de precipitación, el agua se mueve a través de los acuíferos superficiales con mayor facilidad, a través de la percolación recargan los acuíferos fisurados volcánico-sedimentarios de la cuenca. Entonces estas aguas más antiguas han tenido más tiempo para interactuar con los sedimentos del acuífero que las aguas subterráneas más jóvenes, y esa interacción provoca cambios en la química de las aguas subterráneas.

Las altas concentraciones de As. en aguas subterráneas es reportado en varios países como Bangladesh, India, China, Argentina, Chile, Mongolia, Taiwán y Estados Unidos. Las personas que consumen agua con altos niveles de arsénico son propensas a desarrollar cáncer de piel, vejiga y pulmones (Singhal y Gupta, 2010).

En la figura 16 se aprecia puntos de tamaño creciente y color distinto de acuerdo a las concentraciones de As, las cuales fueron geoespacialmente representadas. De la figura sobresale la fuente Huayunca 1 (6-126) que aflora a los 4796 m.s.n.m. por contacto litológico entre las formaciones volcánico sedimentaria Rímac y Colqui (Acuífero Fisurado Volcánico Sedimentario) que subyacen a los depósitos cuaternarios (Acuífero Superficial). De acuerdo a los parámetros físico químico se midió una temperatura de 4,1 °C, pH de 7,66 y CE de 208,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$, de acuerdo a su índice de maduración esta fuente refleja un valor de 0,001.

El Arsénico puede ser removido del agua por precipitación química, separación de membranas e intercambio iónico. La separación por membranas es costosa. El uso de arenas recubiertas con óxidos de hierro y filtración de alúmina activada son tecnologías emergentes para remover el arsénico en el agua de bebida (Ramakrishna et al.,2006).

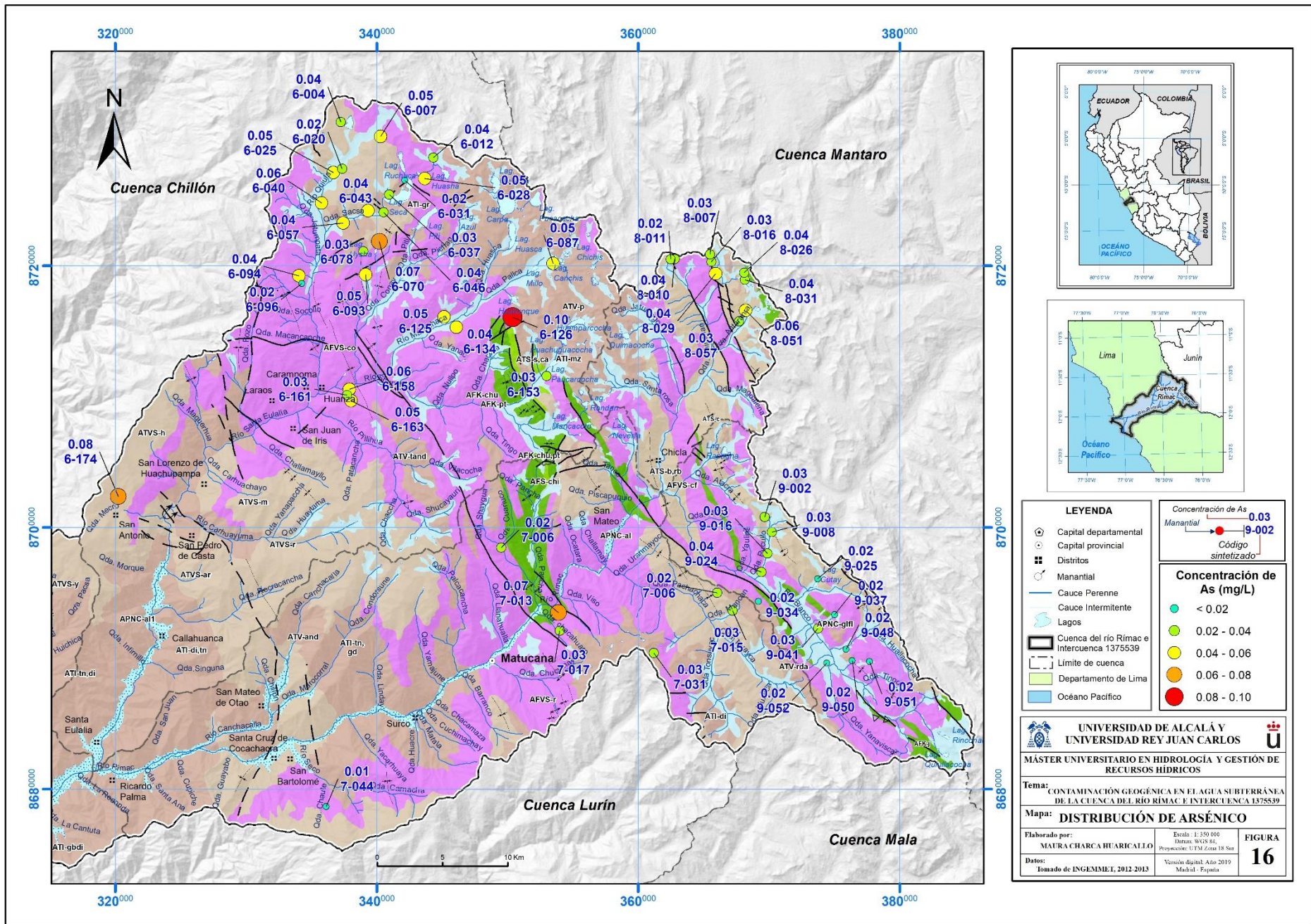


Figura 16. Distribución de la concentración de arsénico (mg/L) en la zona de estudio.

6.4. Evolución de las aguas subterráneas

Modelo hidrogeoquímico conceptual idealizado del área de estudio muestra la disposición de los acuíferos fisurados volcánico sedimentario Colqui y Rímac hacia el Noreste de la cuenca, los mismos que han sido afectados por fallas longitudinales de dirección NO-SE. Estos representan a los principales acuíferos de la zona de estudio.

De acuerdo al esquema (Figura 17), la recarga del agua subterránea de esta parte de la cuenca se produce por infiltración directa de la precipitación a través de los afloramientos de la Formación Pacococha, cuya litología consta de intercalación de tobas de cristales, lavas andesíticas afaníticas y brechas del Neógeno. A partir de ello a cota más baja se da origen por intercepción de la superficie topográfica con la superficie freática al manantial Huayunca 1 (6-126) con el tipo de agua bicarbonatada cálcica y con concentraciones menores a 2 meq/L. El recorrido del agua subterránea según el esquema ha estado en contacto con las rocas volcánicas de la Formación Pacococha y Rímac, por tanto, la disolución de minerales y el proceso de infiltración tendrían una influencia significativa sobre la composición química de la fuente.

Los flujos de agua subterránea se mueven hacia puntos de menor potencial hidráulico, por lo que a cotas más bajas se observa al manantial Coropashca (6-134) del tipo de agua sulfatada cálcica con concentraciones de 2 meq/L, esta fuente está en contacto litológico también con rocas volcánicas y sedimentarias de la Formación Rímac, Formación Jumasha y depósitos glaciares cuaternarios. Este manantial estaría más enriquecido en solutos con más tiempo de residencia en el acuífero, representando a la zona de descarga de acuerdo al esquema.

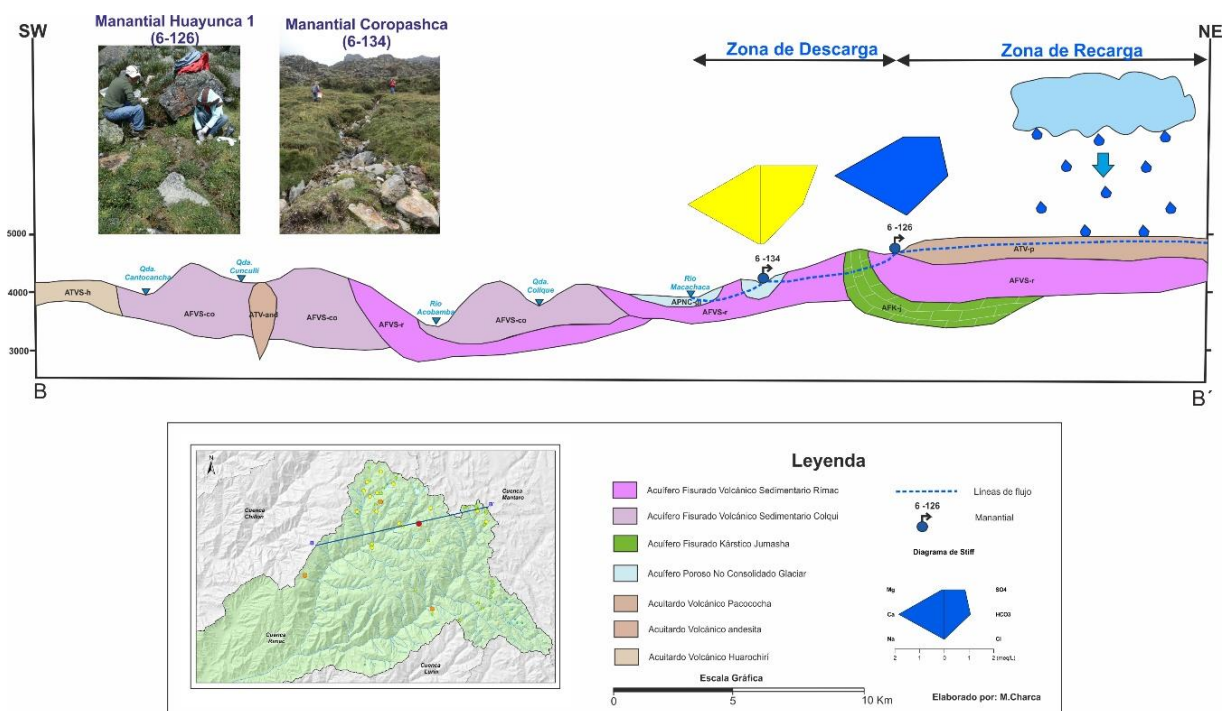


Figura 17. Esquema conceptual hidrogeoquímico idealizado del área de estudio.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

Los 54 manantiales muestreados dentro del área de estudio agrupan 3 tipos de agua: 36 manantiales del tipo bicarbonatada cálcica, 16 manantiales del tipo sulfatada cálcica y 2 manantiales del tipo sulfatada cálcico magnésica.

A partir del análisis de los resultados químicos se ha detectado altas concentraciones de As que están presentes en los 54 manantiales muestreados en el rango de 0,011 – 0,10 mg/L superando el límite de 0.010 mg/L normado por la OMS.

El As presente en las fuentes de agua subterránea de estudio estaría condicionada por la meteorización química inducida por la precipitación junto con la disolución de minerales formadores de las rocas volcánicas presentes en el área de estudio. De acuerdo a la distribución geoespacial, los manantiales se localizan alrededor de las formaciones volcánica sedimentaria Colqui y Rímac del Paleógeno - Neógeno, así como depósitos glaciares del cuaternario, por consecuente sería la fuente natural

de contaminación del agua subterránea.

De los resultados químicos de las aguas subterráneas muestreadas no se han detectado la medida de otros elementos traza en altas concentraciones que puedan afectar el agua desde el punto de vista toxicológico.

7.2. Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos se recomienda una investigación adicional exhaustiva que contemple un plan de monitoreo en una serie de tiempo permanente para tener la certeza de la presencia de As en el tiempo, para luego establecer un tratamiento correctivo.

Realizar un plan de muestreo de los cursos de agua superficial para determinar la concentración de As en cuerpos receptores.

BIBLIOGRAFÍA

- ANA. (2010). *Evaluación de los recursos hídricos en la cuenca del río Rímac: estudio hidrológico y ubicación de la red de estaciones hidrométricas en la cuenca del río Rímac*. Lima: Autoridad Nacional del Agua.
- Bouamama, M. (2000). *Aportación de la hidrogeoquímica al conocimiento de los sistemas hidrogeológicos kársticos del sur de Córdova*. Granada: Universidad de Granada.
- Brassington, R. (2007). *Field Hydrogeology*. England: John Wiley & Sons, Ltd.
- Custodio, E., & Llamas, M. (2001). *Hidrogeología subterránea (Tomo I)*. Barcelona: Ediciones Omega S.A.
- Davidson, P., & Wilson, S. (2011). *Groundwaters of Marlborough*. New Zeland: Peter Hamill.
- Duque Calvache, C. (Julio de 2009). Influencia antrópica sobre la hidrogeología del acuífero Motril-Salobreña. (U. d. Granada, Ed.) Granada, España. Consultado el 19 de Mayo de 2019, de <http://hdl.handle.net/10481/2425>
- Hershey, R., Mizell, S., & Earman, S. (2010). Chemical and physical characteristics of springs discharging from regional flow systems of the carbonate rock province of the Great Basin, western United States. *Hydrogeology Journal*, 1007-1026.
- Hiscok, K. (2005). *Hydrogeology Principles and Practice*. United Kingdom: University of East Anglia.
- INEI. (2015). *Estimaciones y proyecciones de población en base al Censo 2015*. Lima: Instituto Nacional de Estadística e Informática.
- National Research Council. (1999). *Arsenic in drinking water Washington*. D.C.: National Academy.
- Osinergmin. (2014). *Compendio de centrales de generación eléctrica del sistema interconectado nacional*. (S. N. Perú, Editor) Consultado el 13 de Mayo de 2019, de https://issuu.com/osinergmin/docs/compendio_centrales_2014
- Palacios Moncayo, O., Caldas Vidal, J., & Vela Velásquez, C. (1992). *Geología de los cuadrangulos de Lima, Lurín, Chancay y Chosica. Hojas 25-i, 25-j, 24-i, 24-j*. Lima: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.
- Penn State Extension. (2017). <https://extension.psu.edu/iron-and-manganese-in-private-water-systems>. Consultado el 14 de Mayo de 2019 de: <https://extension.psu.edu/>
- Ramakrishna, D., Viraraghavan, T., & Jin, Y. (2006). Iron oxide coated sand for arsenic removal Investigation of coating parameters using factorial design approach. *Prentice Periodical Hazardous, Toxic and Radioactive Waste Management*, 198-206.
- Salazar Díaz, Humberto. (1983). *Geología de los cuadrángulo de Matucana y Huarochirí Hojas 24-k y 25-k*. Lima: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.
- Sandoval Montes, I. d., Ramos Leal, J. A., & Morán Ramírez, J. (2016). El sistema hidrológico Esperanza- Oriental y su impacto sobre el acuífero de Tecamachalco, Puebla, México. *Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 14-25.
- Sedapal. (2016). *Plan Estratégico Institucional 2013 - 2017*. Lima: Servivio de Agua Potable y Alcantarillado.
- Senamhi. (2002). *Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología*. Consultado el 13 de Mayo de 2019 de <https://www.senamhi.gob.pe/?&p=mapa-climatico-del-peru>
- Singhal, B., & Gupta, R. (2010). *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*. New York: Springer.
- Smedley, P., Nicolli, H., MacDonald, D., Barros, A., & Tullio, J. (2002). Hydrochemistry of arsenic and other inorganic constituents in groundwaters from La Pampa, Argentina. *Applied Geochemistry*, 517-568.
- Tóth, J. (1970). A conceptual model of the groundwater regime and the hydrogeologic

environment. *Journal of Hydrology*, 4795-4812.

Viatcheslav V., T. (2016). *Hydrochemistry Fundamentals and advances*. New Jersey: John Wiley & Sons.

Warner, K. L., & Ayotte, J. D. (2014). *Water Quality in the Glacial Aquifer System, Northern United States, 1993-2009*. United States: U.S. Geological Survey.

ANEXO 1

Cuadro resumen de las fuentes de agua subterránea muestreadas en la zona de estudio

N°	Código	Nombre	T (°C)	pH	CE (μS/cm)	Facie Hidroquímica
1	1375549-048	Aicagranga 1	6.8	7.77	226.0	Sulfatada cálcica
2	1375547-017	Angelina	12.7	7.95	446.3	Sulfatada cálcica
3	1375548-010	Antajasha 2	4.0	8.35	166.4	Bicarbonatada cálcica
4	1375548-011	Antajasha 3	3.3	8.41	111.6	Bicarbonatada cálcica
5	1375548-051	Antaranra 1	5.5	8.30	208.9	Bicarbonatada cálcica
6	1375548-057	Antaranra 3	7.8	7.54	166.7	Bicarbonatada cálcica
7	1375546-012	Barroso 1	4.3	7.93	227.9	Sulfatada cálcica
8	1375549-024	Callona	5.6	8.53	83.0	Bicarbonatada cálcica
9	1375546-087	Canchis 1	8.0	8.00	396.7	Sulfatada cálcica
10	1375546-163	Carhuac 2	12.1	7.57	285.7	Bicarbonatada cálcica
11	1375547-006	Cercopuquio	9.3	7.83	173.2	Bicarbonatada cálcica
12	1375547-044	Chaute	17.4	8.01	954.0	Sulfatada cálcica
13	1375546-078	Collque 1	4.8	8.13	69.8	Bicarbonatada cálcica
14	1375546-093	Collque 3	9.2	6.87	315.4	Bicarbonatada cálcica
15	1375546-134	Coropashca	10.6	6.83	250.5	Sulfatada cálcica
16	1375546-031	Corral Amarillo 1	7.6	4.28	170.7	Sulfatada cálcica
17	1375549-025	Cutay 3	9.8	8.21	311.0	Bicarbonatada cálcica
18	1375546-025	Escalón	8.6	8.01	172.2	Bicarbonatada cálcica
19	1375549-041	Garbanzo	8.9	8.12	252.0	Bicarbonatada cálcica
20	1375546-043	Gasgapina	6.1	6.87	81.1	Sulfatada cálcica
21	1375547-013	Goro Goro	15.0	7.85	528.1	Sulfatada cálcica
22	1375546-046	Huachuipampa 2	6.3	7.28	178.5	Sulfatada cálcica
23	1375546-057	Huachupampa 1	12.0	8.13	154.9	Bicarbonatada cálcica
24	1375546-020	Huancatahui	7.8	3.42	405.1	Sulfatada cálcica magnésica
25	1375546-126	Huayunca 1	4.1	7.66	208.2	Bicarbonatada cálcica
26	1375546-028	Huec Hue 4	9.1	7.71	346.3	Bicarbonatada cálcica
27	1375549-052	Huillacancha	9.5	9.07	189.0	Bicarbonatada cálcica
28	1375546-161	Lavanda	12.1	7.22	179.5	Bicarbonatada cálcica
29	1375547-015	Mancan 1	6.2	7.67	110.6	Sulfatada cálcica
30	1375549-051	Nauyana	4.9	8.36	137.0	Bicarbonatada cálcica
31	1375546-174	Ojo de Buey	15.1	7.84	304.8	Bicarbonatada cálcica
32	1375549-034	Patacancha 2	8.5	9.25	184.0	Bicarbonatada cálcica
33	1375547-031	Pitoranga 4	6.6	7.26	75.2	Sulfatada cálcica
34	1375548-016	Pucacocha 4	4.5	7.50	87.0	Bicarbonatada cálcica
35	1375548-029	Pucacocha 5	5.3	8.30	98.4	Bicarbonatada cálcica
36	1375548-007	Pucacocha 2	14.2	7.19	49.0	Bicarbonatada cálcica
37	1375547-006	Puchus 1	7.2	7.09	144.7	Sulfatada cálcica
38	1375549-050	Pumayana	5.0	7.78	161.0	Bicarbonatada cálcica
39	1375549-016	Puqullo 2	8.2	8.65	538.0	Sulfatada cálcica

N°	Código	Nombre	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	Facie Hidroquímica
40	1375549-008	Puqullo 4	3.9	8.16	172.0	Bicarbonatada cálcica
41	1375546-004	Quiula 3	8.1	7.99	136.6	Bicarbonatada cálcica
42	1375546-007	Ruchucay 1	6.1	7.58	130.8	Bicarbonatada cálcica
43	1375546-158	Ruroc 1	13.8	7.70	183.7	Bicarbonatada cálcica
44	1375546-037	Sacsa 2	9.6	3.86	255.8	Sulfatada cálcica magnésica
45	1375546-125	Sahuac 1	6.6	8.05	185.4	Bicarbonatada cálcica
46	1375546-094	Sanchesmachay 2	11.9	7.26	88.3	Bicarbonatada cálcica
47	1375546-096	Sanchesmachay 4	11.1	7.39	108.5	Bicarbonatada cálcica
48	1375546-040	Tucumachay	10.0	7.99	373.9	Sulfatada cálcica
49	1375546-153	Uquiapuquio	8.1	6.94	227.3	Bicarbonatada cálcica
50	1375546-070	Ushu	3.7	7.55	185.1	Sulfatada cálcica
51	1375549-002	Yaulli 1	8.2	8.25	388.0	Bicarbonatada cálcica
52	1375549-037	Yauraja 1	15.5	8.27	144.0	Bicarbonatada cálcica
53	1375548-026	Yuraccocha 5	4.0	8.29	293.9	Bicarbonatada cálcica
54	1375548-031	Yuraccocha 7	8.0	8.68	184.5	Bicarbonatada cálcica