

DOI: 10.24850/j-tyca-2022-04-06

Artículos

Metodología de ponderación morfométrica e hidrogeoquímica para clasificar la susceptibilidad a la meteorización química en las subcuencas del río Caplina, Tacna, Perú

Morphometric and hydrogeochemical weighting methodology to classify susceptibility to chemical weathering in the sub-basins of the Caplina River, Tacna, Peru

Alissa Vera¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0939-6315>

Mahendra P. Verma², ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6559-7184>

Edwin Pino-Vargas³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7432-4364>

German Huayna⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4518-1023>

¹Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú, averam@unjbg.edu.pe



²Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, Cuernavaca, Morelos, México / Universidad Politécnica de Nochixtlán "Abraham Castellanos", Asunción Nochixtlán, Oaxaca, México, mpv55.mx1@gmail.com

³Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú, epinov@unjbg.edu.pe

⁴Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú, ghuaynaf@unjbg.edu.pe

Autora para correspondencia: Alissa Vera, averam@unjbg.edu.pe

Resumen

Se formula una metodología de ponderación heurística para clasificar la susceptibilidad a la meteorización química en la cuenca del Caplina desde dos enfoques: hidrogeoquímico y geológico morfométrico. El objetivo principal fue estudiar la recarga hidrológica de una cuenca árida con meteorización química diferencial de formaciones geológicas en contacto debido a la salinización del flujo de agua.

Los parámetros en el enfoque morfométrico se analizaron en dos índices propuestos: (1) recarga histórica, a partir de los parámetros de forma y curva hipsométrica; (2) velocidad de escurrimiento en pendientes



bajas (3-12 %), con densidad de drenaje $< 0.8 \text{ km}^{-1}$. Según su morfometría, las subcuencas Caplina y Magollo son más susceptibles a la meteorización química en la cuenca Caplina. Se interrelacionó la geoquímica (litología, minerales alterables y presencia de alteración hidrotermal) e hidrogeología (porosidad y permeabilidad).

Para la validación de la metodología se utilizó el inventario de muestras hidroquímicas del Servicio Geológico Peruano (Ingemmet) y la clasificación resultante de ponderaciones determinó 80 % de fuentes subterráneas y superficiales en la cuenca están salinizadas predominantemente en unidades hidrogeológicas de alta y media susceptibilidad a la meteorización. El mapa final generado a escala 1:500 000 identifica dichas unidades hidrogeológicas: (1) acuíferos fisurados con alteración hidrotermal en las formaciones Chachacumane, Chulluncane, Huilacollo, Volcánico Barroso, aportando tendencias cálcicas sulfatadas en el 41.2 % del total de muestras; (2) acuitardos intrusivos en las formaciones Yarabamba y Challaviento, que influyen en oxidación de sulfuros en la hidroquímica del 17.6 % de muestras. Asimismo, se identifican los acuitardos de origen volcánico de susceptibilidad media a la meteorización, con un considerable aporte sódico en el 20.6 % de muestras del estudio.

Palabras clave: meteorización química, susceptibilidad, salinización, ponderación, morfometría, hidrogeología e hidrogeoquímica.



Abstract

A heuristic weighting methodology is formulated to classify the susceptibility to chemical weathering in the Caplina basin from two approaches: hydrogeochemical and geological morphometric. The main objective was to study the hydrological recharge of an arid basin with differential chemical weathering of geological formations in contact due to the salinization of water flow.

The parameters in the morphometric approach were analyzed in two proposed indices: (1) historical reload, from the parameters of shape and hypsometric curve; (2) runoff speed with low slopes (3-12 %), drainage density $< 0.8 \text{ km}^{-1}$. According to their morphometry, the Caplina and Magollo sub-basins are more susceptible to chemical weathering in the Caplina basin.

For the validation of the methodology, the inventory of hydrochemical samples of the Peruvian Geological Service (Ingemmet) was used. The resulting classification of weights determined about 80 % of underground and surface sources in the basin are predominantly salinized in hydrogeological units of high and medium susceptibility to weathering. The final map generated at a scale of 1:500 000 identifies two hydrogeological units with high susceptibility to weathering: (1) fissured aquifers with



hydrothermal alteration, in the Chachacumane, Chulluncane, Huilacollo, Volcánico Barroso formations, contributing calcium sulfate trends in 41.2 % of the total samples; (2) intrusive aquitards, in the Yarabamba and Challaviento formations, which influence the oxidation of sulfides in the hydrochemistry of 17.6 % of the samples. Likewise, aquitards of the volcanic origin of medium susceptibility to weathering are identified, with a considerable sodium contribution in 20.6 % of the study samples.

Keywords: Chemical weathering, susceptibility, salinization, weightings, morphometry, hydrogeology, and hydrogeochemistry.

Recibido: 26/10/2020

Aceptado: 09/06/2021

Introducción



El estado actual de conocimiento lleva a interrelacionar la topografía y el drenaje de los ríos, junto con la textura mineralógica y geoquímica sobre el transporte de sedimentos, que experimentan meteorización en cuencas variable a las condiciones climáticas (Kanhaiya, Singh, Singh, Mittal, & Srivastava, 2019). El balance de masa basado en el cálculo de cationes por Li, Han, Liu, Yang y Liu (2019) demuestra que la meteorización por silicatos, carbonatos, aportes atmosféricos y factores antrópicos contribuyen a la carga disuelta en el agua de los ríos. Este incremento natural es atribuible también al transporte a través de litologías de particular composición mineralógica, temperatura del medio geológico, tiempo de contacto y longitud de recorrido (Custodio & Llamas, 1983; Molina, 2005). Asimismo, el proceso de mezcla del agua subterránea, agua meteórica y glaciar deja huellas de la variación estacional en la hidroquímica de las cuencas (Ansari, Ahmad, & Khan, 2019).

La cuenca Caplina corresponde a una unidad hidrográfica de la vertiente del Pacífico al sur del Perú. El proceso de salinización en el agua superficial y subterránea de la cuenca expone un exceso de elementos químicos pesados como As, Hg, Pb en su cauce principal (Pino *et al.*, 2017; ANA, 2011). La contaminación geogénica se genera por emanaciones hidrotermales en el NE de la cuenca identificada como zona de recarga. (Pino *et al.*, 2017; Pino, Montalván, Vera, & Ramos, 2019a).



En la Figura 1 se observa la ubicación de la cuenca en la cabecera del desierto de Atacama, al extremo sur de Perú y norte de Chile. Esta región tiene clima hiperárido y su hiperaridez se atribuye a su ubicación subtropical (Pino, Ramos, Mejía, Chávarri, & Ascencios, 2020; Pino *et al.*, 2019a; Pino *et al.*, 2019b; Pino, 2019; Pino, Chávarri, & Ramos, 2018; Pino *et al.*, 2017; Garreaud, Molina, & Farias, 2010; Garreaud, Vuille, & Clement, 2003) y, por tanto, lenta recarga hidrológica (Foster, Tuinhof, Kemper, Garduno, & Nanni, 2003; Narvaez-Montoya *et al.*, 2022). La baja velocidad de flujo predispone las reacciones químicas en el contacto agua-roca e induce a una baja erosión de sedimentos. Convirtiéndose el contacto agua-roca en el principal agente salinizante; por lo tanto, la erosión de sedimentos no será tomada en cuenta en el presente caso de estudio.

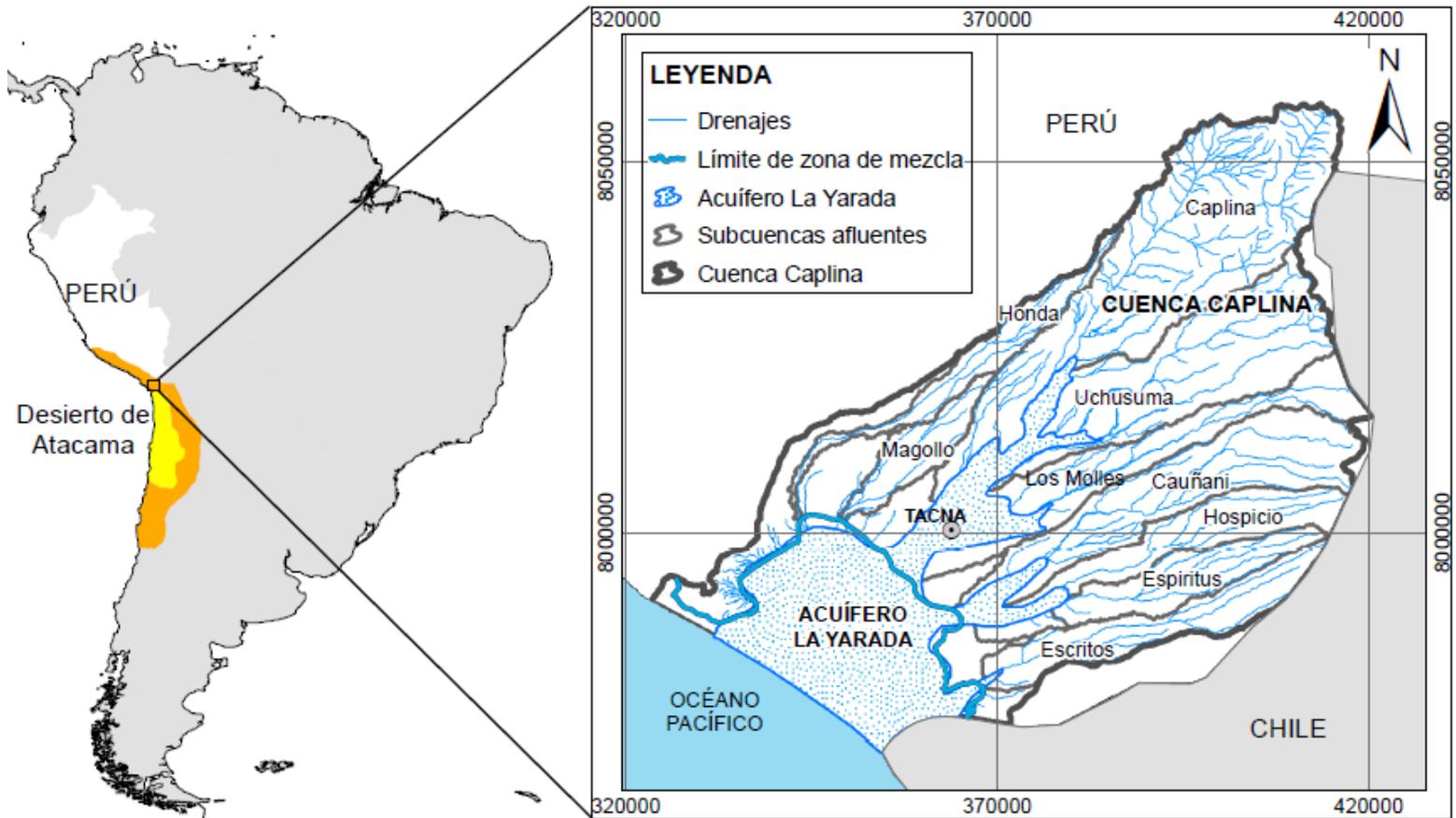


Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Caplina en el desierto de Atacama y su división en nueve subcuencas.

La contaminación geogénica y el clima árido están asociados con la salinización natural en las subcuencas del río Caplina. El presente estudio tiene como objetivo formular una metodología heurística para clasificar la

susceptibilidad a la meteorización química en la cuenca Caplina desde dos enfoques: morfométrico e hidrogeoquímico.

El método heurístico pondera variables para estimar vulnerabilidad y susceptibilidad aplicado en la cuantificación del peligro de erosión del suelo propuesta por Rajbanshi y Bhattacharya (2020), y Adhami y Hamidreza (2016), con priorización espacial de las subcuencas; también Manfreda *et al.* (2014) ponderaron tres enfoques geomórficos para la identificación de áreas propensas a inundaciones; y se tiene la evaluación de susceptibilidad por movimientos en masa (Secretaría de Gestión de Riesgos, 2015). En este estudio, el mecanismo de ponderación se fundamenta en el análisis morfométrico, hidrogeológico e hidrogeoquímico frente al proceso de salinización del flujo por meteorización química en la cuenca Caplina.

Materiales y métodos



Adhami y Hamidreza (2016) determinaron cinco factores independientes en el rendimiento de sedimentos: fisiográfico, geológico, climático, uso de la tierra e hidrológico. Pacheco y Van der Weijden (Pacheco & Van der Weijden, 2012; Pacheco & Van der Weijden, 2014) propusieron un algoritmo de meteorización que integra datos topográficos, hidrológicos, estructura rocosa y químicos para calcular las tasas de meteorización a escala de cuenca.

Considerando los factores anteriores, los enfoques de ponderación de la cuenca del Caplina fueron morfométrico y geológico. Bransford y Stein (1987) propusieron un método heurístico morfométrico, y describieron reglas empíricas para evaluar los efectos de una actividad.

Caracterización hidrológica

La recarga por precipitaciones en la cuenca Caplina es escasa hace varias décadas (Motta-Zamulloo, 1990). El clima árido en una cuenca hidrográfica



se relaciona con un régimen lento de recarga (Foster *et al.*, 2003), por lo que es imprescindible estudiar la precipitación y su relación con la morfometría de las subcuencas como un producto de la recarga a largo plazo. La precipitación media anual en la región es relativamente baja. En tal sentido, se elaboró un mapa de isoyetas de la cuenca Caplina con data del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (Senamhi), interpolando 25 estaciones meteorológicas de la región sur.

Adicionalmente, se seleccionaron seis estaciones representativas dentro de la cuenca y por medio de histogramas se grafica la variabilidad de la precipitación media mensual.

Asimismo, Zomlot, Verbeiren, Huysmans y Batelaan (2015) postularon las condiciones de recarga y variación de flujo superficial influenciadas por la topografía, pendiente, área de drenaje, precipitación, temperatura, evapotranspiración, porcentaje de arena en el suelo y el tipo de uso de la tierra. Los parámetros morfométricos se calcularon mediante índices de recarga e índices de caudal para caracterizar la hidrología de las subcuencas.

Caracterización y análisis morfométrico



Strahler (1957) propuso el análisis morfométrico como complementario al análisis de precipitación para predecir el efecto de la geometría de la cuenca en los procesos físicos complejos y el comportamiento hidrológico durante los periodos de sequía. La morfometría de una cuenca organiza espacialmente los depósitos que controlan la duración del anegamiento (Mourier, Walter, & Merot, 2008). Durante el flujo, el agua produce meteorización física (erosión) y química (hidratación, hidrólisis, reducción de óxidos), provocando la disolución de las rocas (Pino *et al.*, 2017; Catalan, 1981).

Para el análisis morfométrico sectorizado, la cuenca del Caplina se dividió en nueve subcuencas tributarias: Honda, Magollo, Caplina, Uchusuma, Los Molles, Cauñani, Hospicio, Espíritus y Escritos (Figura 1); utilizando el modelo de elevación digital (DEM) con una resolución de 12.5 m por píxel (Shuttle Radar Topography Mission, NASA).

Los parámetros morfométricos se agruparon en clases, con pesos de 0 a 7. El valor 0 indica la menor incidencia, mientras que el valor 7 representa la mayor incidencia de recarga o contacto agua-roca.

Índices morfométricos de recarga

Para la determinación de los índices de recarga se seleccionaron los parámetros morfométricos que permiten identificar las áreas drenadas con mayor recarga en una cuenca, esto proporciona una evidencia de su magnitud reflejado en la forma de la cuenca y en los miles de años en los que se dieron estos procesos.

El **coeficiente de compacidad (K_c)** relaciona el perímetro (P) de la cuenca con el de un círculo teórico de área (A) equivalente a la cuenca (Gravelius, 1914):

$$K_c = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Según Gaspari *et al.* (2012), K_c está estrechamente relacionado con los tiempos de concentración y clasifica la forma de la cuenca (Tabla 1).



Tabla 1. Ponderación por clasificación de coeficiente de compacidad (Gaspari et al., 2012; Ortiz, 2004).

Clasificación de forma	K_c	Peso
Casi redonda a oval-redonda	1-1.25	4
Oval redonda a oval- alargada	1.25-1.5	3
Oval alargada a rectangular oblonga	1.5-1.75	2
Rectangular	1.75-2.25	1
	> 2.25	0

La compacidad está directamente relacionada con la ocurrencia de crecidas. Una cuenca alargada tendrá menor probabilidad de generar crecientes que un área compacta con un factor de forma mayor (Henao, 1988).

La relación de elongación (Re) es la relación entre el diámetro de un círculo con área igual a la cuenca (d) y la longitud máxima del cauce principal de la cuenca (L_c), propuesta por Schumm (1956):

$$Re = \frac{d}{L_c}$$



Valores inferiores a la unidad implican formas alargadas (Tabla 2); pequeño Re sugiere una forma más alargada de la cuenca (Jardí, 1985).

Tabla 2. Ponderación por clasificación de relación de elongación (Jardí, 1985).

Relación	Re		Forma	Peso
$Lc < d$	< 1	< 0.25	Muy alargada	0
		> 0.25	Alargada	1
$Lc > d$	= 1		Oval	2
$Lc = d$	> 1		Redonda	3

La **curva hipsométrica** representa el área drenada en función de la altitud de la superficie de la cuenca. Según Strahler (1952a), la forma de la curva se asocia con las edades de los ríos. En la Tabla 3 se muestran los valores para la ponderación de ríos según su edad a partir de su clasificación hipsométrica. Tendrán mayor ponderación los cauces de mayor antigüedad, al ser proporcionales al tiempo de recarga histórica.

Tabla 3. Ponderación por edad de los ríos a partir de la forma de su curva Hipsométrica



Edad de los ríos	Peso
Río joven	1
Río maduro	2
Río viejo	3

Índices morfométricos de velocidad de flujo superficial

Estos índices aportan información de la velocidad del escurrimiento superficial (Strahler, 1952b; Camino *et al.*, 2018). Si la velocidad de esorrentía disminuye, el flujo tiene mayor contacto con las litofacies, por lo que se seleccionaron parámetros que describen el comportamiento del flujo superficial y subterráneo.

La **pendiente media (S_c)** influye en el comportamiento del cauce principal. Las cuencas de mayor pendiente tienden a responder con mayor celeridad ante las precipitaciones al aumentar sus caudales (Horton, 1945). Se calcula con la siguiente fórmula, donde $\sum Li$ es la suma de las longitudes



de las curvas de nivel (km); E , la equidistancia entre curvas de desnivel (km), y A es la superficie de la cuenca (km²):

$$S_c = 100 \times \frac{(\sum Li)(E)}{A}$$

A su vez, la pendiente representa la variabilidad de los relieves clasificados por Ortiz (2004). Los relieves montañosos causan transporte rápido de los fragmentos de las rocas por la erosión física (Pino *et al.*, 2017), lo cual provoca un tiempo reducido para la desintegración química completa. Por lo tanto, en la Tabla 4 se ponderan con mayor valor las pendientes que favorezcan la interacción agua-roca.

Tabla 4. Ponderación del relieve según pendiente media y tipo de relieve. Modificado de Ortiz (2004).

Pendiente media (%)	Tipo de relieve	Peso
0-3	Plano	7

3-7	Suave	6
7-12	Medianamente accidentado	5
12-20	Accidentado	4
20-35	Fuertemente accidentado	3
35-50	Muy fuertemente accidentado	2
50-75	Escarpado	1
> 75	Muy escarpado	0

La **densidad de drenaje (Dd)** se establece en función de la longitud total de los cursos de agua en la cuenca (Li) y su área total (A) (Tabla 5):

$$Dd = \frac{\sum Li}{A}$$

Tabla 5. Ponderación de la densidad de drenaje. Modificado de Delgadillo y Páez (2008).

Red de drenaje	Densidad de drenaje (km^{-1})	Peso
----------------	--	------



Baja	< 1	< 0.5	3
		> 0.5	2
Moderada	1-2		1
Alta	> 2		0

Camino *et al.* (2018) señalan que el tiempo de escorrentía es menor para el intercambio iónico entre el flujo y la formación geológica para cuencas con mayor densidad de drenaje.

Caracterización geológica

A mayor tiempo de permanencia del flujo en el suelo, mayor será su salinidad (Sánchez, 2017). Sin embargo, el efecto es relativo, el agua en contacto con cloruro de sodio durante unas horas será más salina que otra



muestra en contacto con el cuarzo durante años; por ello la importancia de la geología del terreno por donde atraviesa el flujo subterráneo.

En el noreste de la cuenca Caplina predominan los controles estructurales de dirección NO-SE, producto de la deformación andina (Monge & Cervantes, 2000); la distribución transversal al drenaje de la cuenca Caplina (NE-SO) posiciona los controles como estructura condicionante para el almacenamiento del agua infiltrada por precipitación. La infiltración es direccionada por el lineamiento Caplina (NE-SO) hacia una zona de mezcla de las subcuencas afluentes (Figura 1), condicionada por el lineamiento Molles-Magollo.

En la caracterización geológica se describen las formaciones que afloran en las subcuencas con mayor tendencia a la meteorización química, su variabilidad litología, hidrogeoquímica e hidrogeológica. En la Tabla 6 y Tabla 7 se ponderan valores con base en la clasificación litológica, propiedades de almacenamiento y factores de medición cualitativa.

Tabla 6. Ponderación de propiedades físicas en el contacto agua-roca, según la clasificación hidrogeológica.

Clasificación hidrogeológica	Porosidad	Permeabilidad	Contacto agua-roca	Peso
------------------------------	-----------	---------------	--------------------	------

Acuitardos	Alta	Baja	Alto	3
Acuíferos	Alta	Alta	Moderado	2
Acuicludos	Alta	Muy baja	Moderado	1
Acuífugos	Muy baja	Muy baja	Bajo	0

Tabla 7. Ponderación de origen y clasificación litológica.

Litología y origen	Peso
Sedimentaria volcánica /calcárea	3
Sedimentaria aluvial	2
Plutónica	1
Metamórfica	0

Caracterización hidrogeológica



En la cuenca Caplina afloran intrusivos que modifican la permeabilidad y el comportamiento hidrogeológico de las formaciones geológicas; estas propiedades se relacionan con el tiempo de contacto agua-roca por la retención del flujo en los poros. Según la capacidad de almacenar agua (propiedad de porosidad) y su permeabilidad, las formaciones geológicas se clasifican en acuíferos, acuitardos, acuicludos y acuífugos (Custodio & Llamas, 1983; García & Fernández, 2009). La ponderación por clasificación hidrogeológica y propiedades físicas se muestra en la Tabla 6.

Caracterización geoquímica

El grado de interacción agua-roca depende de una serie de factores, como las propiedades hidráulicas y patrones locales de flujo, los cuales se ven influenciados por la litología donde atraviesa el agua subterránea, destacando la presencia de minerales alterables y alteración superficial; en la Tabla 7 se muestra la ponderación según su origen litológico y composición geoquímica.



Resultados

Comportamiento hidrológico en la morfometría

Los histogramas de precipitación de seis estaciones meteorológicas en la cuenca Caplina se presentan en orden ascendente de altitud en la Figura 3. Se observa la estación La Yarada, ubicada en el delta de la cuenca, con precipitación acumulada mensual muy baja a nula (pico máximo de 1 mm durante el mes de junio); la estación Calientes, ubicada en la zona media de la cuenca, registra precipitación acumulada de 30 mm/año; las estaciones Palca y Toquela, ubicadas a mayor altitud en la zona de recarga de la cuenca, de precipitación acumulada anual de 65 a 165 mm/año. En la



zona media y alta de la cuenca la precipitación trascendental para la recarga subterránea de la cuenca ocurre los primeros meses del año (Figura 2).

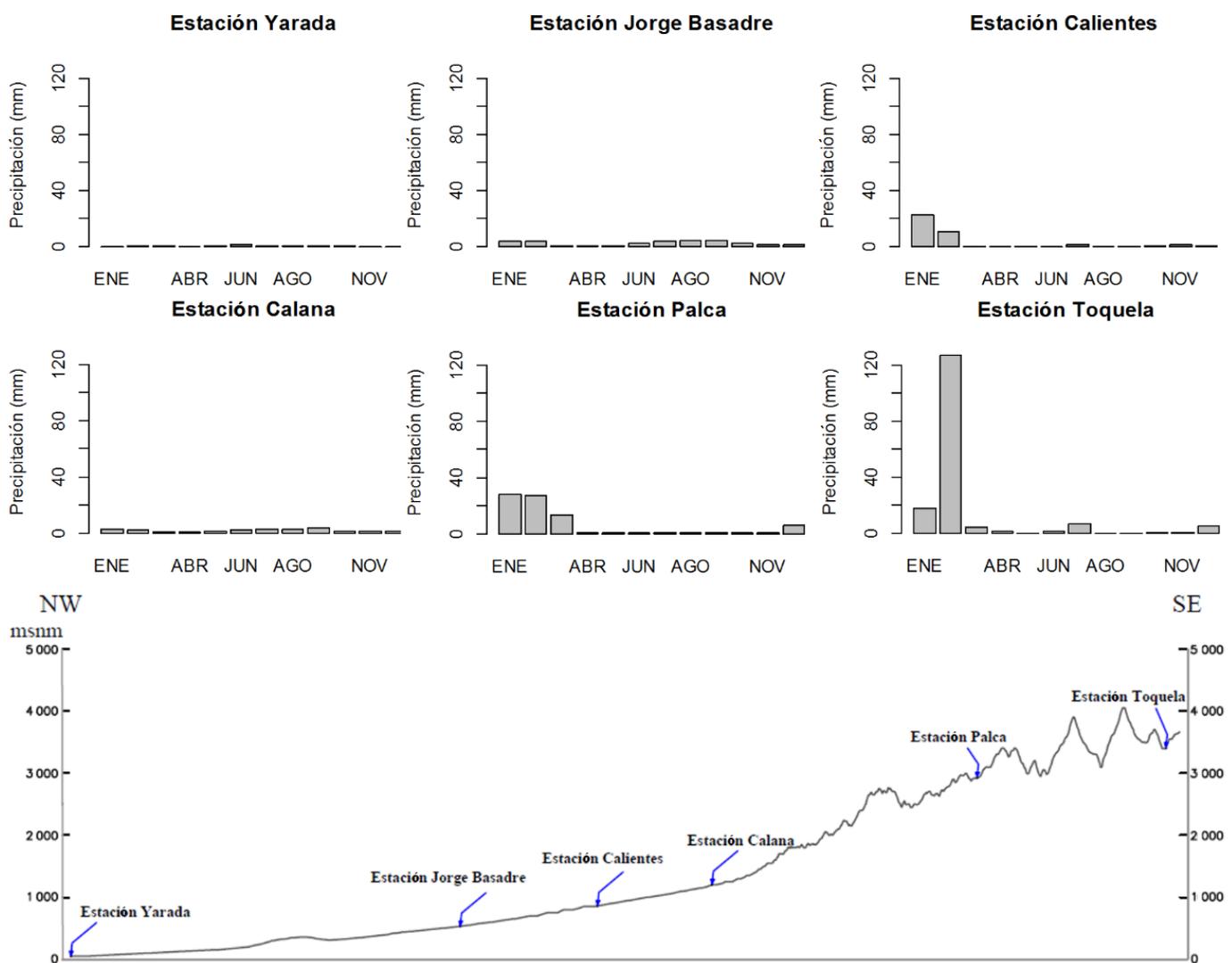


Figura 2. Histogramas de precipitación en las estaciones representativas en la cuenca durante 2019-2020.



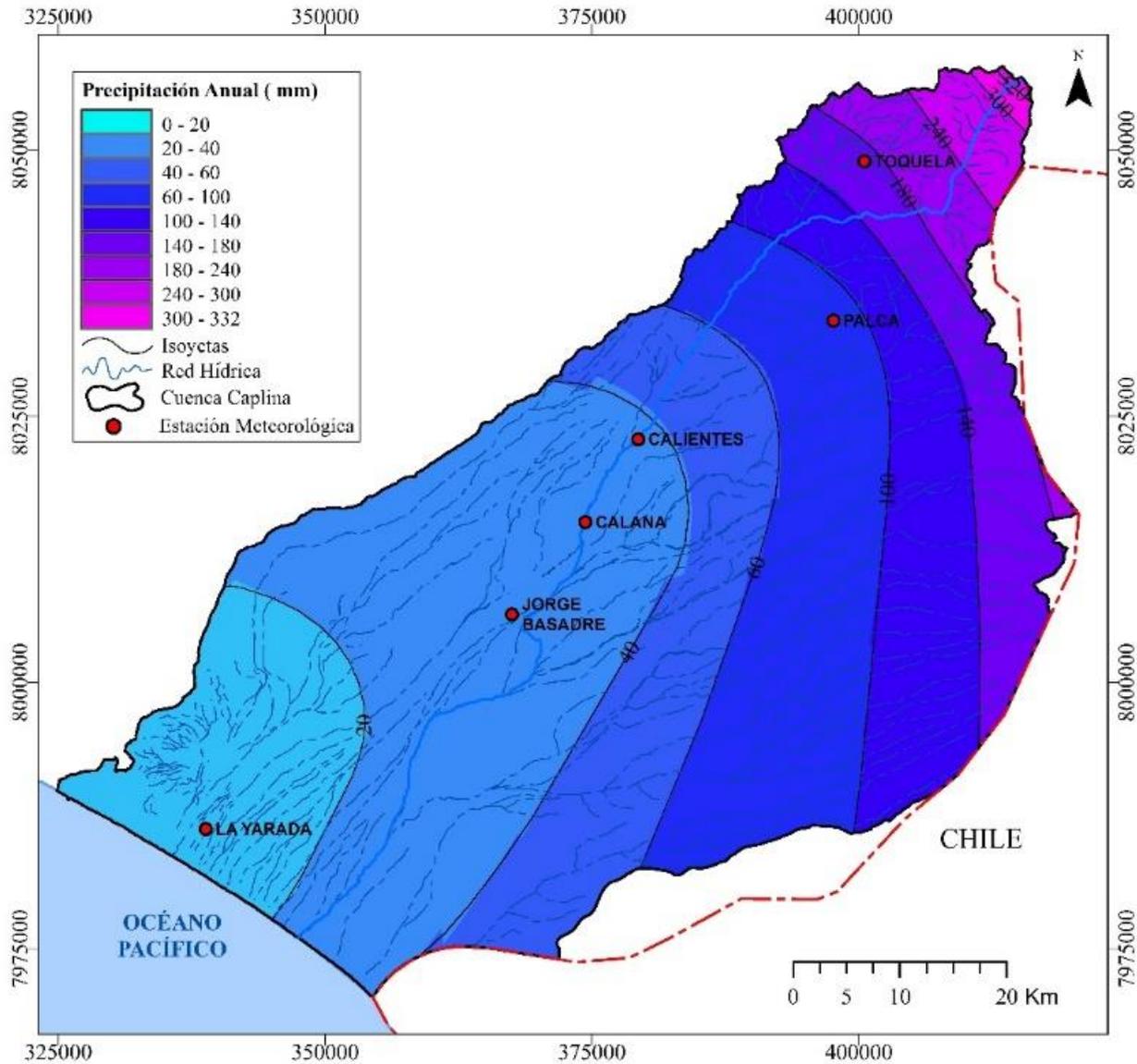


Figura 3. Isoyetas de precipitación en la cuenca Caplina.

En contraste, en el mapa de isoyetas (Figura 3) la precipitación anual varía entre 0 y 330 mm. La distribución de las franjas con mayor recarga es perpendicular a la orientación NE-SO de las subcuencas afluentes a la cuenca Caplina. En ese sentido es importante tener mayor detalle morfométrico por subcuenca.

Recarga por subcuencas

El coeficiente de compacidad en las subcuencas afluentes es superior a 1.75, clasificándose con forma alargada (Gaspari *et al.*, 2012). La relación de elongación es menor a la unidad, lo que corrobora que la forma de las subcuencas es alargada (Jardí, 1985). En este sentido, es conveniente identificar los valores mayores.

La Figura 4 (a,b) muestra las curvas hipsométricas típicas para diferentes tamaños de ríos y la cuenca del Caplina. Strahler (1952a) clasificó el canal principal de la cuenca del Caplina como maduro.



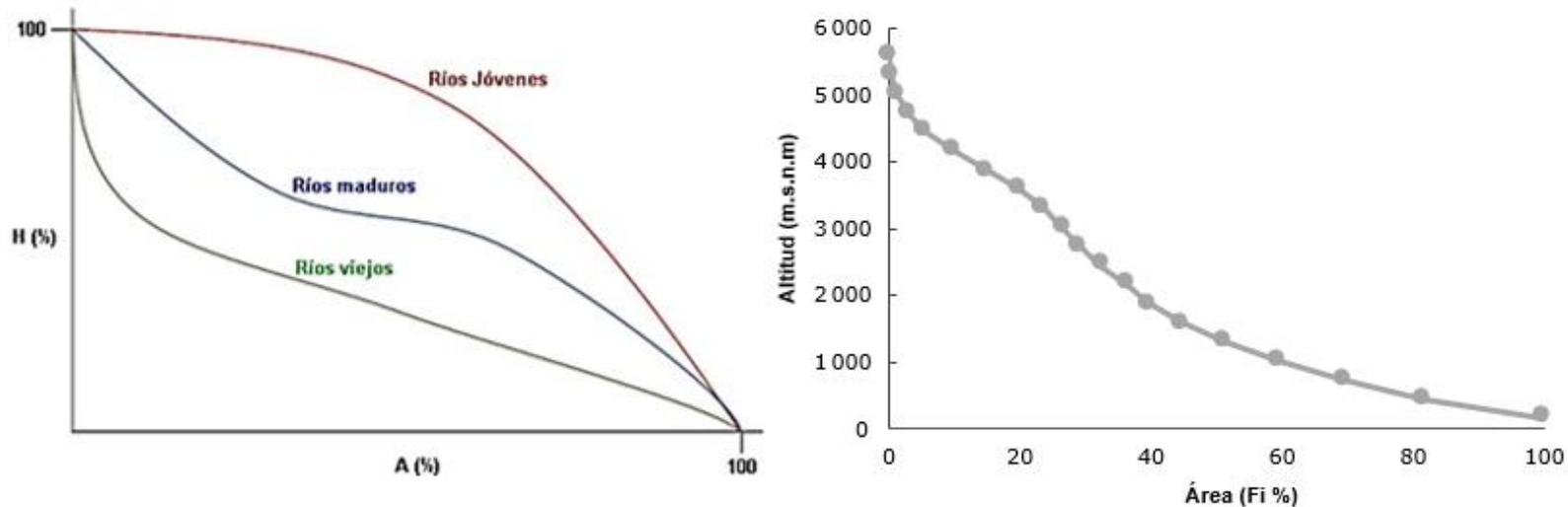


Figura 4. (a) Curva hipsométrica típica (Strahler, 1952a); (b) curva hipsométrica de la cuenca Caplina.

Velocidad de escorrentía y tiempo de contacto

La pendiente de la cuenca presenta tendencia general decreciente en sentido NE-SO. En la parte baja de la cuenca (SO), entre 0 y 1 000 msnm, la pendiente es 3 %, representando un relieve suave; en la parte alta (NE),



entre las cotas 1 200 y 5 400 msnm es 32 %, relieve fuertemente accidentado.

La ponderación de las pendientes se detalla en la Tabla 8, lo que permitió diferenciar los relieves de las subcuencas. Destaca la subcuenca Magollo de relieve suave; las demás subcuencas con mayor velocidad de flujo superficial son accidentadas y fuertemente accidentadas.

Tabla 8. Ponderación de los parámetros morfométricos frente a la meteorización química

	Parámetros morfométricos	Simbología	Unidades	Cuenca caplina	Subcuencas								
					Honda	Magollo	Caplina	Uchusuma	Los Molles	Cañani	Hospicio	Espíritus	Escritos
Índices de recarga (i) Forma de la cuenca	Coefficiente de compacidad por Gravelius (1914)	K_c	-	1.83	3.82	2.17	2.23	2.26	2.61	2.20	2.62	1.99	2.44
	Clasificación de K_c por Gaspari (2012)	K_c	-	Alargada	Alargada	Alargada	Alargada	Alargada	Alargada	Alargada	Alargada	Alargada	Alargada
	Escoger menores (valor: 1)	-	-	-	0	1	1	0	0	1	0	1	0
	Relación de elongación por Schumm (1956)	Re	-	0.70	0.24	0.44	0.39	0.39	0.33	0.40	0.34	0.40	0.34

	Clasificación de Re por Jardí, (1985)	-	-	Alargada	Muy alargada	Alargada	Muy alargada	Muy alargada	Muy alargada	Muy alargada	Muy alargada	Muy alargada	Muy alargada
	Escoger mayores (valor: 1)	-	-	-	0	1	1	1	0	1	0	1	0
(ii). Relieve	Curva hipsométrica (Strahler, 1952a)	-	-	Ríos maduros	Ríos viejos	Ríos maduros	Río maduro	Río maduro	Río joven	Río joven	Río joven	Río maduro	Río maduro
	Ponderar con Tabla 3 (Strahler, 1952a)	-	-	-	3	2	2	2	1	1	1	2	2
Índices de flujo iii). Red de drenaje	Pendiente media (Horton, 1945)	S_c	%	27.02	21.19	10.57	37.78	32.83	27.02	30.39	33.78	37.67	34.80
	Clasificación de S _c por Ortiz (2004)	-	-	Fuertemente accidentado	Fuertemente accidentado	Medianamente accidentado	Muy fuertemente accidentado	Muy fuertemente accidentado	Fuertemente accidentado				
	Ponderar con Tabla 3 (Ortiz, 2004)			3	3	5	2	3	3	3	3	2	2
	Densidad de drenaje (Camino et al., 2018)	D_d	km/ km ²	0.72	0.56	0.61	0.45	0.58	0.42	0.60	0.54	0.56	0.46
	Clasificación de D _d por Delgado y Páez (2008)			Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
	Escoger menores (valor: 1)			-	2	2	3	2	3	2	2	2	3
Ponderación por subcuencas					8	11	9	8	7	8	5	8	7

La densidad de drenaje de la cuenca es 0.72 km^{-1} , lo que representa una respuesta hidrológica lenta. Esta relación varía en las subcuencas afluentes de 0.42 a 0.61 km^{-1} . Las subcuencas Caplina, Los Molles, Espíritus y Escritos presentan menores densidades de drenaje.

De acuerdo con los índices expuestos en la Tabla 8, la ponderación de los parámetros morfométricos sustenta el potencial de las subcuencas en generar meteorización química, por lo que a partir de los resultados de la Tabla 8 se define que el análisis geológico se hará únicamente para las subcuencas Caplina y Magollo, por presentar la mayor puntuación: 9 y 11, respectivamente.

Geología y meteorización en la subcuenca Caplina

En la subcuenca Caplina aflora la mayoría de intrusivos (Figura 5), generando zonas de alteración hidrotermal (Acosta, Alván, Mamani, Oviedo, & Rodríguez, 2010); la meteorización en estas áreas produce disolución de



los elementos químicos pesados que se encuentran en el agua. Además, en algunos manantiales el pH mínimo es 2.30 (Peña, Cotrina, & Acosta, 2009).

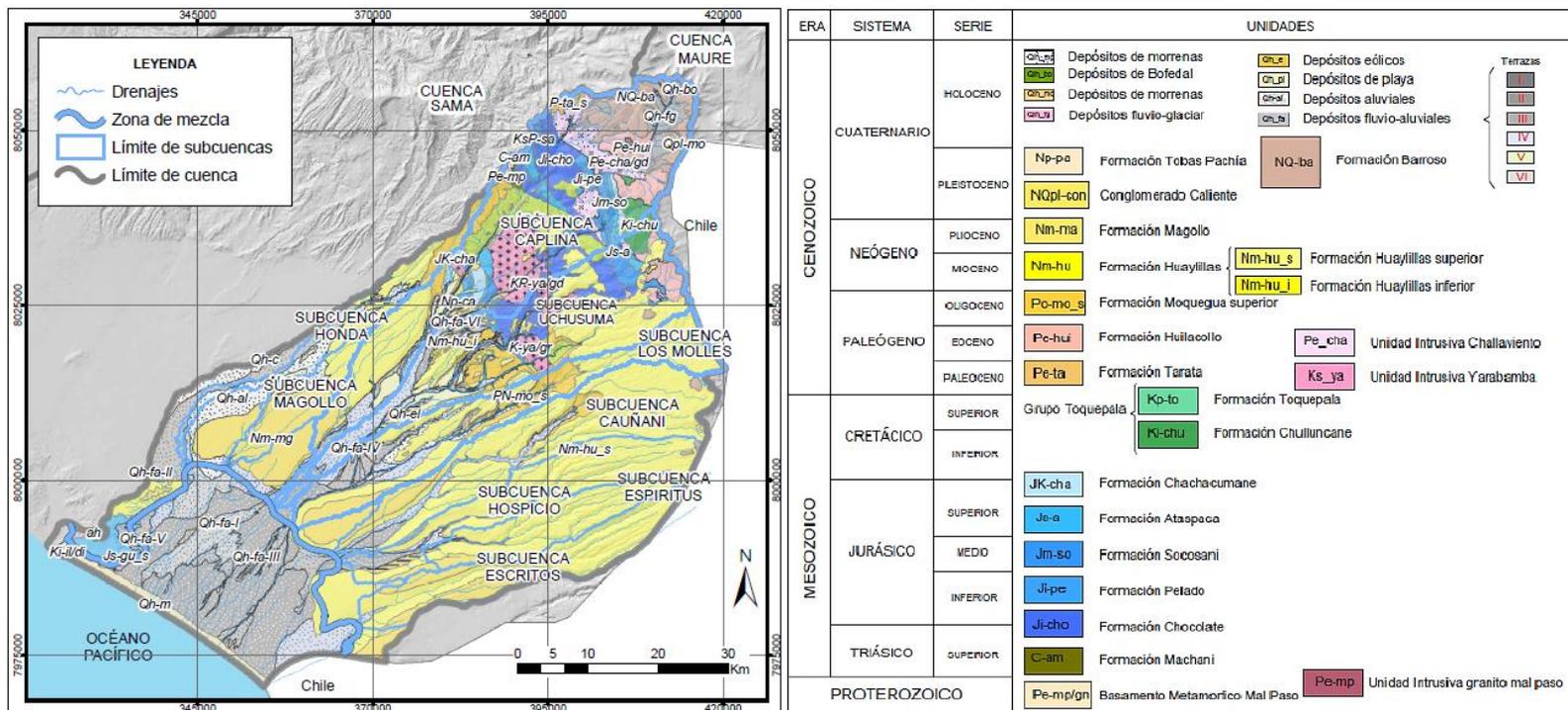


Figura 5. Mapa geológico y estructural de la cuenca Caplina en escala 1:750,000. Modificado de Peña *et al.* (2009).

Las formaciones geológicas aflorantes en la subcuenca Caplina se describen a continuación por antigüedad.

Basamento Mal Paso, conformado por gneis, ortogneis granítico y granodiorítico; su origen metamórfico lo hace poco susceptible a la alteración y meteorización. Superficialmente fracturado, con baja transmisibilidad, clasificado como un acuícludo y ponderado de bajo impacto a la salinización del agua circundante.

Grupo Ambo, secuencia de conglomerados, lutitas negras con areniscas calcáreas. La calcita, feldespato y plagioclasas son propensas a reaccionar en filosilicatos. Se comporta como un acuífero fisurado sedimentario sin alteración superficial.

Formación Junerata, conocida como Volcánico Chocolate. Consiste en derrames lávicos andesíticos y tobas. Destacan los minerales ferromagnesianos de los que se podría alterar en filosilicato (cloritas). Presenta fracturas superficiales; se comporta como un acuitardo.

Formación Pelado, conformado por conglomerados, lutitas y calizas silicificadas. La calcita proveniente de las lutitas tenderá a disolverse en el contacto erosivo por el río Caplina; sin embargo, su estado silicificado dificultaría todo tipo de reacción, además de generar baja permeabilidad en fracturas; clasificado como acuitardo.

Formación San Francisco, también denominada Socosani; está conformada por areniscas calcáreas, conglomerados y calizas. De naturaleza sedimentaria calcárea; susceptible reacción de la calcita. Las aguas que circulan sobre esta formación geológica son cruzadas



transversalmente por la falla Incapuquio, con permeabilidad alta. Esta unidad corresponde a un acuífero fisurado sedimentario.

Formación Ataspaca, secuencia de areniscas grises y lutitas oscuras con niveles de margas. Mineralogía calcárea, propensa a la disolución. Clasificado como acuífero fisurado sedimentario.

Formación Chachacumane, de areniscas cuarcíticas grises con niveles intercalados de lutitas. Al haber sido metamorfizada, las reacciones químicas se focalizan en la hidrólisis de la alteración argílica débil superficial. En su afloramiento existen pequeñas surgencias de aguas subterráneas. Clasificado como acuífero altamente fracturado.

Formación Chullucane, conglomerados de clastos andesíticos y gravas. La plagioclasa sería el mineral más probable por reaccionar. Además, presenta alteración argílica débil. Esta formación volcánica sedimentaria se comporta como acuífero fisurado.

Formación Toquepala, riolita y andesita intercalados con lentes de areniscas y conglomerados. Clasificado como acuífero fisurado volcánico.

Formación Tarata, predominan las brechas y derrames andesíticos, con niveles de areniscas y lutitas. Clasificado como acuitardo por la porosidad de las tobas, con flujo muy lento, condicionando un mayor contacto con minerales propios del ambiente volcánico.

Formación Huilacollo, brechas andesíticas, tobas dacíticas y riódacítica. El agua que discurren sobre esta formación geológica aporta As, B y Al, y proviene de una fuente geotermal (Pino *et al.*, 2017). La composición ácida del agua reacciona con la plagioclasa y feldespatos. Clasificado como acuífero fisurado.

Conglomerado Calientes, conglomerados polimícticos; conforman parte importante del relleno de los valles, por lo tanto sus depósitos registran la dinámica fluvial de los ríos de la región. Estas características lo confieren como acuífero de doble porosidad, fisurado y poroso.

Volcánico Barroso, tufos y lavas de composición traquítica y andesítica, interestratificadas con bancos de sedimentos. Presenta grandes zonas de alteración hidrotermal, junto a los minerales de origen volcánico, ricos en elementos pesados que liberan iones de Ca^{2+} , Na^+ , As, B y Al. Forma parte de la zona de alimentación y recarga importante de la cuenca Caplina. Clasificado como acuífero fisurado volcánico

Los intrusivos que afloran en la subcuenca Caplina se describen a continuación.

Unidad Yarabamba, constituida por rocas plutónicas, granodiorita y dioritas, intruye a las formaciones sedimentarias Pelado y San Francisco. (Wilson & García, 1962). Genera importantes mineralizaciones con alteración hidrotermal. La permeabilidad se da por fracturamiento; en

algunas galerías antiguas que atraviesa el intrusivo Yarabamba hay flujo de 0.2 l/s. Clasificado como acuitardo intrusivo

Unidad Challaviento, conformado por granodiorita y sienogranitos. La intrusión del cuerpo rocoso genera alteración hidrotermal propilítica y se clasifica como un acuitardo intrusivo.

Geología y meteorización en la subcuenca Magollo

La subcuenca Magollo presenta la mayor predisposición a disolución de roca por meteorización química por su baja velocidad de flujo. Se describen las formaciones geológicas descendentes en antigüedad.

Formación Moquegua, conformada por conglomerados arenolimosos. Su naturaleza sedimentaria y porosa la clasifica como acuífero fisurado, caracterizada por sedimentos fluviales consolidados con permeabilidad media; corresponde a un acuífero sedimentario.



Formación Huaylillas, tobas rosáceas, riolíticas, intercalados con delgados niveles de areniscas masivas de color verde. La permeabilidad se origina en sus fracturas, generando una potencial zona de disolución; se clasifica como acuitardo volcánico sedimentario.

Formación Magollo, conglomerados y areniscas gris oscuras feldespatos. Esta formación sedimentaria porosa en la subcuenca Magollo es la más favorable para el almacenamiento de aguas subterráneas; se clasifica como acuífero fisurado poroso sedimentario.

Susceptibilidad a la meteorización química

Las características geoquímicas e hidrogeológicas de los afloramientos de las subcuencas de Caplina y Magollo se describieron anteriormente. La Tabla 9 presenta una clasificación heurística basada en porosidad, permeabilidad y litología. La Tabla 6 y Tabla 7 establecen la ponderación de su influencia para el contacto agua-roca.



Tabla 9. Clasificación cualitativa de la susceptibilidad a la meteorización química.

Sub-cuencas	Formación geológica	Litología (Acosta <i>et al.</i> , 2010)	Minerales alterables	Alteración superficial (Acosta <i>et al.</i> , 2010)	Clasificación hidrogeológica (Peña <i>et al.</i> , 2009)	Susceptibilidad a salinizar
Caplina	Unidad intrusiva Yarabamba	Granodiorita y dioritas	-	Hidrotermal	A cuitardo intrusivo	Alta
		1	-	3	3	7
	Unidad intrusiva Challaviento	Granodiorita y sienogranitos	-	Hidrotermal propilítica	A cuitardo intrusivo	Alta
		1	-	3	3	7
	Basamento metamórfico Mal Paso	Gneis, ortogneis granítico o granodiorítico	-	-	A cuicludo	Baja
		0	-	-	0	0
	Grupo Ambo	Conglomerados, con cuarzo, lutitas negras con areniscas calcáreas	Calcita, feldspatos y plagioclasas	-	A cuífero fisurado	Media
		3	-	-	2	5
	Formación Junerata / Volcánico Chocolate	Andesitas basálticas y conglomerados	-	-	A cuitardo sedimentario	Media
		3	-	-	3	6
	Formación Pelado	Conglomerados, lutitas y calizas silicificadas	Calcita y cuarzo	-	A cuitardo sedimentario	Media
		2	-	-	3	5
	Formación San Francisco / Socosani	Areniscas calcáreas, conglomerados y calizas	Calcita	-	A cuífero fisurado	Media
		3	-	-	2	5
Formación Ataspaca	Areniscas grises y lutitas oscuras y niveles de margas	Calcita	-	A cuífero fisurado	Media	

Sub-cuencas	Formación geológica	Litología (Acosta <i>et al.</i> , 2010)	Minerales alterables	Alteración superficial (Acosta <i>et al.</i> , 2010)	Clasificación hidrogeológica (Peña <i>et al.</i> , 2009)	Susceptibilidad a salinizar
		3	-	-	2	5
	Formación Chachacumane	Areniscas cuarcíticas grises y niveles de lutitas	-	Argílica débil	A cuífero fisurado	Alta
		3	-	2	2	7
	Formación Chullucane	Conglomerados con clastos andesíticos y grawacas	Plagiodasa	Argílica débil	A cuífero fisurado	Alta
		3	-	2	2	7
	Formación Toquepala	Riolita y andesita con lentes de areniscas y conglomerados	Feldespatos y plagioclasas	-	A cuífero fisurado	Media
		3	-	-	2	5
	Formación Tarata	Brechas y derrames andesíticos, con niveles de areniscas y lutitas	Plagiodasa	-	A cuitardo	Media
		3	-	-	3	6
	Formación Huilacollo	Brechas andesíticas, tobas dacíticas riódacítica	Plagiodasa y feldespatos	Hidrotermal	A cuífero fisurado	Alta
		3	-	3	2	8
	Conglomerado Calientes	Conglomerados polimicticos	-	-	A cuífero fisurado	Baja
		2	-	-	2	4
	Volcánico Barroso	Tufos y lavas traquíticas y andesita	Plagiodasa y feldespato	Hidrotermal sectorizado	A cuífero fisurado	Alta
		3	-	2	2	7
Magollo	Formación Moquegua	Conglomerados areno limosa	-	-	A cuífero fisurado	Baja
		2	-	-	2	4
	Formación Huaylillas Inferior	Tobas, riolíticas y riódacíticas	-	-	A cuitardo	Media
		3	-	-	3	6
	Formación Magollo	Conglomerados y areniscas	Feldespatos	-	A cuífero fisurado	Baja

Sub-cuencas	Formación geológica	Litología (Acosta <i>et al.</i> , 2010)	Minerales alterables	Alteración superficial (Acosta <i>et al.</i> , 2010)	Clasificación hidrogeológica (Peña <i>et al.</i> , 2009)	Susceptibilidad a salinizar
		gris oscuras				
		2	-	-	2	4

Discusión

Análisis morfométrico y geológico

La ponderación morfométrica en la cuenca Caplina presenta un comportamiento hidrológico diferente al obtenido en forma individual para cada subcuenca afluente (Tabla 8), por lo que se interpretan las valoraciones en cada una de las nueve subcuencas afluentes.



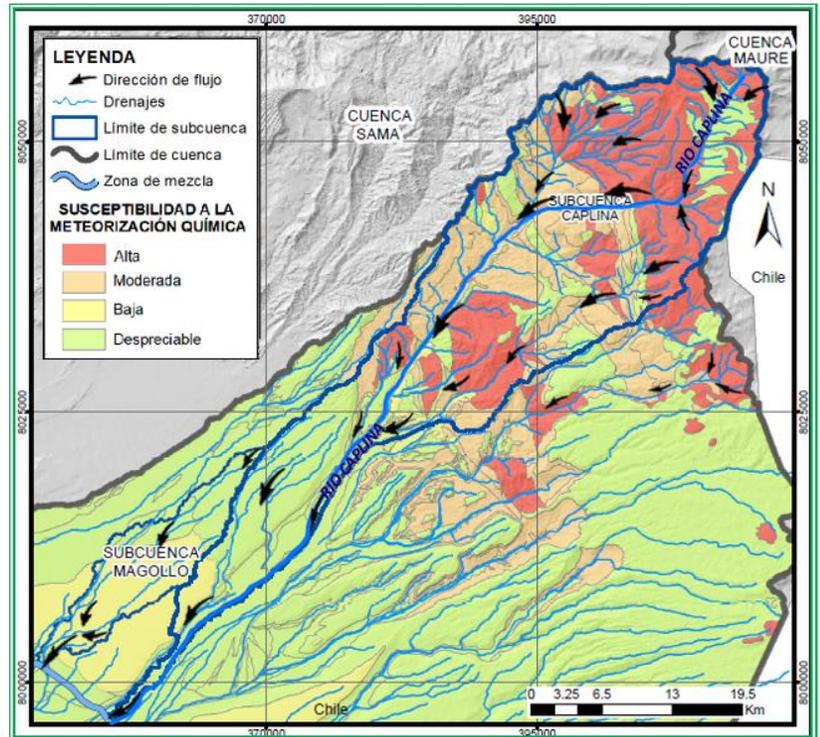
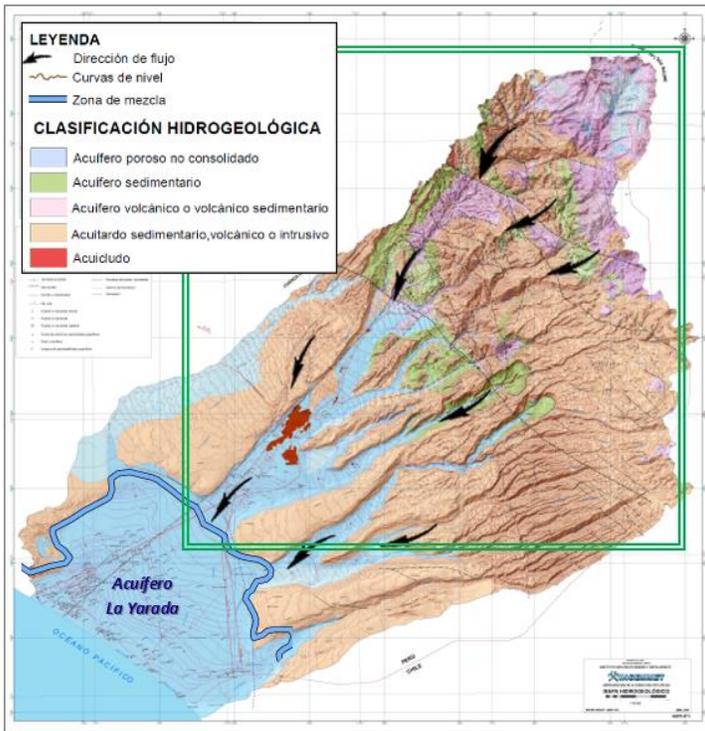
Las subcuencas Espíritus y Escritos obtuvieron ponderaciones acrecentadas en los índices de recarga; sin embargo, se ubican en la zona más árida de la cuenca Caplina; asimismo, disminuyen considerablemente en la ponderación de la curva hipsométrica, por lo que la antigüedad del cauce difiere en la ponderación de recarga histórica. Los índices de velocidad de flujo dan mayor ponderación a las subcuencas Magollo, Los Molles, Hospicio y Escritos debido a la respuesta hidrológica lenta, generando más tiempo de residencia para reacciones químicas. La subcuenca Uchusuma es la segunda mejor ponderada en índices de recarga; sin embargo, tiene mayor velocidad de flujo, que genera erosión y transporte de sedimentos, mas no meteorización química. El contraste de los índices de recarga y velocidad en la ponderación final permite identificar las subcuencas Caplina y Magollo con las condiciones más favorables a la meteorización química.

El mapa de isoyetas delimita la precipitación media anual baja en la subcuenca del Magollo. Sin embargo, los parámetros morfométricos indican una mayor recarga, infiltrada en la formación Moquegua hasta el evento volcánico de Huaylillas (Mioceno inferior, 25.3 ± 0.8 Ma). El material piroclástico se superpone a la formación Moquegua. Asimismo, podemos inferir que la precipitación promedio ha disminuido en los últimos 50 años, periodo en el que se dispone de registros en las estaciones meteorológicas de la región.



Los modelos de Pacheco y Van der Weijden (Pacheco & Van der Weijden, 2012; Pacheco & Van der Weijden, 2014), y Rajbanshi y Bhattacharya (2020) aplican ecuaciones y algoritmos para estimar las tasas de erosión por flujo con circulación de 1.4 a 2.8 años. Sin embargo, el clima hiperárido en la cuenca Caplina puede generar un tiempo de circulación de 100 a 10 000 años, y experimentar una cantidad moderada de meteorización (Kanhaiya *et al.*, 2019; Foster *et al.*, 2003).

La ponderación cualitativa de la geología en la Tabla 9 identifica unidades hidrogeológicas clasificadas en tres niveles, cuyo grado de susceptibilidad a la meteorización química varía entre alta y baja, y despreciable para las formaciones aflorantes en subcuencas menos favorables para la meteorización. El análisis inicial del mapa de susceptibilidad (Figura 6) muestra que las zonas de mayor susceptibilidad son transversales al principal río de la cuenca, río Caplina y al drenaje de las quebradas.



GRADO SUSCEPTIBILIDAD A LA METEORIZACIÓN QUÍMICA

	SUSCEPTIBILIDAD ALTA (7 a más): Hidrotermalismo en acuíferos fisurados y acuitardos de origen intrusivo, saturados, la mayor reacción se produce en las zonas alteradas.
	SUSCEPTIBILIDAD MEDIA (5-6): Influencia calcárea y sódica en acuitardos volcánicos y acuíferos fisurados poco permeables, favoreciendo la interacción agua – roca en los poros de las unidades hidrogeológicas.
	SUSCEPTIBILIDAD BAJA (0-4): Acuíferos fisurados aluviales con discontinuidades favorables para el flujo subterráneo. Depósitos no consolidados que favorecen el transporte de sedimentos, mas no reacciones químicas.
	SUSCEPTIBILIDAD DESPRECIABLE: Áreas que reciben baja recarga y precipitación. donde no existe indicios de alteración superficial.



Figura 6. (a) Mapa hidrogeológico de la cuenca Caplina, modificado de Peña *et al.* (2009); (b) mapa de susceptibilidad a la meteorización química en la zona de recarga de la cuenca Caplina.

Estas unidades generan salinización con flujo subterráneo direccionado al SO que recarga el acuífero La Yarada (Figura 6), reflejado en las elevadas conductividades eléctricas en el acuífero La Yarada (Pino *et al.*, 2019a), lo cual se corroborará en el análisis hidrogeoquímico.

Análisis hidrogeoquímico

En los trabajos de Pacheco y Van der Weijden (Pacheco & Van der Weijden, 2012; Pacheco & Van der Weijden, 2014), Adhami y Hamidreza (2016), Kanhaiya *et al.* (2019), y Rajbanshi y Bhattacharya (2020) se proponen factores de evaluación de susceptibilidad a la meteorización, sin considerar las alteraciones superficiales. En la Tabla 9 se observa que las formaciones

geológicas de susceptibilidad alta y media son diferenciadas por la ponderación de la alteración hidrotermal.

La clasificación realizada en este trabajo es validada con el estudio hidrogeoquímico realizado por Peña *et al.* (2009) en 34 muestras de agua subterránea y superficial en la cuenca Caplina (Tabla 10, Tabla 11 y Tabla 12). Li *et al.* (2019) proponen un balance de masa de iones para calcular la carga disuelta mediante ecuaciones empíricas; la proporción de la composición química de aniones y cationes se representa en el diagrama de Piper. Dicho diagrama también permite diferenciar el grado interacción a través de las relaciones iónicas, las que fueron vinculadas con las unidades hidrogeológicas donde se tomaron las muestras (Figura 7 y Figura 8).

Tabla 10. Familia cálcica sulfata en la cuenca Caplina. Modificado de Peña *et al.* (2009).

Fuente	Punto de muestreo	Subcuenca	Geología local	Tipo de agua	Fm. geológica dominante	Unidad hidrogeológica
Río	Represa Paucarani	Maure	Depósito fluio-glaciario	Ca-Mg-Na-SO ₄		Geotermal
Río	Canal Uchusuma (C Blanco)	Uchusuma	Q-fa, Chocolate, Yarabamba	Ca-Mg-Na-SO ₄	Yarabamba	A cuitardo intrusivo
Río	Río Uchusuma (Sector Higuera)	Uchusuma	Socosani, Chocolate, Yarabamba	Ca-Na-Mg-SO ₄		
Río	Túnel Uchusuma	Uchusuma	Huilacollo	Ca-Mg-Na-SO ₄	Huilacollo	A cuífero fisurado
Manantial	Paso de los Vientos	Uchusuma	Huilacollo, Huaylillas	Ca-Mg-Na-SO ₄ -HCO ₃		

Fuente	Punto de muestreo	Subcuenca	Geología local	Tipo de agua	Fm. geológica dominante	Unidad hidrogeológica
Manantial	Captación Ataspaca	Caplina	Ataspaca, Chachacumane	Ca-Mg-SO ₄	Chachacumane	Acuífero fisurado
Manantial	Captación Palca-Consumo	Caplina	Ataspaca, Socosani, Chachacumane	Ca-Mg-SO ₄ -HCO ₃		
Manantial	Quebrada Toquela	Caplina	Challaviento, Huilacollo, Barroso	Ca-Mg-SO ₄	Challaviento / Huilacollo	Acuífero intrusivo, acuífero fisurado
Manantial	Manante Aruma	Caplina	Huilacollo, Barroso, Huaylillas	Ca-Na-Mg-SO ₄ -Cl	Huilacollo/ Barroso	Acuífero fisurado
Manantial	Manantial Pampa Soroche	Caplina	Qpl-morrenas, Barroso	Ca-Na-Mg-SO ₄ -HCO ₃		
Río	Captación Caplina	Caplina	Chachacumane, Socosani, Ataspaca	Ca-Na-SO ₄ -Cl	Chachacumane	
Río	Río Caplina Parte baja	Caplina	Toquepala, Challaviento, Yarabamba	Ca-Na-SO ₄	Challaviento/ Yarabamba	Acuífero intrusivo
Manantial	Captación Palca-Agro	Caplina	Chocolate, Socosani, Toquepala, Challaviento	Ca-SO ₄ -HCO ₃	Challaviento	
Manantial	Manante Ataspaca	Caplina	Huaylillas y Toquepala	Ca-Na-SO ₄ -Cl	Huaylillas	Acuífero volcánico
Pozo subterráneo	Quebrada Ancopuja	Uchusuma	Huaylillas	Ca-Na-SO ₄ -HCO ₃		
Pozo subterráneo	IRHS-220 Las Palmeras	Zona Mezcla	Q-fa	Ca-Na-SO ₄ -Cl		Aluvial
Pozo subterráneo	IRHS-146 Cooperativa 60	Zona Mezcla	Q-fa	Ca-Na-Mg-SO ₄ -Cl		Aluvial
Río	Quebrada Humalata	Caplina	Tarata	Ca-SO ₄	-	Sedimentaria
Río	Quebrada Piscollane	Caplina	Barroso, Qh-bofedal, Q-fa	Ca-SO ₄	Barroso	Acuífero fisurado
Manantial	Manante Cocavira	Caplina	Huilacollo y Qh-bofedal	Ca-SO ₄	Huilacollo	
Manantial	Manantial Tirata	Caplina	Huilacollo	Mg-Ca-SO ₄		

Tabla 11. Familia sódica clorurada y cálcica clorurada en la cuenca Caplina. Modificado de Peña et al. (2009).



Código	Punto de muestreo	Subcuenca	Geología local	Tipo de agua	Fm. geológica dominante	Unidad hidrogeológica
Manantial	Captación "D" Cauñani	Cauñani	Q - fa, Huaylillas, Pachia	Na-Ca-Cl-HCO ₃	Huaylillas	A cuitardo volcánico
Manantial	Captación "C" Cauñani	Cauñani	Q - fa, Huaylillas, Pachia	Na-Ca-Cl-HCO ₃		
Pozo subterráneo	IRHS-024 La Esperanza	Zona Mezcla	Q - fa, Huaylillas, Chocolate (Guaneros)	Na-Ca-Cl-SO ₄	Huaylillas	
Manantial	Manante Termal Calientes	Caplina	Chachacumane, Socosani, Ataspaca	Na-Ca-Cl-SO ₄	Chachacumane	A cuífero fisurado
Manantial	Aguas Termales Aruma	Caplina	Huilacollo, Barroso, Huaylillas	Na-SO ₄ -Cl	Huilacollo/ Barroso	
Pozo subterráneo	IRHS-112 La Yarada	Zona Mezcla	Dep. fluvio-aluviales (Q - fa)	Na-Ca-SO ₄ -Cl		A luvial con intrusión marina
Pozo subterráneo	IRHS-054 Velasco Alvarado	Zona Mezcla	Dep. fluvio-aluviales (Q - fa)	Ca-Na-Cl-SO ₄		
Pozo subterráneo	IRHS-051 Los Palos	Zona Mezcla	Dep. fluvio-aluviales (Q - fa)	Ca-Na-Cl-SO ₄		

Tabla 12. Familia cálcica bicarbonatada en la cuenca Caplina. Modificado de Peña et al. (2009).

Código	Punto de muestreo	Subcuenca	Geología local	Tipo de agua	Fm. Geológica Dominante	Unidad hidrogeológica
Manantial	Manante Yangane	Uchusuma	Chulluncane	Ca-Cl-HCO ₃	Chulluncane	A cuífero fisurado
Manantial	Manante Piscollane	Caplina	Huilacollo, Barroso	Ca-Mg-Na-HCO ₃	Huilacollo, Barroso	
Manantial	Quebrada Quilla	Caplina	Chulluncane, Challaviento	Ca-Mg-HCO ₃ -SO ₄	Challaviento	A cuitardo intrusivo
Manantial	Quebrada Coapalca	Uchusuma	Moquegua, Huaylillas	Ca-Na-HCO ₃ -SO ₄	Huaylillas	A cuitardo volcánico
Manantial	Quebrada Haquimanqui	Uchusuma	Toquepala, Moquegua, Huaylillas	Ca-Na-HCO ₃ -SO ₄		

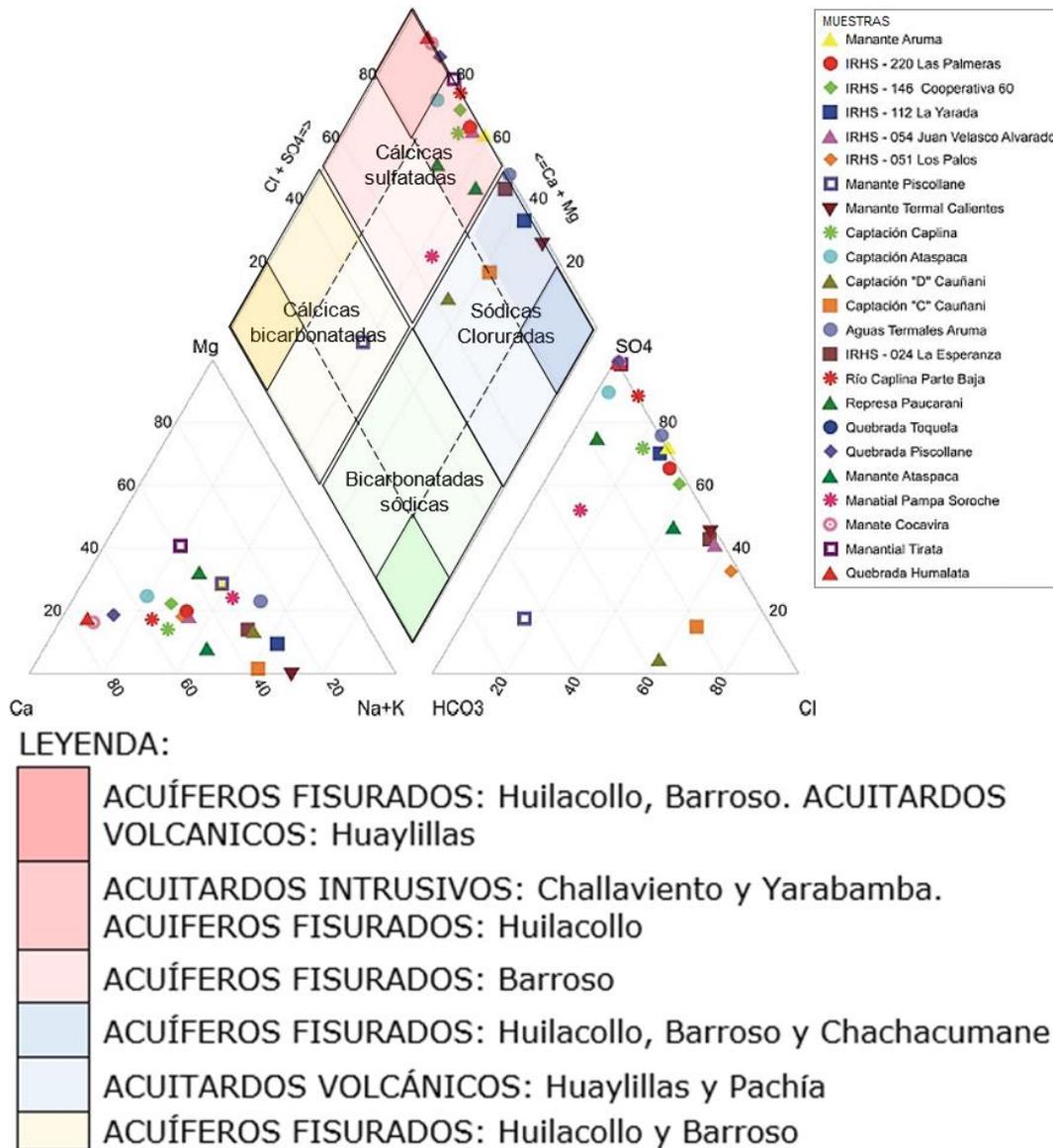
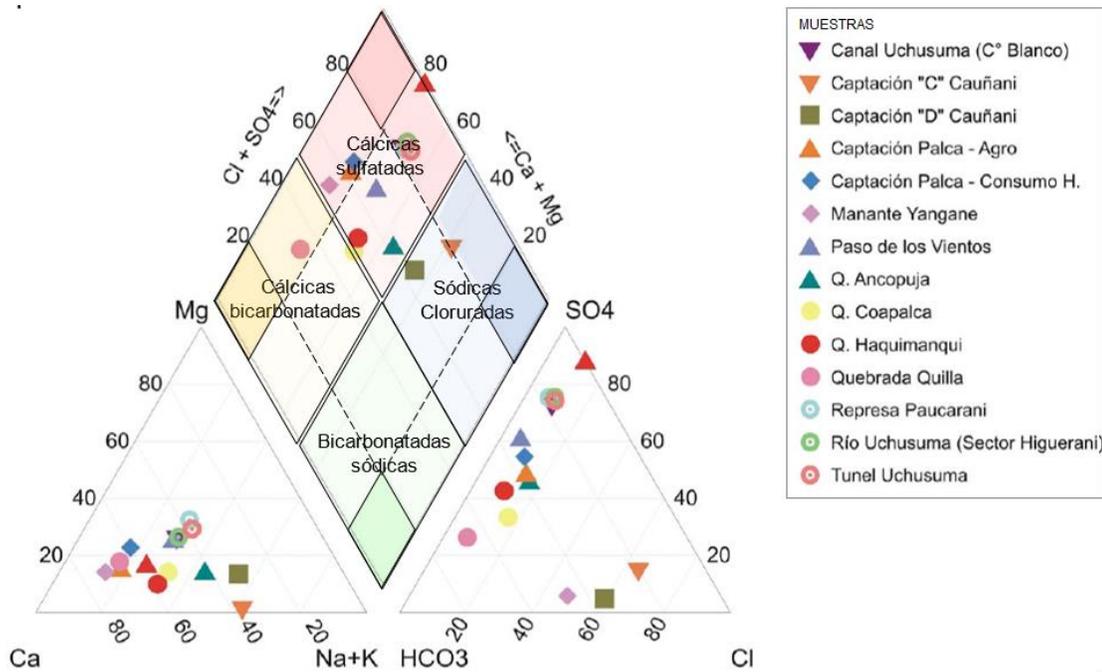


Figura 7. Diagrama de Piper en la subcuenca Caplina. Modificado de Peña *et al.* (2009).



LEYENDA:

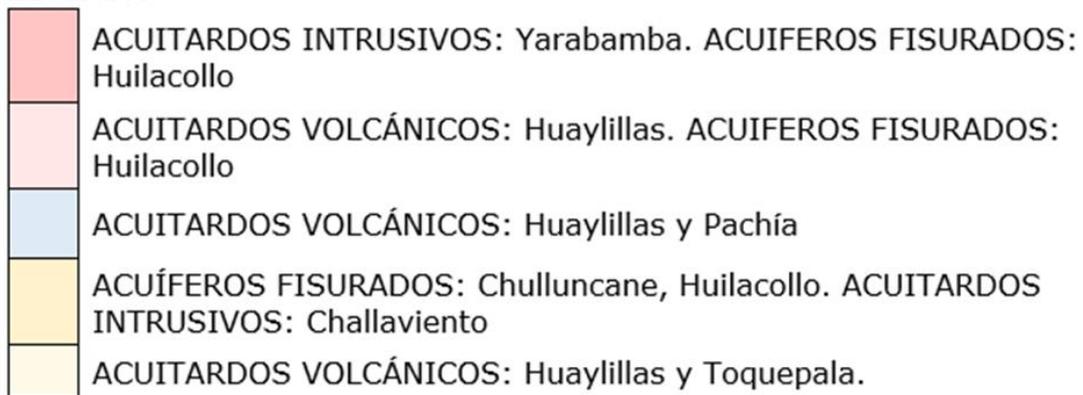


Figura 8. Diagrama de Piper en las subcuencas Uchusuma y Cauñani. Modificado de Peña *et al.* (2009).



Las facies geoquímicas de las principales fuentes de agua superficiales y subterráneas en la subcuenca Caplina (Figura 7) experimentan un intercambio iónico polarizado espacialmente. En contraste, en las subcuencas Uchusuma y Cauñani (Figura 8) se observa que conservan cierta neutralidad, corroborando la presencia de transporte de sedimentos con tendencia erosiva en la subcuenca Uchusuma, mas no meteorización química.

Peña *et al.* (2009); Vera, Pino-Vargas, Verma, Chucuya, Chávarri, Canales, Torres-Martínez, Mora, Mahlkecht (2021), identifican cuatro facies geoquímicas en las fuentes de agua superficiales y subterráneas en la cuenca Caplina, reagrupándose en tres por la predominancia de aniones y su relación con el medio geológico donde afloran.

Grupo I: cálcica-sulfatada



La familia dominante en la cuenca es la cálcica-sulfatada. Los sulfatos provienen de la oxidación de sulfuros producto de la alteración hidrotermal en las ocurrencias minerales del intrusivo Yarabamba y Challaviento (Acosta *et al.*, 2010). En la superficie de acuíferos fisurados: Huilacollo y Barroso, la alteración hidrotermal se extiende en profundidad surgiendo en captaciones y manantiales. En este sentido, es relevante la ponderación de la alteración superficial mapeada por Acosta *et al.* (2010) (Tabla 9). En tanto, los iones Ca^{2+} son liberados producto de las reacciones químicas en formaciones sedimentarias calcáreas, como Ataspaca.

Grupo II: sódica-clorurada y cálcica-clorurada

Los aniones cloruro provienen de las aguas termales Aruma y Calientes, en los afloramientos de Huilacollo, Barroso y Chachacumane. Es preciso reconocer que en las aguas profundas del campo geotermal de Borateras predominan las aguas cloruradas (Vargas *et al.*, 2012), relacionadas con la



geoquímica de los yacimientos geotérmicos del Eje volcánico Sur, que abarca parte de la cuenca Caplina.

Asimismo, existe una considerable influencia de Na^+ y Ca^{2+} provenientes de la formación Huaylillas. Se observa un incremento en las reacciones en los acuitardos volcánicos con alta porosidad, pese a recibir poca precipitación.

Grupo III: cálcica bicarbonatada

Las fuentes cálcicas-bicarbonatadas representan la composición ideal de rocas volcánicas andesíticas (Ng, 2015) presentes en los acuíferos fisurados de Huillacollo, Barroso, Chulluncane. En el proceso de mezcla del agua subterránea, agua meteórica y glaciario se genera variación estacional en la hidroquímica de las cuencas (Ansari *et al.*, 2019; Chucuya, Vera, Pino-Vargas, Steenken, Mahlkecht, Montalván, 2022). El anión bicarbonato provendría de un flujo local de muy corto recorrido; se relaciona con la reacción del CO_2 , proveniente de los poros del suelo.



La caracterización de los tres grupos se detalla en la Tabla 10, Tabla 11 y Tabla 12, y a partir del tipo de fuente del punto de muestreo se relaciona con la geología local y tipo de agua para identificar la formación geológica dominante en la mineralización del agua. De esta manera, la unidad hidrogeológica corresponde al comportamiento hidrogeológico de la formación geológica dominante. El 79.41 % de muestras evaluadas tiene conexión con unidades hidrogeológicas calificadas de susceptibilidad alta y media (Tabla 9). Esta elevada correspondencia valida la correcta clasificación propuesta. Además, se encontró que 41.2 % del total de muestras recibe influencia de acuíferos fisurados con alteración hidrotermal, predisponiendo el intercambio iónico. El 20.6 % de dichas muestras aflora en acuitardos volcánicos sin intercambio iónico considerable y el 17.6 % corresponde a acuitardos intrusivos con alteración superficial.

Conclusiones



La metodología de ponderaciones permitió generar el mapa de susceptibilidad a la meteorización química, con 79 % de validación, con respecto a la hidrogeoquímica de la cuenca. Destacan tres unidades hidrogeológicas en la cuenca Caplina: (1) acuíferos fisurados con alteración hidrotermal en las formaciones Huilacollo, volcánico Barroso, Chulluncane y Chachacumane; (2) acuitardos intrusivos con alteración hidrotermal en las unidades Yarabamba y Challaviento; (3) acuitardos de origen volcánico y poroso en la formación Huaylillas.

En el análisis hidrogeoquímico de facies del agua predomina el anión sulfato proveniente de la oxidación de los sulfuros producto de las ocurrencias minerales de Cu y Ag, asociadas con acuitardos intrusivos. El patrón vinculado con mayor susceptibilidad es la presencia de alteración hidrotermal. La facie cálcica y sódica resulta de las reacciones químicas en acuíferos fisurados alterados y el flujo en las formaciones sedimentarias calcáreas. Asimismo, las reacciones se intensifican en el entrapamiento del acuitardos de la formación Huaylillas.

Las formaciones geológicas estudiadas afloran en las subcuencas Caplina y Magollo, a partir de una selección heurística en los parámetros morfométricos de todas las subcuencas afluentes a la cuenca Caplina. Desde esta metodología se consiguen identificar las características de las subcuencas con mayor recarga histórica: forma oblonga con coeficiente de compacidad (> 2.25), relación de elongación (> 0.39), e hipsometría de



cuencas maduras y viejas. Las subcuencas con menor velocidad de flujo poseen pendientes bajas (3 %-12 %), con densidad de drenaje $< 0.8 \text{ km}^{-1}$. Estos parámetros establecen una base para una ponderación de clasificación de susceptibilidad a la meteorización química en una cuenca árida.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido desarrollado en el marco del proyecto de investigación “Integración de métodos hidrodinámicos, hidroquímicos e isotópicos para precisar el funcionamiento y manejo sostenible del acuífero La Yarada, Tacna, Perú”, financiado con fondos de canon, sobrecanon y regalías mineras de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú. Se agradece además al Dr. Alfonso Aragón, jefe de la Gerencia de Geotermia por permitir la estancia del primer autor en las instalaciones del Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias de Cuernavaca, México, para desarrollar la presente investigación. El manuscrito se mejora significativamente con los comentarios y las sugerencias de revisores anónimos.

Referencias



- Acosta, H., Alván, A., Mamani, M., Oviedo, M., & Rodríguez, J. (2010). Geología de los cuadrángulos de Pachía (36-v) y Palca (36-x), escala 1:50 000. Siete mapas. *INGEMMET, Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional*, 139, 100.
- Adhami, M., & Hamidreza, S. (2016). Sub-watershed prioritization based on sediment yield using game theory. *Journal of Hydrology*, 541(B), 977-987. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.08.008>
- ANA, Autoridad Nacional del Agua. (2011). *Informe técnico 003-Calidad de agua, cuenca Caplina-Tacna*. Tacna, Perú: Dirección de Gestión de Calidad de los Recursos Hídricos.
- Ansari, Z., Ahmad, S., & Khan, M. A. (2019). Seasonal variations of streams hydrochemistry and relationships with morphometric/landcover parameters in the Bhagirathi Watersheds, Garhwal Himalaya, India. *Journal of the Geological Society of India*, 94(5), 493-500. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s12594-019-1346-y>
- Bransford, J., & Stein, B. (1987). *Trad cast: solución ideal de problemas*. Madrid, España: Labor.
- Camino, M., Bó, M., Cionchi, J., López-de-Armentia, A., Del-Río, J., & De-Marco, S. (2018). Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de

la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). *Revista Universitaria de Geografía*, 27(1), 73-97.

Catalan, L. J. (1981). *Química del agua* (2a ed.). Madrid, España: Talleres Gráficos Alonso.

Chucuya, S.; Vera, A.; Pino-Vargas, E.; Steenken, A.; Mahlknecht, J.; Montalván, I. Hydrogeochemical Characterization and Identification of Factors Influencing Groundwater Quality in Coastal Aquifers, Case: La Yarada, Tacna, Peru. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2022, 19, 2815. <https://doi.org/10.3390/ijerph19052815>

Custodio, E., & Llamas, M. (1983). *Hidrología subterránea*. Tomo I y II. Barcelona, España: Ediciones Omega.

Delgadillo, A., & Páez, G. (2008). Aspectos hidrológicos, subcuencas susceptibles a crecidas, escenarios de riesgo. En: Ferrer, C., & Duarte, M. (eds.). *Plan de desarrollo urbano del Municipio Antonio Pinto Salinas, bajo el enfoque de gestión del riesgo. Caracterización del riesgo de la cuenca del valle Mocoties*. Mérida, Venezuela: Fundación para la Prevención del Riesgo Sísmico (Fundapris).

Foster, S., Tuinhof, A., Kemper, K., Garduño, H., & Nanni, M. (2003). *Characterization of Groundwater Systems - key concepts and frequent*



- misconceptions*. GW-MATE Briefing Note Series 2, Washington, D.C., USA: World Bank.
- García M., & Fernández, A., (2009). *Hidrogeología básica. Las aguas subterráneas y su flujo* (3ª ed.). Madrid, España: Ediciones FIEC.
- Garreaud, R. D., Molina, A., & Farias, M. (2010). Andean uplift, ocean cooling and Atacama hyperaridity: A climate modeling perspective. *Earth and Planetary Science Letters*, 292(1-2), 39-50. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.01.017>.
- Garreaud, R., Vuille, M., & Clement, A. C. (2003). The climate of the Altiplano: Observed current conditions and mechanisms of past changes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 194(1-3), 5-22. Recuperado de [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(03\)00269-4](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(03)00269-4)
- Gaspari, F. J., Rodríguez-Vagaría, A. M., Senisterra, G. E., Denegri, G., Delgado, M. I., & Besteiro, S. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *Revista Electrónica del Comité de Medio Ambiente. AUGMDOMUS*, 4, 143-158. Recuperado de <https://revistas.unlp.edu.ar/domus/article/download/476/505/>

- Gravelius, H. (1914). *Morphometry of drainage bassins*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
- Henao, J. (1988). *Introducción al manejo de cuencas hidrográficas*. Bogotá, Colombia: Universidad Santo Tomás.
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bulletin of the Geological Society of America*, (56), 275-370.
- Jardí, M. (1985). Forma de una cuenca de drenaje. Análisis de las variables morfométricas que nos la definen. *Revista de Geografía*, (19), 41-68.
- Kanhaiya, S., Singh, B. P., Singh, S., Mittal, P., & Srivastava, V. K. (2019). Morphometric analysis, bedload sediments, and weathering intensity in the Khurar River Basin, central India. *Geological Journal*, 54(1), 466-481. Recuperado de <https://doi.org/10.1002/gj.3194>
- Li, X., Han, G., Liu, M., Yang, K., & Liu, J. (2019). Hydro-geochemistry of the river water in the Jiulongjiang River Basin, Southeast China: Implications of anthropogenic inputs and chemical weathering. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(3). Recuperado de <https://doi.org/10.3390/ijerph16030440>

- Manfreda, S., Nardi, F., Samela, C., Grimaldi, S., Taramasso, A., Roth, G. & Sole, A. (2014). Investigation on the use of geomorphic approaches for the delineation of flood prone areas. *Journal of Hydrology*, 517, 863-876. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.06.009>
- Molina, M. (2005). *Estudio de la intrusión salina en acuíferos costeros: sector Costa Quebrada Los Choros, IV Región*. Santiago de Chile, Chile: Universidad de Chile.
- Monge, R., & Cervantes, J. (2000). *Memoria explicativa de la Geología del Cuadrángulo de Pachía y Palca (36-v)*. Lima, Perú: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.
- Motta-Zamulloa, E. (julio, 1990). Agua y conflictos en el valle del Caplina (Tacna) siglos XVI-XIX. *Boletín de Lima*, (70). Recuperado de <https://boletindelima.pe/products/199070>
- Mourier, B., Walter, C., & Merot, P. (2008). Soil distribution in valleys according to stream order. *CATENA*, 72(3), 395-404. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.07.012>
- Narvaez-Montoya, C., Torres-Martínez, J. A., Pino-Vargas, E., Cabrera-Olivera, F., Loge, F., & Mahlknecht, J. (2022) Predicting adverse scenarios for a transboundary coastal aquifer system in the Atacama

- Desert (Peru/Chile). *Science of The Total Environment*, 806, Part 1. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150386>
- Ng, W. (2015). *Estudio hidrogeológico de la parte alta de la cuenca del río Ilo-Moquegua* (tesis Ingeniero Geólogo). Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, Perú.
- Ortiz, O. (2004). Evaluación hidrológica. *Hidrrored*, (1), 1-7.
- Pacheco, F., & Van der Weijden, C. (2014). Role of hydraulic diffusivity in the decrease of weathering rates over time. *Journal of Hydrology*, 512, 87-106. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.02.041>
- Pacheco, F., & Van der Weijden, C. (2012). Integrating topography, hydrology and rock structure in weathering rate models of spring watersheds. *Journal of Hydrology*, 428-429. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.019>
- Peña, F., Cotrina, G., & Acosta, H. (2009). Hidrogeología de la cuenca del río Caplina. *Boletín 1, INGEMMET*. Recuperado de <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/368>
- Pino, E. (2019). The La Yarada coastal aquifer, after 100 years of exploitation as a sustenance for agriculture in arid zones: A historical

- review. *Idesia*, 37(3), 39-45. Recuperado de <https://doi.org/10.4067/S0718-34292019000300039>
- Pino, E., Ramos, L., Mejía, J., Chávarri, E., & Ascencios, D. (2020). Medidas de mitigación para el acuífero costero La Yarada, un sistema sobreexplotado en zonas áridas. *Idesia (Arica)*, 38(3), 21-31. Recuperado de <https://doi.org/10.4067/s0718-34292020000300021>
- Pino, E., Montalván, I., Vera, A., & Ramos, L. (2019a). Stomatal conductance and its relationship with leaf temperature and soil moisture in olive cultivation (*Olea europaea* L.), in the period of fruit ripening, in arid zones. La Yarada, Tacna, Perú. *Idesia*, 37(4), 55-64. Recuperado de <https://doi.org/10.4067/S0718-34292019000400055>
- Pino, E., Ramos, L., Avalos, O., Tacora, P., Chávarri, E., Angulo, O., Ascencios, D., & Mejía, J. (2019b). Factors affecting depletion and pollution by marine intrusion in the La Yarada's coastal aquifer, Tacna, Peru. *Tecnología y ciencias del agua*, 10(5), 177-213. Recuperado de <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-05-07>.
- Pino, E., Chávarri, E., & Ramos, L. (2018). Governability and governance crisis its implications in the inadequate use of groundwater, case coastal aquifer of la yarada, Tacna, Perú. *Idesia*, 36(3), 77-86. Recuperado de <https://doi.org/10.4067/S0718-34292018005001301>

- Pino, E., Tacora, P., Steenken, A., Alfaro, L., Valle, A., Chávarri, E., Ascencios, D., & Mejía-Marcacuzco, J. A. (2017). Efecto de las características ambientales y geológicas sobre la calidad del agua en la cuenca del río Caplina, Tacna, Perú. *Tecnología y ciencias del agua*, 8(6), 77-99. Recuperado de <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-06-06>
- Rajbanshi, J., & Bhattacharya, S. (2020). Assessment of soil erosion, sediment yield and basin specific controlling factors using RUSLE-SDR and PLSR approach in Konar River basin, India. *Journal of Hydrology*, 587, 124935. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124935>
- Sánchez, F. (2017). *Hidrología superficial y subterránea*. Madrid, España: Createspace Independent Publishing Platform.
- Secretaría de Gestión de Riesgos. (2015). *Propuesta metodológica para el análisis de amenaza por movimientos en masa*. Quito, Ecuador: Secretaría de Gestión de Riesgos.
- Schumm, S. (1956). The evolution of drainage systems and slopes in badlands at Pearth Amboy, New Jersey. *Bulletin of the Geological Society of America*, (67), 597-646.

- Strahler, A. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions, American Geophysical Union*, 38, 913-920. DOI: 10.1029/TR038i006p00913
- Strahler, A. (1952a). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Bulletin of Geological Society of America*, (63), 1117-1142.
- Strahler, A. (1952b). Hypsometric analysis of erosional topography. *Bulletin of Geological Society of America*, (63), 923-938.
- Vargas, V., Cruz, V., Antayhua, Y., Rivera, M., Chirif, H., & West, J. (2012). Estudio geotérmico campo Borateras. *INGEMMET. Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*, 47, 74.
- Vera, A.; Pino-Vargas, E.; Verma, M.P.; Chucuya, S.; Chávarri, E.; Canales, M.; Torres-Martínez, J.A.; Mora, A.; Mahlkecht, J. (2021). Hydrodynamics, Hydrochemistry, and Stable Isotope Geochemistry to Assess Temporal Behavior of Seawater Intrusion in the La Yarada Aquifer in the Vicinity of Atacama Desert, Tacna, Peru. *Water* 2021, 13, 3161. <https://doi.org/10.3390/w13223161>
- Wilson, J., & García, W. (1962). *Geología de los cuadrángulos de Pachia y Palca Hoja 36v y 36x*. Lima, Perú: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET)-Comisión de la Carta Nacional.

Zomlot, Z., Verbeiren, B., Huysmans, M., & Batelaan, O. (2015). Spatial distribution of groundwater recharge and base flow: Assessment of controlling factors. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 4, 349-368. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.07.005>

