

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia

Escuela Profesional de Ingeniería Geológica-Geotecnia

**“METODOLOGÍA DE PONDERACIÓN MORFOMÉTRICA
E HIDROGEOQUÍMICA PARA CLASIFICAR LA
SUSCEPTIBILIDAD A LA METEORIZACIÓN
QUÍMICA EN LAS SUBCUENCAS
DEL RÍO CAPLINA,
TACNA, PERÚ”**

TESIS

Presentada por:

Bach. ALISSA ANABEL VERA MAMANI

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO GEÓLOGO - GEOTÉCNICO

TACNA - PERÚ

2021

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia

Escuela Profesional de Ingeniería Geológica-Geotecnia

HOJA DE JURADO

TESIS

**“METODOLOGÍA DE PONDERACIÓN MORFOMÉTRICA E HIDROGEOQUÍMICA
PARA CLASIFICAR LA SUSCEPTIBILIDAD A LA METEORIZACIÓN QUÍMICA
EN LAS SUBCUENCAS DEL RÍO CAPLINA, TACNA, PERÚ”**

Presentada por: Bach: Alissa Anabel Vera Mamani.

Tesis sustentada y aprobada el 12 de noviembre de 2021; con el siguiente jurado

Presidente



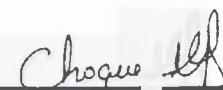
Msc. Conrado G. Bedoya Jaén

Miembro – Secretario




Mgr. Fredy C. Cabrera Olivera

Miembro



Mgr. Gloria M. Chuchoque Machaca

Asesor



PhD. Edwin M. Pino Vargas

**A todas las mujeres rockstar en
geociencias**, por su valioso ejemplo.

A mi padre, Wilfredo Vera Morales,
mi mayor fan y fuente de motivación.

AGRADECIMIENTO

Expreso mi reconocimiento y gratitud a todas las personas que fueron parte esencial en mi formación profesional y personal, destacando:

Los coautores del presente artículo científico: Dr. Mahendra Verma, PhD. Edwin Pino Vargas y Bach. German Huayna. Una mención especial a mi asesor de tesis, el Profesor Pino, por confiar en mí para liderar como 1° autora del presente estudio, su diligencia para concretar el proyecto PIMHHI y su contagioso ímpetu por la investigación en recursos hídricos.

La Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, que, con fondos de canon, sobrecanon y regalías mineras, financiaron el Proyecto de investigación “Integración de métodos hidrodinámicos, hidroquímicos e isotópicos para precisar el funcionamiento y manejo sostenible del acuífero La Yarada, Tacna, Perú”. El presente trabajo ha sido desarrollado en el marco del proyecto durante el 2020.

El Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias de México, en especial al Dr. Alfonso Aragón, jefe de la Gerencia de geotermia por permitir la pasantía para desarrollar la presente investigación.

Los revisores de la revista Ciencia y Tecnología del Agua, por las certeras sugerencias y comentarios que mejoraron significativamente el artículo científico.

Mis GeoLatinas, por la inspiración y compañía en medio de una pandemia mundial, la virtualidad no es un límite cuando la fraternidad es real.

Mis amigos, compañeros y docentes, que me encaminaron en este mundo de la investigación.

Mi familia, por su amor incondicional y siempre estar ahí.

Te lo agradezco, padre celestial.

ÍNDICE

ARTÍCULO CIENTÍFICO – Versión español	1
Resumen	1
Introducción	3
Materiales y métodos	6
Caracterización hidrológica	6
Caracterización y análisis morfométrico.....	7
Índices morfométricos de recarga.....	8
Índices morfométricos de velocidad de flujo superficial	10
Caracterización geológica	11
Caracterización hidrogeológica	12
Caracterización geoquímica	13
Resultados	13
Comportamiento hidrológico en la morfometría	13
Recarga por subcuencas.....	15
Velocidad de escorrentía y tiempo de contacto	16
Geología y meteorización en la subcuenca Caplina	18
Geología y meteorización en la subcuenca Magollo	21
Susceptibilidad a la meteorización química	21
Discusión	23
Análisis morfométrico y geológico	23
Análisis hidrogeoquímico	25
Grupo I: Cálcica – sulfatada	27
Grupo II: Sódica-clorurada y cálcica – clorurada	28
Grupo III: Cálcica bicarbonatada	28
Conclusiones	31
Referencias	32
ARTÍCULO CIENTÍFICO – Versión inglés	37

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

Alissa Vera¹

Mahendra P. Verma²

Edwin Pino³

German Huayna⁴

¹Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú, averam@unjbg.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0003-0939-6315>

²Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, Reforma 101, Col. Palmira, Cuernavaca, Morelos, México. Afiliación Actual: Universidad Politécnica de Nochixtlán "Abraham Castellanos", Carretera a San Mateo Etlatongo km. 2.5, Asunción Nochixtlán, Oaxaca, México, mpv55.mx1@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6559-7184>

³Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú, epinov@unjbg.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0001-7432-4364>

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

Autor 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 fueron analizados 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.

Introducción

El estado actual de conocimiento, lleva a interrelacionar la topografía y drenaje de los ríos, junto con la textura mineralógica y geoquímica sobre el transporte de sedimentos, los que experimentan meteorización en cuencas variable a las condiciones climáticas (Kanhaiya et al., 2019). El balance de masa basado en el cálculo de cationes por Li et al. (2019) demuestra que la meteorización por silicatos, carbonatos, aportes atmosféricos y factores antropogénicos 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 et al., 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 et al., 2019a).

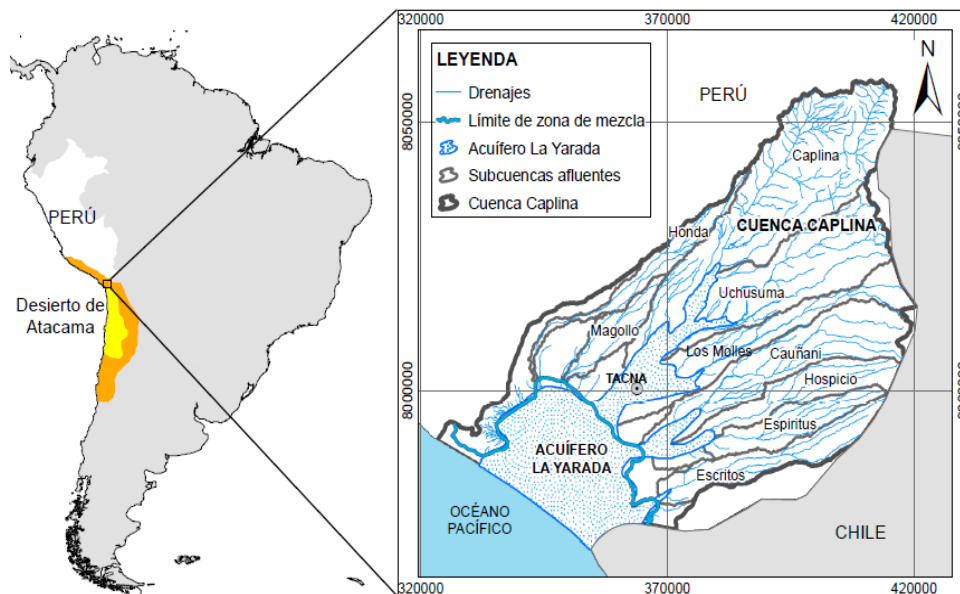


Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Caplina en el Desierto de Atacama y su división en nueve subcuencas

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 et al., 2020; Pino et al., 2019a,b; Pino, 2019; Pino et al., 2018; Pino et al., 2017; Garreaud et al., 2010; Garreaud et al., 2003) y, por tanto, lenta recarga hidrológica (Foster et al. 2003). 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.

La contaminación geogénica y el clima árido están asociados a 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 & Bhattacharya (2020) y Adhmi & Hamidreza (2016) con priorización espacial de las subcuencas; así también, Manfreda et al. (2014) ponderó tres enfoques geomórficos para la identificación de áreas propensas a inundaciones; y la evaluación de susceptibilidad por movimientos en masa (Secretaria 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 & Hamidreza (2016) determinaron cinco factores independientes en el rendimiento de sedimentos: fisiográfico, geológico, climático, uso de la tierra e hidrológico. Pacheco & Van der Weijden (2012, 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 & 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, 1990). El clima árido en una cuenca hidrográfica se relaciona a 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 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 et al., (2015) postuló que 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 períodos de sequía. La morfometría de una cuenca organiza espacialmente los depósitos que controlan la duración del anegamiento (Mourier et al., 2010). 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.

Coefficiente 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 a 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).

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 (Lc), propuesta por Schumm (1956).

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

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. (Jardi, 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	

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 es asociada con las edades de los ríos. En la Tabla 3, se muestra 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 proporcional 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 seleccionó parámetros que describen el comportamiento del flujo superficial y subterráneo.

Pendiente Media (Sc), 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 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

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).

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

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.

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

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; aquí 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, 2003); la distribución transversal al drenaje de la cuenca Caplina (NE-SO), posicionan 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 describe las formaciones que afloran en las subcuencas con mayor tendencia a la meteorización química; su variabilidad litológica, hidrogeoquímica e hidrogeológica. En las Tablas 6 y 7, se ponderan valores en base a la clasificación litológica, propiedades de almacenamiento y factores de medición cualitativa.

Caracterización hidrogeológica

En la cuenca Caplina, afloran intrusivos que modifican la permeabilidad y el comportamiento hidrogeológico de las formaciones geológicas; estas propiedades se relacionan al 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 y Llamas, 1983; García y Fernández, 2009). La ponderación por clasificación hidrogeológica y propiedades físicas se muestra en la Tabla 6.

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

CLASIFICACIÓN HIDROGEOLOGICA	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

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 la origen litológico y composición geoquímica.

Tabla 7. Ponderación de origen y clasificación litológica

LITOLOGÍA Y ORIGEN	PESO
Sedimentaria volcánica /calcárea	3
Sedimentaria aluvial	2
Plutónica	1
Metamórfica	0

Resultados

Comportamiento hidrológico en la morfometría

Los histogramas de precipitación de 6 estaciones meteorológicas en la cuenca Caplina; presentadas 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 es (65-165 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)

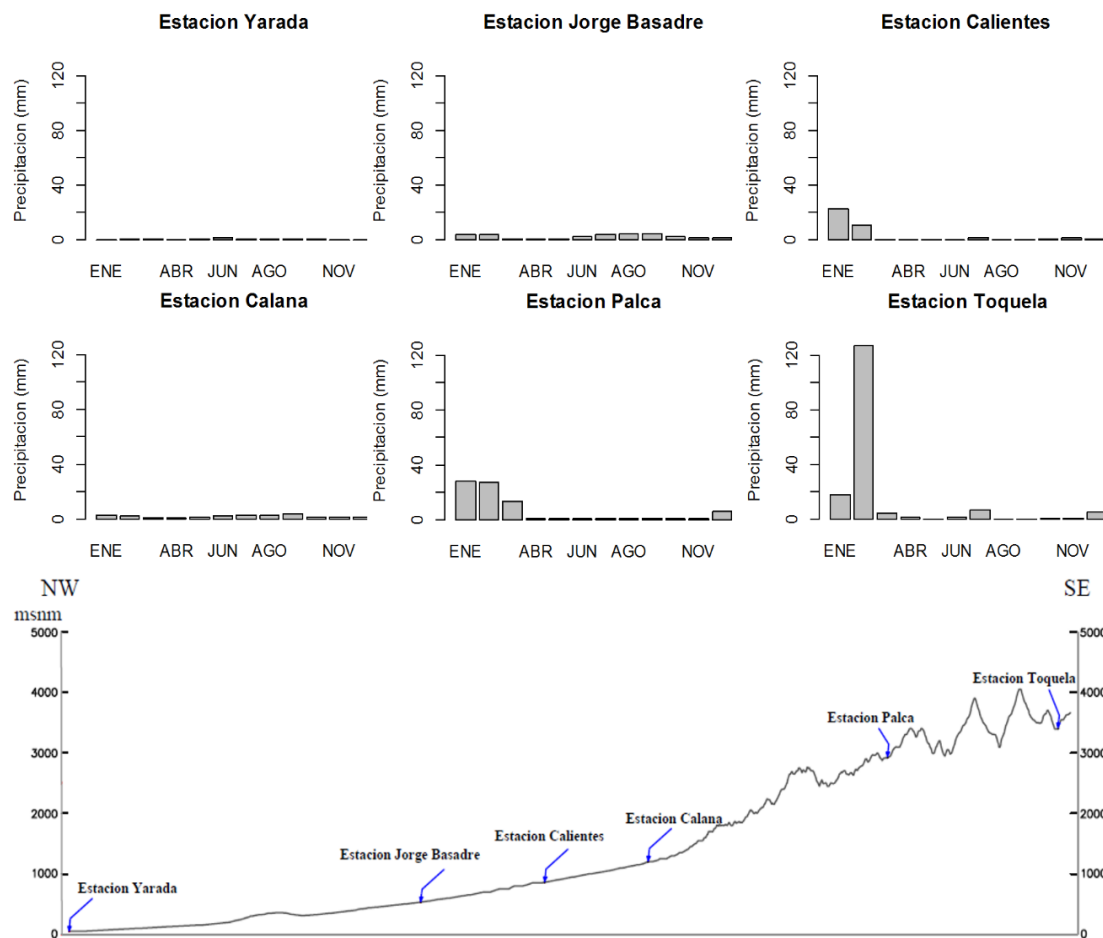


Figura 2. Histogramas de precipitación en las estaciones representativas en la cuenca durante 2019 - 2020

En contraste en el mapa de isoyetas (Figura 3), la precipitación anual varía entre 0 - 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.

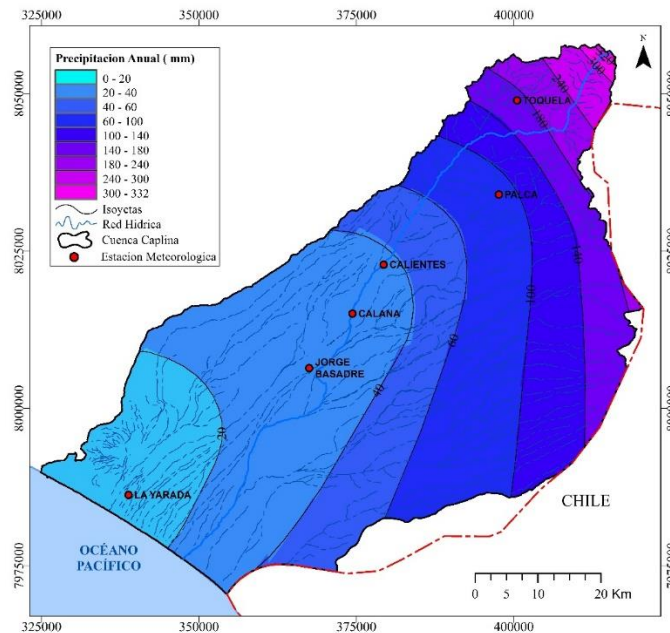


Figura 3. Isoyetas de precipitación en la cuenca Caplina

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.

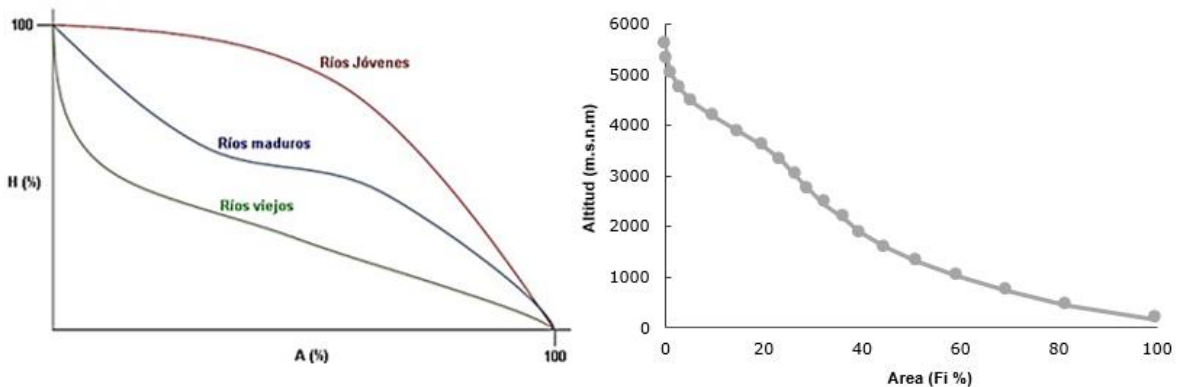


Figura 4. (a) Curva hipsométrica típica (Strahler, 1952a) (b) Curva hipsométrica de la cuenca Caplina

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 1000 msnm, la pendiente es 3%, representando un relieve suave y en la parte alta de (NE), entre las cotas 1200 a 5400 msnm, es 32%, relieve fuertemente accidentado.

La ponderación de las pendientes es detallada en la Tabla 8, lo que permitió diferenciar los relieves de las subcuencas, donde destaca la subcuenca Magollo de relieve suave; en tanto las demás subcuencas con mayor velocidad de flujo superficial al ser accidentadas y fuertemente accidentadas.

La densidad de drenaje de la cuenca es 0.72 Km^{-1} , representando 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.

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

	PARAMETROS MORFOMÉTRICOS	SIMBOLOGIA	UNIDADES	CUENCA CAPLINA	SUBCUENCAS										
					HONDA	MAGOLLO	CAPLINA	UCHUSUMA	LOS MOLLES	CAUÑANI	HOSPICIO	ESPIRITUS	ESCRITOS		
INDICES DE RECARGA	(i). Forma de la cuenca	COEFICIENTE DE COMPACIDAD Por Gravelius (1914)	Kc	-	1.83	3.82	2.17	2.23	2.26	2.61	2.20	2.62	1.99	2.44	
		CLASIFICACIÓN de Kc por Gaspari (2014)	Kc	-	Alargada	Alargada	Alargada	Alargada	Alargada	Alargada	Alargada	Alargada	Alargada	Alargada	Alargada
		Escoger menores (valor:1)	-	-	-	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0
		RELACION DE ELONGACION Por Schumm (1956)	Re	-	0.70	0.24	0.44	0.39	0.39	0.33	0.40	0.34	0.40	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	Muy alargada
	Escoger mayores (valor:1)	-	-	-	0	1	1	1	0	1	0	1	1	0	
	(ii). Relieve	CURVA HIPSOMETRICA Strahler,(1952)	-	-	Ríos maduros	Ríos viejos	Ríos maduros	Río maduro	Río maduro	Río joven	Río joven	Río joven	Río maduro	Río maduro	
		Ponderar con Tabla 2 (Strahler,1952)	-	-	-	3	2	2	2	1	1	1	2	2	
	INDICES DE FLUJO	(iii). Red de drenaje	PENDIENTE MEDIA (Horton, 1945)	Sc	%	27.02	21.19	10.57	37.78	32.83	27.02	30.39	33.78	37.67	34.80
			CLASIFICACIÓN de Sc por Ortiz (2004)	-	-	Fuertemente accidentado	Fuertemente accidentado	Medianamente accidentado	Muy fuertemente accidentado	Fuertemente accidentado	Fuertemente accidentado	Fuertemente accidentado	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)			Dd	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 Dd por Delgadillo y Páez (2008)					Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
Escoger menores (valor:1)					-	2	2	3	2	3	2	2	2	2	3
PONDERACIÓN POR SUBCUENCAS					8	11	9	8	7	8	5	8	7		

De acuerdo a 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 et al., 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 et al., 2009).

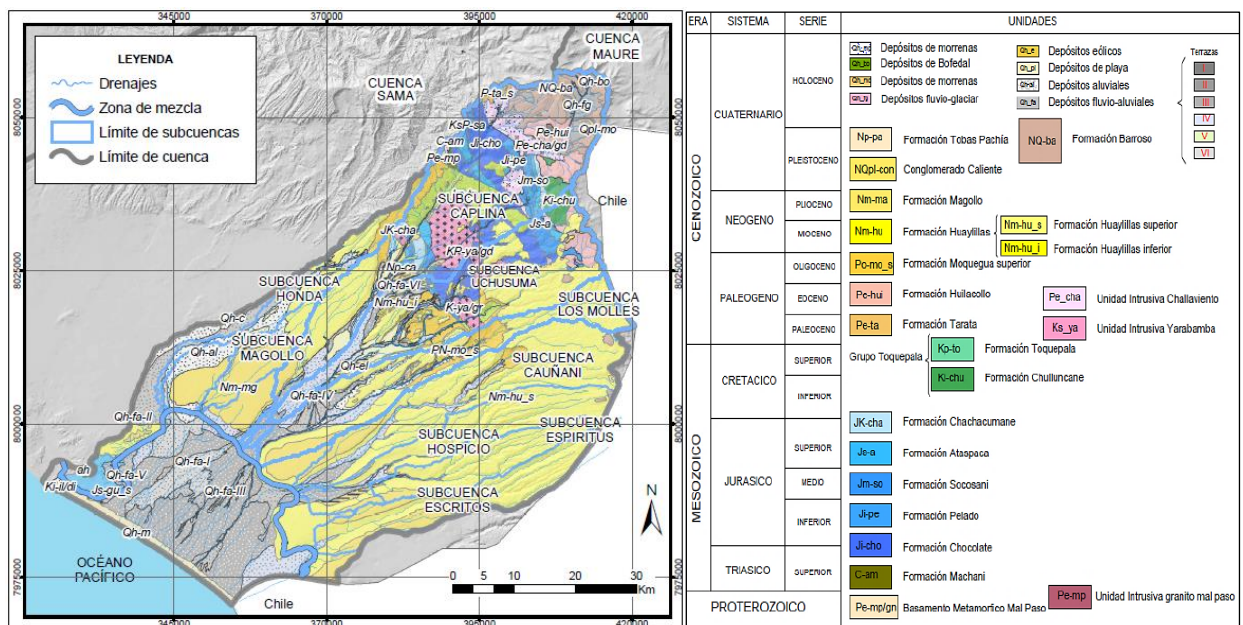


Figura 5. Mapa geológico y estructural de la cuenca Caplina en escala 1:750,000. Modificado de Peña et al., (2009)

Las formaciones geológicas aflorantes en la Subcuenca Caplina, son descritas 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 acuicludo 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 Filossilicato (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. Su 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 metamorfozada, 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 a 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 proveniente 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. Constituyen en la zona de alimentación y recarga importante de la Cuenca Caplina. Clasificado como acuífero fisurado volcánico

Los intrusivos que afloran en la subcuenca Caplina son descritas a continuación.

Unidad Yarabamba, constituida por rocas plutónicas, granodiorita y dioritas, intruyen a las formaciones sedimentarias Pelado y San Francisco. (Wilson & García, 1962). Generan 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 es clasificado 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, conformado por conglomerados arenos limosos. 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. Las tablas (6 y 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 et al 2010)	Minerales alterables	Alteración superficial (Acosta et al 2010)	Clasificación Hidrogeológica (Peña et al 2009)	Susceptibilidad a salinizar
Caplina	Unidad intrusiva Yarabamba	Granodiorita y dioritas	-	Hidrotermal	Acuitardo intrusivo	ALTA
		1	-	3	3	7
	Unidad intrusiva Challaviento	Granodiorita y sienogranitos	-	Hidrotermal propilítica	Acuitardo intrusivo	ALTA
		1	-	3	3	7
	Basamento metamórfico Mal paso	Gneis, ortogneis granítico o granodiorítico.	-	-	Acuicludo	BAJA
		0	-	-	0	0
	Grupo Ambo	Conglomerados, con cuarzo, lutitas negras con areniscas calcáreas.	Calcita, Feldespatos plagioclasas	-	Acuífero fisurado	MEDIA
		3	-	-	2	5
	Formación Junerata Volcánico chocolate	Andesitas basálticas y conglomerados	-	-	Acuitardo sedimentario	MEDIA
		3	-	-	3	6
	Formación Pelado	Conglomerados, lutitas y calizas silicificadas.	Calcita y cuarzo	-	Acuitardo sedimentario	MEDIA
		2	-	-	3	5
	Formación San Francisco Socosani	Areniscas calcáreas, conglomerados y calizas.	Calcita	-	Acuífero fisurado	MEDIA
		3	-	-	2	5
	Formación Ataspaca	Areniscas grises y lutitas oscuras y niveles de margas.	Calcita	-	Acuífero fisurado	MEDIA
		3	-	-	2	5
	Formación Chachacumane	Areniscas cuaríticas grises y niveles de lutitas	-	Argílica débil	Acuífero fisurado	ALTA
		3	-	2	2	7
	Formación Chullucane	Conglomerados con clastos andesíticos y grawacas	Plagioclasa	Argílica débil	Acuífero fisurado	ALTA
		3	-	2	2	7
Formación Toquepala	Riolita y andesita con lentes de areniscas y conglomerados.	Feldespatos plagioclasas	-	Acuífero fisurado	MEDIA	
	3	-	-	2	5	
Formación Tarata	Brechas y derrames andesíticos, con niveles de areniscas y lutitas.	Plagioclasa	-	Acuitardo	MEDIA	
	3	-	-	3	6	
Formación Huilacollo	Brechas andesíticas, tobas dacíticas riódacítica	Plagioclasa feldespatos	Hidrotermal	Acuífero fisurado	ALTA	
	3	-	3	2	8	
Conglomerado Calientes	Conglomerados polimícticos	-	-	Acuífero fisurado	BAJA	
	2	-	-	2	4	
Volcánico Barroso	Tufos y lavas traquíticas y andesita.	Plagioclasas feldespatos	Hidrotermal sectorizado	Acuífero fisurado	ALTA	
	3	-	2	2	7	
Magollo	Formación Moquegua	Conglomerados arena limosa	-	-	Acuífero fisurado	BAJA
		2	-	-	2	4
	Formación Huaylillas Inferior	Tobas, riolíticas y riódacíticas	-	-	Acuitardo	MEDIA
		3	-	-	3	6
	Formación Magollo	Conglomerados y areniscas grises oscuras	Feldespatos	-	Acuífero fisurado	BAJA
		2	-	-	2	4

Discusión

Análisis morfométrico y geológico

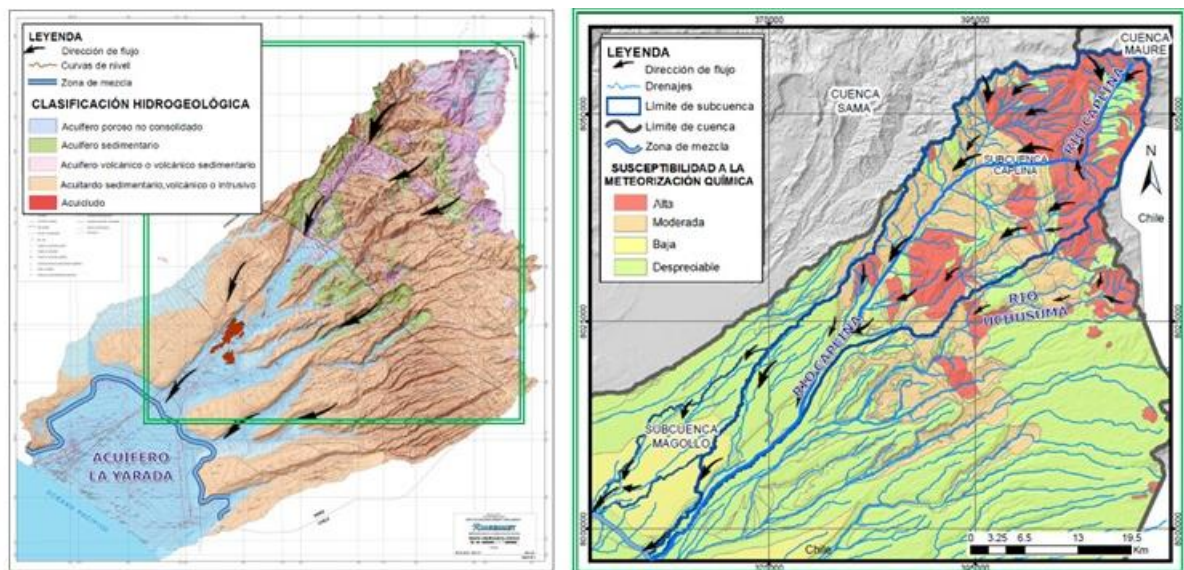
La ponderación morfométrica en la cuenca Caplina presenta un comportamiento hidrológico diferente al obtenido en forma individual para cada subcuenca afluente (Tabla 8), por lo que se interpretan las valoraciones en cada una de las 9 subcuencas afluentes.

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, período en el que se dispone de registros en las estaciones meteorológicas de la región.

Los modelos de Pacheco & Van der Weijden (2012, 2014) y Rajbanshi & 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 10000 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 a Baja y despreciable para las formaciones aflorantes en subcuencas menos favorables para la meteorización. El análisis inicial del Mapa de Susceptibilidad (Figura 6), nos 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 & Van der Weijden (2012, 2014), Adhami & Hamidreza (2016), Kanhaiya et al., (2019), Rajbanshi & Bhattacharya (2020), proponen factores de evaluación de susceptibilidad a la meteorización, sin considerar las alteraciones superficiales. Observándose en la Tabla 9 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 (Tablas 10, 11 y 12). Li et al. (2019) propone 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 través de las relaciones iónicas, las que fueron relacionadas a las unidades hidrogeológicas donde fueron tomadas las muestras (Figuras 7 y 8).

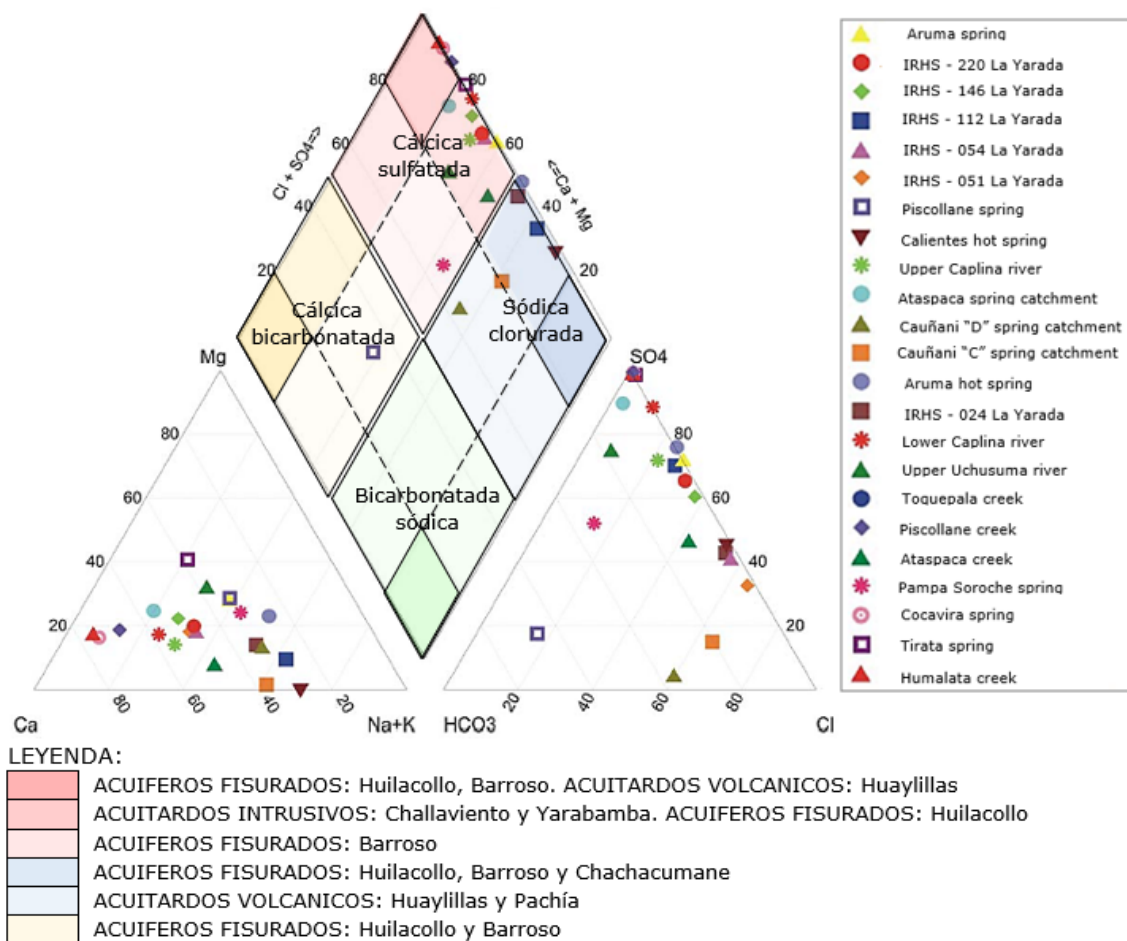
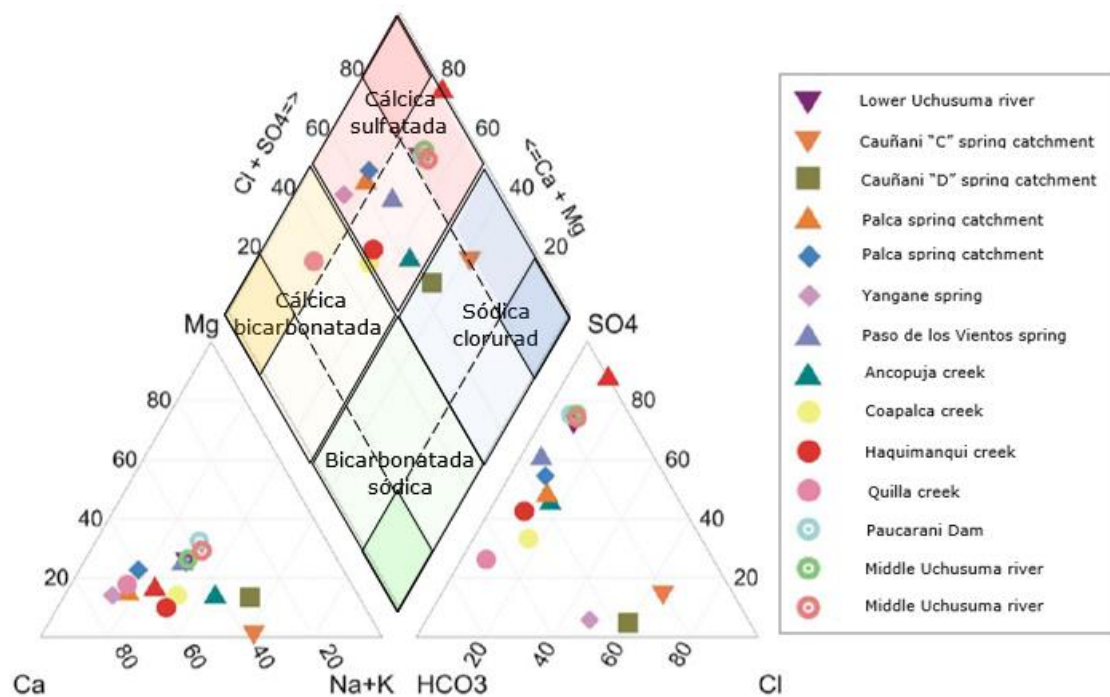


Figura 7. Diagrama de Piper en la subcuenca Caplina. Modificado de Peña et al. (2009)

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 la meteorización química.



LEYENDA:

	ACUITARDOS INTRUSIVOS: Yarabamba. ACUIFEROS FISURADOS: Huilacollo
	ACUITARDOS VOLCANICOS: Huaylillas. ACUIFEROS FISURADOS: Huilacollo
	ACUITARDOS VOLCANICOS: Huaylillas y Pacha
	ACUIFEROS FISURADOS: Chulluncane, Huilacollo. ACUITARDOS INTRUSIVOS: Challaviento
	ACUITARDOS VOLCANICOS: Huaylillas y Toquepala.

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

Peña et al. (2009) identifica 4 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), relacionada a 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. Observándose 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) presente en los acuíferos fisurados de Huilacollo, Barroso, Chulluncane. En el proceso de mezcla del agua subterránea, agua meteórica y glaciar generan variación

estacional en la hidroquímica de las cuencas (Ansari et al., 2019). El anión bicarbonato provendría de un flujo locales de muy corto recorrido, están relacionados a la reacción del CO₂, provenientes de los poros del suelo.

La caracterización de los tres grupos es detallada en las tablas 10, 11 y 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.

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
RIO	Represa Paucarani	Maure	Deposito Fluioglaciár	Ca-Mg-Na-SO ₄		GEOTERMAL
RIO	Canal Uchusuma (C Blanco)	Uchusuma	Q-fa, Chocolate, Yarabamba	Ca-Mg-Na-SO ₄	Yarabamba	Acuitardo intrusivo
RIO	Río Uchusuma (Sector Higuera)	Uchusuma	Socosani, Chocolate, Yarabamba	Ca-Na-Mg-SO ₄		
RIO	Túnel Uchusuma	Uchusuma	Huilacollo	Ca-Mg-Na-SO ₄	Huilacollo	Acuífero fisurado
MANANTIAL	Paso de los Vientos	Uchusuma	Huilacollo, Huaylillas	Ca-Mg-Na-SO ₄ -HCO ₃		
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	Acuit. Intrusivo Acuíf. 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		
RIO	Captación Caplina	Caplina	Chachacumane, Socosani, Ataspaca	Ca-Na-SO ₄ -Cl	Chachacumane	
RIO	Río Caplina Parte baja	Caplina	Toquepala, Challaviento, Yarabamba	Ca-Na-SO ₄	Challaviento/ Yarabamba	Acuitardo 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	Acuitardo volcánico
POZO SUBTERRANEO	Quebrada Ancopuja	Uchusuma	Huaylillas	Ca-Na-SO ₄ -HCO ₃		
POZO SUBTERRANEO	IRHS - 220 Las Palmeras	Zona Mezcla	Q-fa	Ca-Na-SO ₄ -Cl		Aluvial
POZO SUBTERRANEO	IRHS - 146 Cooperativa 60	Zona Mezcla	Q-fa	Ca-Na-Mg-SO ₄ -Cl		Aluvial
RIO	Quebrada Humalata	Caplina	Tarata	Ca-SO ₄	-	Sedimentaria
RIO	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)

CODIGO	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	Acuitardo volcánico
MANANTIAL	Captación "C" Cauñani	Cauñani	Q-fa, Huaylillas, Pachia	Na-Ca-Cl-HCO ₃		
POZO SUBTERRANEO	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	Acuífero fisurado
MANANTIAL	Aguas Termales Aruma	Caplina	Huilacollo, Barroso, Huaylillas	Na-SO ₄ -Cl	Huilacollo/ Barroso	
POZO SUBTERRANEO	IRHS - 112 La Yarada	Zona Mezcla	Dep. Fluvio-aluviales (Q-fa)	Na-Ca-SO ₄ -Cl		Aluvial con Intrusión Marina
POZO SUBTERRANEO	IRHS - 054 Velasco Alvarado	Zona Mezcla	Dep. Fluvio-aluviales (Q-fa)	Ca-Na-Cl-SO ₄		
POZO SUBTERRANEO	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)

CODIGO	Punto de muestreo	Subcuenca	Geología local	TIPO DE AGUA	Fm. Geológica Dominante	Unidad hidrogeológica
MANANTIAL	Manante Yangane	Uchusuma	Chulluncane	Ca-Cl-HCO ₃	Chulluncane	Acuífero 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	Acuitardo intrusivo
MANANTIAL	Quebrada Coopalca	Uchusuma	Moquegua, Huaylillas	Ca-Na-HCO ₃ -SO ₄	Huaylillas	Acuitardo volcánico
MANANTIAL	Quebrada Haquimanqui	Uchusuma	Toquepala, Moquegua, Huaylillas	Ca-Na-HCO ₃ -SO ₄		

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 reciben 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 acuitardos intrusivos. El patrón asociado a 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 entrampamiento 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 consigue identificar las características de las subcuencas con mayor recarga histórica: poseen forma oblonga con coeficiente de compacidad (>2.25) y la relación de elongación (>0.39), la 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.

Referencias

Acosta, H., Alván, A., Mamani, M., Oviedo, M. & J. Rodríguez (2010). Geología de los cuadrángulos de Pachía (36-v) y Palca (36-x), escala 1:50 000. INGEMMET, Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, 139, 100p., 7 mapas.

Adhami, M. & Hamidreza S. (2016). Sub-watershed prioritization based on sediment yield using game theory. *Journal of Hydrology*, 541(B), 977-987. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.08.008>.

ANA (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. <https://doi.org/10.1007/s12594-019-1346-y>.

Bransford, J. & Stein, B. (1987). Trad Cast: solución ideal de problemas. Madrid: 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: Talleres Gráficos Alonso.

Custodio, E. (1992). Study & modelling of saltwater intrusion into aquifers. Barcelona.

Custodio, E. & Llamas, M. (1983); Hidrología Subterránea; Ediciones Omega. Tomo I y II. Barcelona

Delgadillo, A. & Páez, G. (2008). Aspectos hidrológicos, subcuencas susceptibles a crecidas, escenarios de riesgo. En C. Ferrer & M. Duarte (Eds.). (2008). 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: FUNDAPRIS.

Foster, Stephen & Tuinhof, Albert & Kemper, Karin & Garduno, Hector & Nanni, Marcella. (2003). Characterization of Groundwater Systems - key concepts and frequent misconceptions.

García M. y Fernández A., (2009). Hidrogeología básica. Las aguas subterráneas y su flujo (3º edición). Ediciones FIEC, 135 pág.

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. <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. [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, Elsevier.

Henao, J. (1988). *Introducción al manejo de cuencas hidrográficas*. Bogotá: Universidad Santo Tomás.

Horton, R. (1932). Drainage basin characteristics. *Transactions of the American Geophysical Union*, nº 13, pp. 350-361.

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*, Nº XIX, pp. 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. <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). <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. <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 REGION. Universidad de Chile.

Monge, R.; Cervantes, J. (2000). Memoria explicativa de la Geología del Cuadrángulo de Pachía y Palca (36-v). Instituto Geológico Minero y Metalúrgico: 11 p. Lima.

Motta (1990). Agua y conflictos en el valle del Caplina (Tacna) Siglos XVI – XIX

Mourier, B., Walter, C., & Merot, P. (2008). Soil distribution in valleys according to stream order. *CATENA*, 72(3), 395–404. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.07.012>

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, 152 p.

Ortiz, O. (2004). Evaluación hidrológica. *Hidrored*, (1), 1-7.

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, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.019>.

Pacheco, F., Van der Weijden, C. (2014). Role of hydraulic diffusivity in the decrease of weathering rates over time. *J. Hydrol.* 512, 87–106. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.02.041>.

Peña, F., Cotrina, G & Acosta, H. (2009). Hidrogeología de la Cuenca del Río Caplina, Boletín N° 1, INGEMMET. Lima, Perú.

Proyecto Especial Tacna, PET (2013) Registro de campaña de muestreo hidroquímico en el acuífero La Yarada. Gobierno regional de Tacna.

Pino V., E., Ramos F., L., Mejía M., J., Chávarri V., E., & Ascencios T., D. (2020). Medidas de mitigación para el acuífero costero La Yarada, un sistema sobreexplotado en zonas áridas. *Idesia (Arica)*, 38(3), 21–31. <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. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292019000400055>.

Pino, Edwin, 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. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-05-07>.

Pino, Edwin, 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. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-06-06>.

Pino V., 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. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292019000300039>.

Pino V., E., Chávarri V., E., & Ramos F., 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. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292018005001301>.

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. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124935>

Sánchez, F. (2017). Hidrología Superficial y Subterránea. Createspace Independent Pub., 414 pp.

Secretaria de Gestión de Riesgos. (2015). Propuesta Metodológica para el Análisis de Amenaza por Movimientos en Masa. Quito, Ecuador.

Schumm, S. (1956). The evolution of drainage systems and slopes in badlands at Pearth Amboy, New Jersey. Bulletin of the Geological Society of America, N° 67, pp. 597-646.

Strahler, A. (1952a). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. Bulletin of Geological Society of America. N° 63, pp. 1117-1142

Strahler, A. (1952b). Hypsometrie analysis of erosional topography. Bulletin of Geological Society of America. N° 63, pp. 923-938.

Strahler, A. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. Trans. Am. Geophys Union 38, 913-920. DOI: 10.1029/TR038i006p00913

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

Wilson, J., & García, W. (1962). Geología de los cuadrángulos de Pachia y Palca Hoja 36v y 36x. 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.

<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.07.005>Toda la bibliografía debe estar referenciada en el cuerpo principal del doc

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

Alissa Vera¹

Mahendra P. Verma²

Edwin Pino³

German Huayna⁴

¹Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú, averam@unjbg.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0003-0939-6315>

²Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, Reforma 101, Col. Palmira, Cuernavaca, Morelos, México. Actual Affiliation: Universidad Politécnica de Nochixtlán "Abraham Castellanos", Carretera a San Mateo Etlatongo km. 2.5, Asunción Nochixtlán, Oaxaca, México, mpv55.mx1@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6559-7184>

³Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú, epinov@unjbg.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0001-7432-4364>

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

Corresponding author: Alissa Vera, averam@unjbg.edu.pe

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 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.

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 fueron analizados 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.

Introduction

The current state of knowledge leads to interrelate the topography and drainage of rivers together with the mineralogical and geochemical texture on the transport of sediments, which experience weathering in basins variable to climatic conditions (Kanhaiya et al., 2019). The mass balance based on the cation calculation by Li et al. (2019) shows that weathering by silicates, carbonates, atmospheric contributions, and anthropogenic factors contribute to the dissolved load in river water. This natural increase is also attributable to transport through lithologies of particular mineralogical composition, temperature of the geological medium, contact time, and length of travel (Custodio & Llamas, 1983; Molina, 2005). Likewise, the mixing process of groundwater, meteoric, and glacier water puts footprints of the seasonal variation in the hydrochemistry of the basins (Ansari et al., 2019).

The Caplina basin corresponds to a hydrographic unit on the Pacific slope in Southern Peru. The salinization process in the surface and underground water of the basin exposes an excess of heavy chemical elements such as As, Hg, Pb in its primary channel (Pino et al., 2017; ANA, 2011). Hydrothermal emanations generate geogenic contamination in the NE of the basin identified as a recharge zone. (Pino et al., 2017, Pino et al., 2019a).

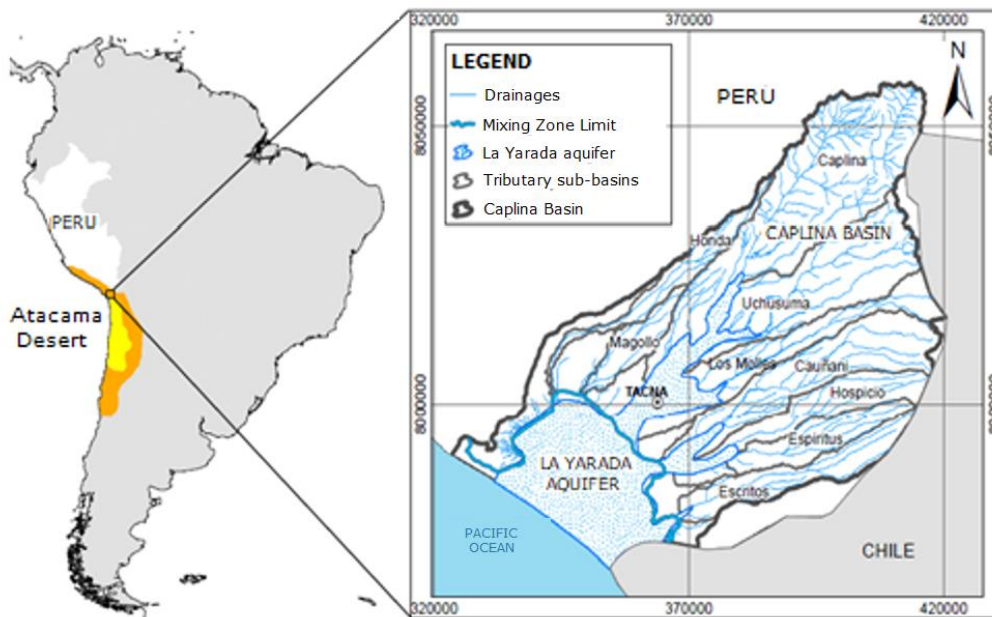


Figure 1. Location of the Caplina river basin in the Atacama Desert and its division into nine sub-basins

In Figure 1, the basin's location is observed at the head of the Atacama desert, in the extreme South of Peru and north of Chile. This region has a hyper-arid climate, and its hyper aridity is attributed to its subtropical location (Pino et al., 2020; Pino et al., 2019a,b; Pino, 2019; Pino et al., 2018; Pino et al., 2017; Garreaud et al., 2010; Garreaud et al., 2003) and, therefore, there exists a slow hydrological recharge (Foster et al. 2003). The low flow velocity predisposes the chemical reactions in the water-rock contact and induces some erosion of sediments. The water-rock interaction becomes the leading salinizing agent; therefore, sediment erosion is not taken into account in the present case study.

The geogenic contamination and arid climate are associated with the natural salinization in the sub-basins of the Caplina River. The present study aims to formulate a heuristic methodology to classify the susceptibility to chemical weathering in the Caplina basin from two approaches: morphometric and hydrogeochemical.

The heuristic method weights variables to estimate vulnerability and susceptibility; applied in the quantification of the danger of soil erosion proposed by Rajbanshi & Bhattacharya (2020) and Adhami & Hamidreza (2016) with spatial prioritization of the sub-basins. Additionally, Manfreda et al. (2014) weighed three geomorphic approaches for identifying flood-prone areas; and the evaluation of

susceptibility to mass movements (Secretaria de Gestión de Riesgos, 2015). Thus, the weighting mechanism is principally formulated on the morphometric, hydrogeological, and hydrogeochemical analysis against the salinization process of the flow by chemical weathering in the Caplina basin.

Materials y methods

Adhami & Hamidreza (2016) determined five independent factors in sediment performance: physiographic, geological, climatic, land use, and hydrological. Pacheco & Van der Weijden (2012, 2014) proposed a weathering algorithm that integrates topographic, hydrological, rock structure, and chemical data to calculate basin-scale weathering rates.

Considering the above factors, the weighing approaches of the Caplina basin were: morphometric and geological. Bransford & Stein (1987) proposed a morphometric heuristic method and described empirical rules to evaluate the effects of an activity.

Hydrological characterization

Rainfall recharge in the Caplina basin has been low for several decades (Motta, 1990). The arid climate in a hydrographic basin is related to a slow recharge regime (Foster et al., 2003); therefore, it is essential to study precipitation and its relationship with the morphometry of the sub-basins as a product of long-term recharge. The average annual

rainfall in the region is relatively low. In this sense, a map of isohyets of the Caplina basin was prepared with data from the National Meteorology and Hydrology Service of Peru (SENAMHI), interpolating 25 meteorological stations in the southern region.

Additionally, six representative stations were selected within the basin, and the variability of monthly mean precipitation is plotted through histograms.

Likewise, Zomlot et al. (2015) postulated that the recharge and surface flow variation conditions were influenced by the topography, slope, drainage area, precipitation, temperature, evapotranspiration, percentage of sand in the soil, and the type of land use. The morphometric parameters were calculated by recharge indices and flow indices to characterize the sub-basins hydrology.

Morphometric characterization and analysis

Strahler (1957) proposed morphometric analysis as complementary to precipitation analysis to predict the basin geometry effect on complex physical processes and hydrological behavior during the drought periods. The morphometry of a basin spatially organizes the deposits that control the duration of waterlogging (Mourier et al., 2010). During the flow, the water produces physical (erosion) and chemical (hydration, hydrolysis, oxide reduction) weathering, causing the dissolution of the rocks (Pino et al., 2017; Catalan, 1981).

For the sectorized morphometric analysis, the Caplina basin was divided into nine tributary sub-basins: Honda, Magollo, Caplina, Uchusuma, Los Molles, Cauñani, Hospicio, Espíritus y Escritos (Figure 1); using the digital elevation model (DEM) with a resolution of 12.5 m per pixel (Shuttle Radar Topography Mission, NASA).

The morphometric parameters were grouped into classes, with weights from 0 to 7. The value 0 indicates the lowest incidence, whereas the

value 7 represents the highest incidence to recharge or water-rock contact.

Morphometric recharge indices

For the determination of the recharge indices, the morphometric parameters that allow identifying the drained areas with the highest recharge in a basin were selected; this provides evidence of its magnitude reflected in the shape of the basin and in the thousands of years in which these processes occurred.

Compactness Coefficient (K_c) relates the perimeter (P) of the basin with that of the theoretical circle of area (A) equivalent to the basin area (Gravelius, 1914).

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

According to Gaspari et al. (2012), K_c is closely related to the concentration times, and it classifies the shape of the basin (Table 1).

Table 1. Weighting by compactness coefficient classification (Gaspari et al., 2012; Ortiz, 2004).

SHAPE CLASSIFICATION	K _c	WEIGHT
Almost round to oval-round	1 - 1.25	4
Oval-round to oval-elongated	1.25 - 1.5	3
Elongated-oval to oblong-rectangular	1.5 - 1.75	2
Rectangular	1.75 - 2.25	1
	> 2.25	0

The compactness is directly related to the occurrence of floods. An elongated basin will be less likely to generate floods than a compact area with a higher form factor (Henao, 1988).

Elongation Ratio (Re) is a relation between the circle diameter of the equivalent basin area (d) and maximum length of the main channel of the basin (Lc), proposed by Schumm (1956).

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

Values lower than unity imply elongated shapes (Tabla 2); small Re supports the elongated basin form (Jardí, 1985).

Table 2. Weighting by elongation ratio classification. (Jardi, 1985).

RELATION	Re	FORM	WEIGHT	
Lc < d	< 1	< 0.25	Very elongated	0
		> 0.25	Elongated	1
Lc > d	= 1	Oval	2	
Lc = d	> 1	Round	3	

Curva Hipsométrica represents the drained area as a function of the altitude of the basin surface. According to Strahler (1952a), the curve shape is associated with the ages of the rivers. Table 3 shows the values for the weighting of rivers according to their age from their hypsometric classification. The oldest channels will have greater weight, as they are proportional to the historical recharge time.

Table 3. Weighting by the age of rivers from the shape of their hypsometric curve

RIVER AGE	WEIGHT
Young river	1
Mature river	2
Old river	3

Morphometric indices of surface flow velocity

These indices provide information on the speed of surface runoff (Strahler, 1952b; Camino et al., 2018). If the runoff velocity decreases, the flow has more significant contact with the lithofacies. Therefore, parameters that describe the behavior of the surface and underground flow were selected.

Average slope (Sc) influences the behavior of the main channel. The steeper basins tend to respond more quickly to rainfall by increasing their flows (Horton, 1945). It is calculated with the following formula, where $\sum Li$ is the sum of the lengths of the contour lines (km), E the equidistance between unevenness curves (km), and A the surface of the basin (km²).

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

In turn, the slope represents the variability of the reliefs classified by Ortiz (2004). The mountainous reliefs cause rapid transport of rock fragments by physical erosion (Pino et al., 2017), which causes a reduced time for complete chemical disintegration. Therefore, in Table 4, the slopes that favor the water-rock interaction are weighted with a higher value.

Table 4. Weighting of the relief according to average slope and type of relief, modified after Ortiz (2004).

AVERAGE SLOPE (%)	TYPE OF RELIEF	WEIGHT
0-3	Flat	7
3-7	Gentle	6
7-12	Moderately rugged	5
12-20	Hilly	4
20-35	Heavily rugged	3
35-50	Very heavily rugged	2
50-75	Steep	1
>75	Very steep	0

Drainage density (Dd) is established based on the total length of the watercourses in the basin (Li) y and their total area (A).

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

Camino et al. (2018) point out that the runoff time is shorter for ion exchange between the flow and the geological formation for basins with higher drainage density.

Table 5. Weighting of drainage density after Delgado y Páez (2008).

DRAINAGE NET	DRAINAGE DENSITY (km ⁻¹)		WEIGHT
Short	< 1	< 0.5	3
		> 0.5	2
Moderate	1-2		1
High	> 2		0

Geological characterization

The flow stays longer in the soil; its salinity will be higher (Sánchez, 2017). However, the effect is relative. Water in contact with sodium chloride for a few hours will be more saline than another sample in contact with quartz for years; here, the importance of the geology of the terrain through which the underground flow passes.

In the northeast of the Caplina basin, NW-SE directional structural controls predominate, as a result of the Andean deformation (Monge & Cervantes, 2003 the transversal distribution to the drainage of the Caplina basin (NE-SO), position the controls as a conditioning structure for the storage of water infiltrated by precipitation. The infiltration is directed by the Caplina lineament (NE-SW) towards a mixing zone of the tributary sub-basins (Figure 1), conditioned by the Molles-Magollo lineament.

The geological characterization describes the emergence of sub-basins formation with a greater tendency to chemical weathering (i.e., lithology, hydrogeochemical and hydrogeological variability). In Tables

6 and 7, values are weighted based on lithological classification, storage properties, and qualitative measurement factors.

Hydrogeological characterization

In the Caplina basin, intrusive outcrops that modify the permeability and the hydrogeological behavior of the geological formations; These properties are related to the water-rock contact time, due to the retention of the flow in the pores. According to the capacity to store water (property of porosity) and its permeability, geological formations are classified into aquifers, aquitards, aquicludes, and aquifuges (Custodio y Llamas, 1983; García y Fernández, 2009). Table 6 shows the weighting factor by hydrogeological classification and physical properties.

Table 6. Weighting of physical properties in the water-rock contact, according to the hydrogeological classification.

HYDROGEOLOGICAL CLASSIFICATION	POROSITY	PERMEABILITY	WATER-ROCK CONTACT	WEIGHT
Aquitards	High	Low	High	3
Aquifers	High	High	Moderate	2
Aquicludes	High	Very low	Moderate	1
Aquifuges	Very low	Very low	Low	0

Geochemical characterization

The degree of water-rock interaction depends on a series of factors, such as hydraulic properties and local flow patterns, which are influenced by the lithology where the groundwater passes through, highlighting the presence of alterable minerals and surface alteration; Table 7 shows the weighting according to the lithological origin and geochemical composition.

Table 7. Weighting of origin and lithological classification

LITHOLOGY AND ORIGIN	PESO
Sedimentary volcanic/calcareous	3
Sedimentary alluvial	2
Plutonic	1
Metamorphic	0

Results

Hydrological behavior in morphometry

Figure 2 presents the precipitation histograms of six meteorological stations in the Caplina basin. The altitude of each station is also shown in the figure. The La Yarada station located in the basin delta is observed with very low to zero accumulated monthly precipitation

(maximum peak of 1 mm during June). The stations, located in the basin's middle area, register accumulated precipitation of 30 mm/year. Palca and Toquela stations situated at a higher altitude in the basin recharge zone, with annual accumulated precipitation is (65-165 mm/year). In the middle and upper area of the basin, the transcendental precipitation for the underground recharge of the basin occurs in the first months of the year (Figure 2)

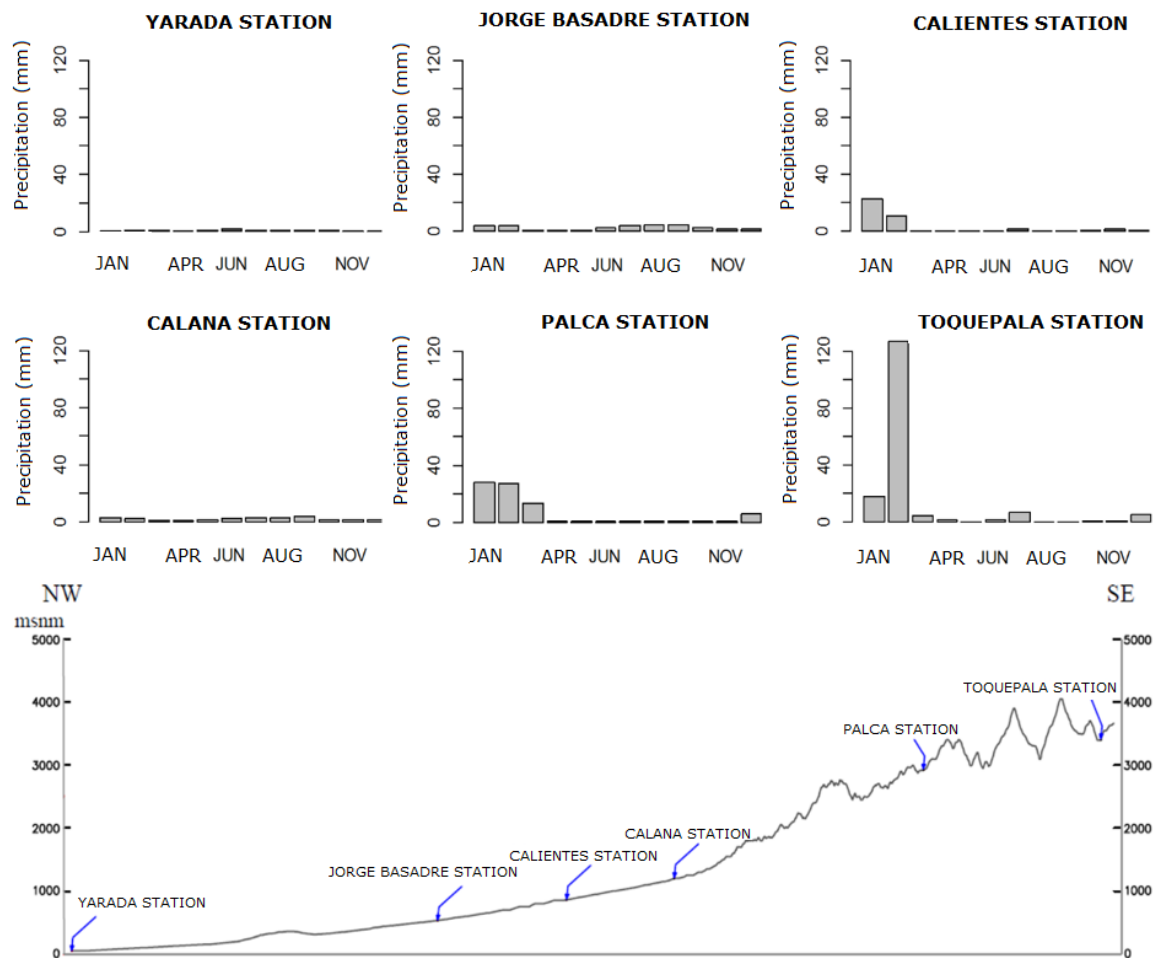


Figure 2. Precipitation histograms at representative stations in the basin during 2019 - 2020

In contrast, in the isohyets map (Figure 3), the annual precipitation varies between 0 - 330 mm. The distribution of the strips with the highest recharge is perpendicular to the NE-SW orientation of the

tributary sub-basins to the Caplina basin. In this sense, it is essential to have greater morphometric detail by sub-basin.

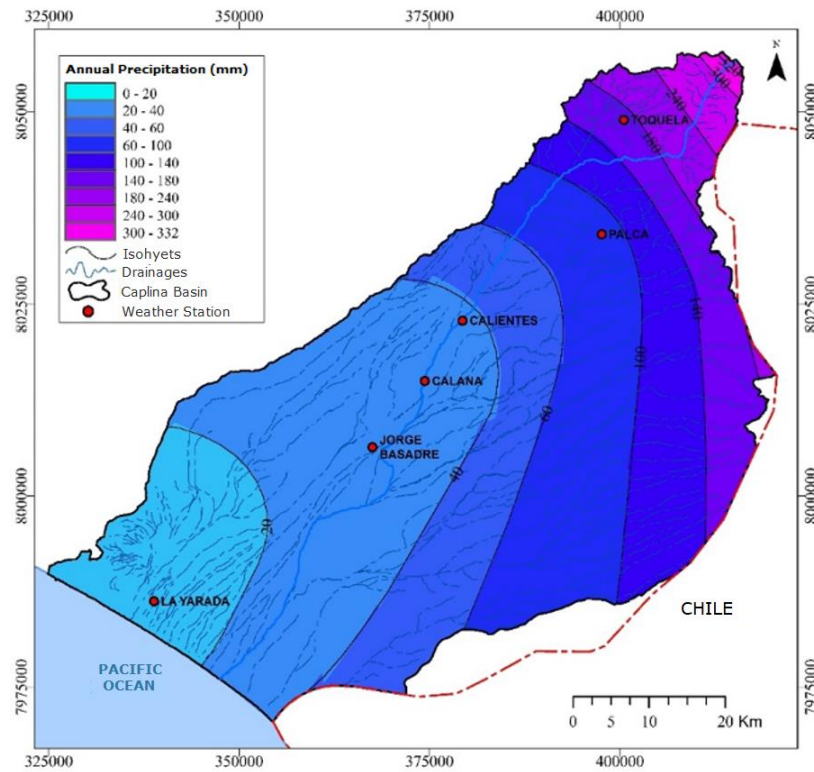


Figure 3. Precipitation isohyets in the Caplina basin

Sub-basin recharge

The compactness coefficient in the tributary sub-basins is more significant than 1.75, classifying them as elongated (Gaspari et al., 2012). The elongation ratio is less than unity, which confirms that the shape of the sub-basins is elongated (Jardí, 1985). In this sense, it is convenient to identify the highest values.

Figure 4(a,b) shows the typical hypsometric curves for different river sizes and the Caplina basin. Strahler (1952a) classified the main channel of the Caplina basin as mature.

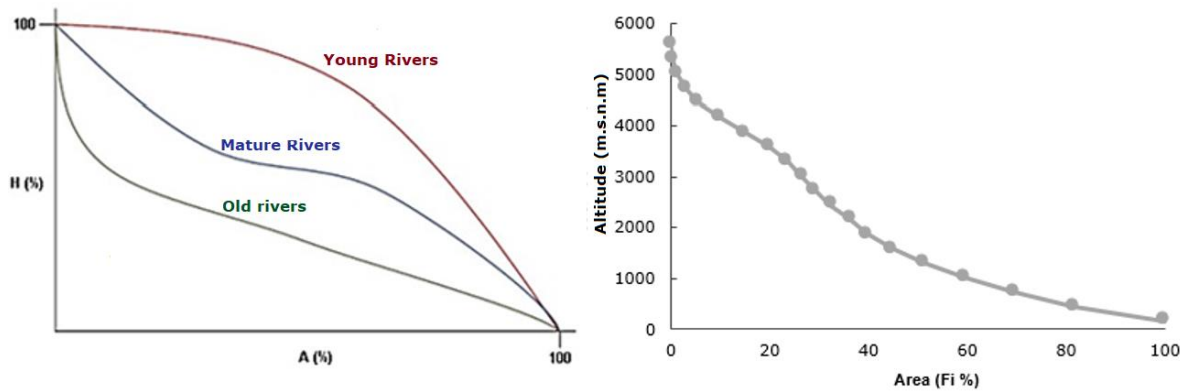


Figure 4. (a) Typical hypsometric curves (Strahler, 1952a) (b) Hypsometric curve of the Caplina basin

Runoff velocity and contact time

The slope of the basin presents a general decreasing trend in the NE-SW direction. In the lower part of the basin (SW) between 0 and 1000 masl, the slope is 3%, representing a smooth relief, and in the upper part of (NE), between the heights 1200 to 5400 masl, it is 32%, heavily rugged relief.

The weighting of the slopes is detailed in Table 8, which made it possible to differentiate the reliefs of the sub-basins, where the Magollo sub-basin of smooth relief stands out; while the other sub-basins with higher surface flow velocity as they are rugged and heavily rugged.

The drainage density of the basin is 0.72 Km^{-1} , representing a slow hydrological response. This relationship varies in the tributary sub-basins from 0.42 to 0.61 km^{-1} . The Caplina, Los molles, Espíritus and Escritos sub-basins present lower drainage densities.

Table 8. Weighting of morphometric parameters against chemical weathering

MORPHOMETRIC PARAMETERS		SYMBOLGY	UNITS	CAPLINA BASIN	SUB-BASINS										
					HONDA	MAGOLLO	CAPLINA	UCHUSUMA	LOS MOLLES	CAUÑANI	HOSPICIO	ESPIRITUS	ESCRITOS		
RECHARGE RATES	(i). Shape of the basin	COMPACITY COEFFICIENT by Gravelius (1914)	Kc	-	1.83	3.82	2.17	2.23	2.26	2.61	2.20	2.62	1.99	2.44	
		CLASSIFICATION of Kc by Gaspari (2014)	Kc	-	Elongated	Elongated	Elongated	Elongated	Elongated	Elongated	Elongated	Elongated	Elongated	Elongated	Elongated
		Choose minors (value:1)	-	-	-	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0
		ELONGATION RATIO by Schumm (1956)	Re	-	0.70	0.24	0.44	0.39	0.39	0.33	0.40	0.34	0.40	0.40	0.34
		Classification of Re by Jardí, (1985)	-	-	Elongated	Very Elongated	Elongated	Very Elongated	Very Elongated	Very Elongated	Very Elongated	Very Elongated	Very Elongated	Very Elongated	Very Elongated
		Choose majors (value:1)	-	-	-	0	1	1	1	0	1	0	1	1	0
	(ii). Relief	HYPSONETIC CURVE Strahler, (1952)	-	-	Mature rivers	Old rivers	Mature rivers	Mature rivers	Mature river	Young river	Young river	Young river	Mature river	Mature river	
		Weight with Table 2 (Strahler, 1952)	-	-	-	3	2	2	2	1	1	1	2	2	
	FLOW RATES	iii). Drainage network	MIDDLE SLOPE (Horton, 1945)	Sc	%	27.02	21.19	10.57	37.78	32.83	27.02	30.39	33.78	37.67	34.80
			CLASSIFICATION of Sc by Ortiz (2004)	-	-	Heavily rugged	Heavily rugged	Medium rugged	Very heavily rugged	Heavily rugged	Heavily rugged	Heavily rugged	Heavily rugged	Very heavily rugged	Heavily rugged
Weight with Table 3 (Ortiz, 2004)			-	-	3	3	5	2	3	3	3	3	2	2	
DRAINAGE DENSITY (Camino et al., 2018)			Dd	Km/Km ²	0.72	0.56	0.61	0.45	0.58	0.42	0.60	0.54	0.56	0.46	
CLASSIFICATION of Dd by Delgadillo y Páez (2008)			-	-	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
Choose minors (value:1)			-	-	-	2	2	3	2	3	2	2	2	2	3
WEIGHTING BY SUB-BASIN					8	11	9	8	7	8	5	8	7		

According to the indices shown in Table 8, the weighting of the morphometric parameters supports the potential of the sub-basins to generate chemical weathering. Therefore, based on the results of Table 8, it is defined that the geological analysis will only be carried out for the Caplina and Magollo sub-basins because they present the highest scores 9 and 11, respectively.

Geology and weathering in the Caplina sub-basin

In the Caplina sub-basin, most intrusives outcrop (Figure 5), generating hydrothermal alteration zones (Acosta et al., 2010); weathering in these areas produces dissolution of heavy chemical elements found in water. Also, in some springs, the minimum pH is 2.30 (Peña et al., 2009).

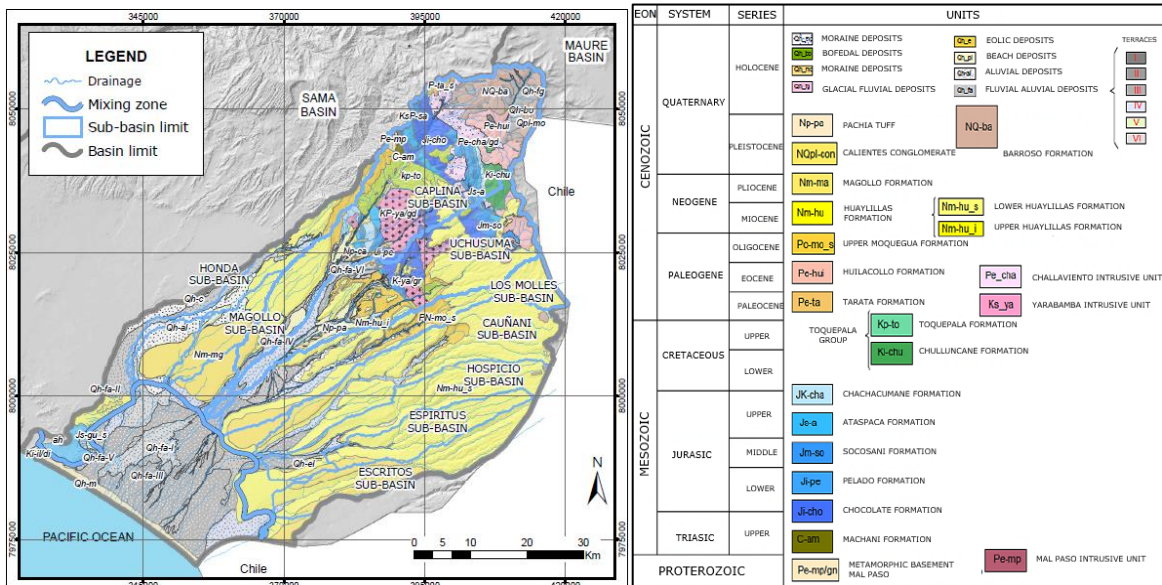


Figure 5. Geological and structural map of the Caplina basin at a scale of 1: 750,000 after Peña et al. (2009)

The outcropping geological formations in the Caplina Sub-basin are described below by age.

Mal Paso basement is made up of gneiss, granitic, and granodioritic orthogneiss; its metamorphic origin makes it little susceptible to alteration and weathering. It is superficially fractured, with low transmissibility, classified as an aquiclude, and low impact weighted to the salinization of the surrounding water.

Ambo Group is a sequence of conglomerates, black shales with calcareous sandstones. Calcite, feldspar, and plagioclase are prone to react on phyllosilicates. It behaves like a sedimentary fissured aquifer without surface alteration.

Junerata Formation is known as Volcánico Chocolate. It consists of andesitic lava spills and tuffs. Ferromagnesian minerals stand out from which it could be altered in Filossilicate (Chlorites). Presents superficial fractures, behaves like an aquitard.

Pelado Formation is made up of conglomerates, shales, and silicified limestone. The calcite coming from the shales will tend to dissolve in the erosive contact by the Caplina river; However, its silicified state would hinder any type of reaction, in addition to generating low permeability in fractures, classified as an aquitard.

San Francisco Formation is also denominated Socosani. It is made up of calcareous sandstones, conglomerates, and limestone. Its calcareous sedimentary nature, susceptible to calcite reaction. The waters circulating over this geological formation are crossed transversely by the Incapuquio fault, with high permeability. This unit corresponds to a sedimentary fissured aquifer.

Ataspaca Formation is a sequence of gray sandstones and dark shales with marl levels. Calcareous mineralogy, prone to dissolution. It is classified as a sedimentary fissured aquifer.

Chachacumane Formation is of gray quartzite sandstones with interspersed levels of shales. To be metamorphosed, the chemical reactions are focused on the hydrolysis of the superficial weak argillic alteration. In its outcrop, there are small upwellings of groundwater. It is classified as a highly fractured aquifer.

Chullucane Formation is conglomerates of andesitic clasts and gravels. Plagioclase would be the most likely mineral to react. In addition, it presents weak argillic alteration. This sedimentary volcanic formation behaves like a fissured aquifer.

Toquepala Formation is rhyolite and andesite interspersed with lenses of sandstones and conglomerates. It is classified as a fissured volcanic aquifer.

Tarata Formation is dominated by andesitic breccias and spills, with levels of sandstones and shales. It is classified as an aquitard due to

the porosity of the tuffs, with a prolonged flow, conditioning a more significant contact with minerals typical of the volcanic environment.

Huilacollo Formation is of andesitic breccia, dacitic tuff and riodacitic. The water that flows over this geological formation contributes As, B, and Al from a geothermal source (Pino et al., 2017). The acidic composition of water reacts with plagioclase and feldspars. It is classified as a fissured aquifer.

Hot Conglomerado is polymictic conglomerates that make up an essential part of the valley fill. Therefore, their deposits record the fluvial dynamics of the region's rivers. These characteristics confer it as a double porosity, cracked and porous aquifer.

Volcanic Barroso consists of tuffs and trachytic and andesitic composition lavas. It is interstratified with sediment banks and presents large areas of hydrothermal alteration, together with minerals of volcanic origin, rich in heavy elements that release Ca^{2+} , Na^+ , As, B, and Al ions. They constitute the vital feeding and recharge zone of the Caplina Basin. It is classified as a volcanic fissured aquifer.

The intrusives that emerge in the Caplina sub-basin are described below.

Yarabamba Unit is made up of plutonic rocks, granodiorite, and diorites, intrude on the Pelado and San Francisco sedimentary formations. (Wilson & García, 1962). They generate important mineralizations with hydrothermal alteration. The permeability occurs by fracturing; in some old galleries that the intrusive Yarabamba crosses, there is a flow of 0.2 l/s. It is classified as an intrusive aquitard

Unidad Challaviento is made up of granodiorite and sienogranites. The intrusion of the rock body generates propylitic hydrothermal alteration and is classified as an intrusive aquitard.

Geology and weathering in the Magollo Sub-basin

The Magollo sub-basin presents the most remarkable predisposition to rock dissolution due to chemical weathering at low flow velocity. Descending geological formations in ancient times are described.

Moquegua Formation is made of silty sand conglomerates. Its sedimentary and porous nature classifies it as a fissured aquifer and is characterized by consolidated fluvial sediments with medium permeability, corresponding to a sedimentary aquifer.

Huaylillas Formation is pinkish, rhyolitic tuffs, interspersed with thin layers of massive green sandstones. The permeability originates in its fractures, generating a potential dissolution zone. It is classified as a volcanic sedimentary aquitard.

Magollo Formation is of conglomerates and dark gray Feldspars sandstones. This porous sedimentary formation in the Magollo sub-basin is the most favorable for the storage of groundwater and is classified as a sedimentary porous fissured aquifer.

Susceptibility to chemical weathering

The geochemical and hydrogeological characteristics in the outcropping formations of the Caplina and Magollo sub-basins were described earlier. Table 9 presents a heuristical classification based on porosity, permeability, and lithology. Tables (6 and 7) state the weightage of their influence for the water-rock contact.

Table 9. Qualitative classification of susceptibility to chemical weathering

Sub-basin	Geological Formation	Lithology (Acosta et al. 2010)	Alterable minerals	Superficial alteration (Acosta et al. 2010)	Hydrogeological Classification (Peña et al. 2009)	Susceptibility to salinize
Caplina	Yarabamba intrusive unit	Granodiorite & diorites	-	Hydrothermal	Intrusive aquitard	HIGH
		1	-	3	3	7
	Unidad intrusiva Challaviento	Granodiorite & senogranites	-	Hydrothermal propylitic	Intrusive aquitard	ALTA
		1	-	3	3	7
	Basamento metamórfico Maspaso	Gneiss, granitic or granodioritic orthogneis.	-	-	Acuicludo	LOW
		0	-	-	0	0
	Ambo Group	Conglomerates, with quartz, black shales with calcareous sandstones.	Calcite, Feldspars & Plagioclase	-	Fissured aquifer	MEDIUM
		3	-	-	2	5
	Junerata Formation Chocolate Volcanic	Basaltic Andesites & conglomerates	-	-	Sedimentary aquitard	MEDIUM
		3	-	-	3	6
	Pelado Formation	Conglomerates, shales & silicified limestones.	Calcite & quartz	-	Sedimentary aquitard	MEDIUM
		2	-	-	3	5
	San Francisco / Socosari Formation	Calcareous sandstones conglomerates & limestone.	Calcite	-	Fissured aquifer	MEDIUM
		3	-	-	2	5
	Ataspaca Formation	Gray sandstone and dark shales & marl layers.	Calcite	-	Fissured aquifer	MEDIUM
		3	-	-	2	5
	Chachacumane Formation	Gray quartzitic sandstone & shale layers	-	Weak Argillic	Fissured aquifer	HIGH
		3	-	2	2	7
	Chullucane Formation	Conglomerates with andesitic clasts & gravitas	Plagioclase	Weak Argillic	Fissured aquifer	HIGH
		3	-	2	2	7
Toquepala Formation	Rhyolite and andesite with lenses of sandstones & conglomerates.	Feldspar Plagioclase	-	Fissured aquifer	MEDIUM	
	3	-	-	2	5	
Tarata Formation	Andesitic breccia & spills with levels of sandstones and shales.	Plagioclase	-	Aquitard	MEDIUM	
	3	-	-	3	6	
Huilacollo Formation	Andesitic breccia, riodacitic dacitic tuffs	Plagioclase Feldspar	Hydrothermal	Fissured aquifer	HIGH	
	3	-	3	2	8	
Hot Conglomerate	Polymictic conglomerates	-	-	Fissured aquifer	LOW	
	2	-	-	2	4	
Volcanic Barroso	Tufos & lavas trachytic and andesite.	Plagioclase Feldspar	Hydrothermal sectorized	Fissured aquifer	HIGH	
	3	-	2	2	7	
Magollo	Moquegua Formation	Silty sand conglomerates	-	-	fissured aquifer	LOW
		2	-	-	2	4
	Huayllillas Inferior Formation	Tobias, rhyolitic & riodacite	-	-	Aquitard	MEDIUM
		3	-	-	3	6
	Magollo Formation	Conglomerates & dark gray sandstones	Feldspar	-	Fissured aquifer	LOW
		2	-	-	2	4

Discussion

Morphometric and geological analysis

The morphometric weighting in the Caplina basin presents a different hydrological behavior, which was obtained individually for each tributary sub-basin (Table 8). The valuations in each of the nine tributary sub-basins are interpreted.

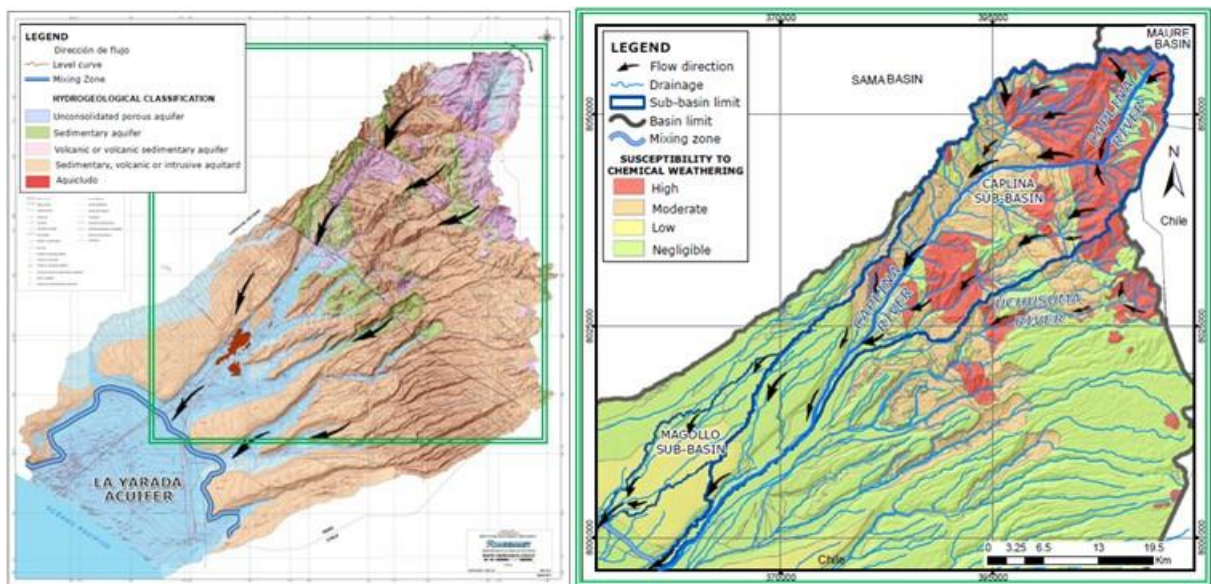
The increased weightings formed the Spirits and Writings sub-basins in the recharge indices; however, they are located in the driest area of the Caplina basin. Likewise, they decrease considerably in the hypsometric weighting curve. So, the age of the channel differs in the historical weighting recharge. The flow velocity indices give greater weight to the Magollo, Los Molles, Hospicio, and Escritos sub-basins due to the slow hydrological response, generating more residence time for chemical reactions. The Uchusuma sub-basin is the second-best weighted in recharge rates; however, it has a higher flow velocity that causes erosion and sediment transport, but not chemical weathering. The contrast of the recharge and velocity indices in the final weighting makes it possible to identify the Caplina and Magollo sub-basins with the most favorable conditions for chemical weathering.

The isohyet map delimits low mean annual precipitation in the Magollo sub-basin. However, the morphometric parameters indicate a higher recharge, infiltrated in the Moquegua formation until the Huaylillas volcanic event (lower Miocene, 25.3 ± 0.8 Ma). The pyroclastic material overlies the Moquegua formation. Likewise, we can infer that the average precipitation has decreased in the last 50 years, a period in which records are available in the meteorological stations of the region.

The models of Pacheco & Van der Weijden (2012, 2014) and Rajbanshi & Bhattacharya (2020) apply equations and algorithms to estimate erosion rates by flow with a circulation of 1.4 to 2.8 years. However,

the hyper-arid climate in the Caplina basin can generate a circulation time of 100 to 10,000 years and experience a moderate amount of weathering (Kanhaiya et al., 2019; Foster et al., 2003).

The qualitative weighting of the geology in Table 9 identifies hydrogeological units classified in three levels, whose degree of susceptibility to chemical weathering varies between High to Low and negligible for the outcropping formations in sub-basins less favorable for weathering. The initial analysis of the Susceptibility Map (Figure 6) shows us that the areas of most significant susceptibility are transversal to the main river in the basin, Río Caplina, and the drainage of the streams:



DEGREE OF SUSCEPTIBILITY TO CHEMICAL WEATHERING	
	HIGH SUSCEPTIBILITY (7 or more): Hydrothermalism in fissured aquifers and aquitards of intrusive origin, saturated, the most significant reaction occurs in disturbed areas.
	MEDIUM SUSCEPTIBILITY (5-6): Calcareous and sodium influence in volcanic aquitards and fissured aquifers with negligible permeability, favoring water-rock interaction in the pores of hydrogeological units.
	LOW SUSCEPTIBILITY (0-4): Fissured alluvial aquifers with favorable discontinuities for underground flow. Unconsolidated deposits favor sediment transport but not chemical reactions.
	DESPICABLE SUSCEPTIBILITY: Areas that receive low recharge and precipitation, where there is no evidence of surface alteration.

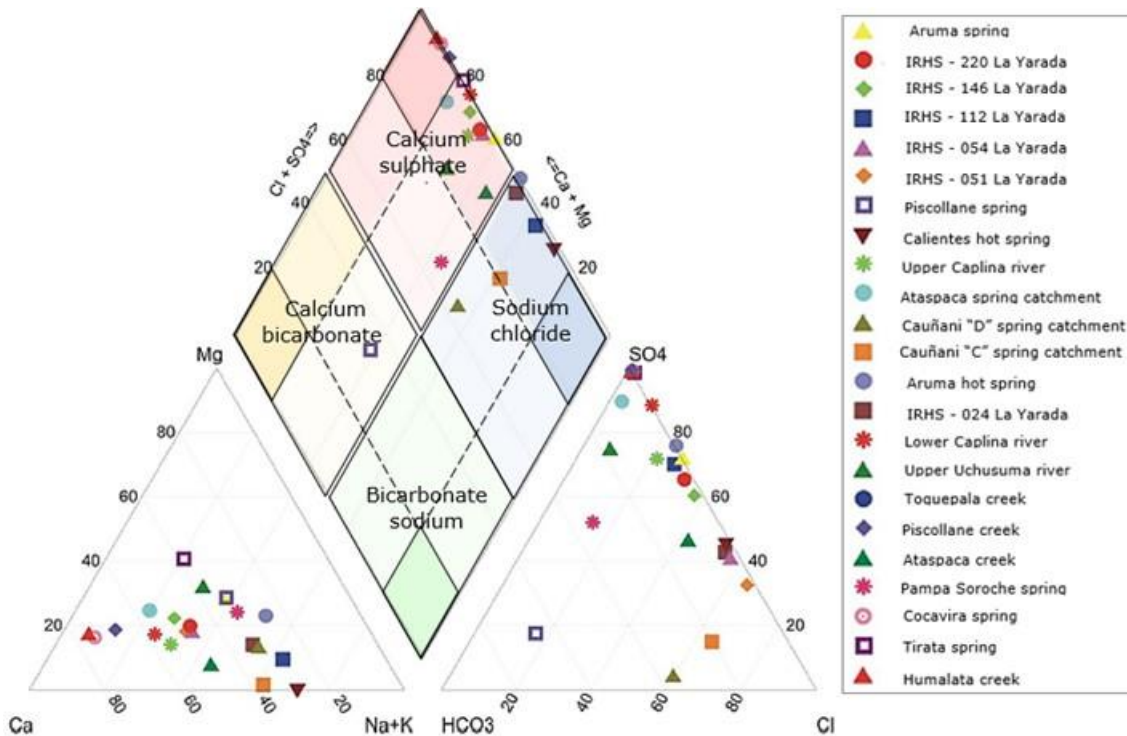
Figure 6. (a) Hydrogeological map of the Caplina basin after Peña et al. (2009). (b) Susceptibility map to chemical weathering in the Caplina basin recharge zone.

These units generate salinization with underground flow directed to the SW that recharges the La Yarada aquifer (Figure 6). Pino et al. (2019a) found it in the high electrical conductivity map of the Yarada aquifer. It will be further studied in the hydrogeochemical analysis.

Hydrogeochemical analysis

In the works of Pacheco & Van der Weijden (2012, 2014), Adhami & Hamidreza (2016), Kanhaiya et al. (2019), Rajbanshi & Bhattacharya (2020), they proposed evaluation factors of susceptibility to weathering without considering superficial alterations. In Table 9, the geological formations of high and medium susceptibility are differentiated by the weighting of the hydrothermal alteration.

The classification carried out in this work is validated with the hydrogeochemical study carried out by Peña et al. (2009) in 34 groundwater and surface water samples in the Caplina basin (Tables 10, 11, and 12). Li et al. (2019) proposed an ion mass balance to calculate the dissolved charge using empirical equations. The proportion of the chemical composition of anions and cations is represented in the Piper Diagram. Such a diagram also allows differentiating the degree of interaction through ionic relationships related to the hydrogeological units where the samples were taken (Figures 7 and 8).

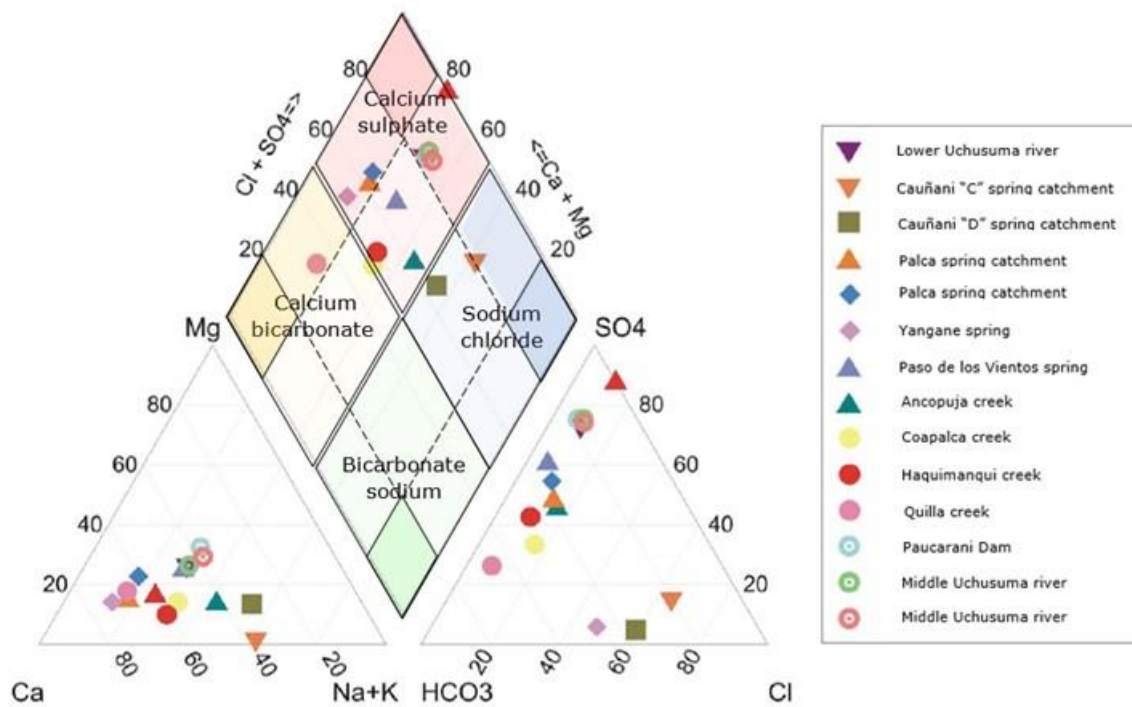


LEGEND:

	FISSURED AQUIFERS: Huilacollo, Barroso. VOLCANIC AQUITARS: Huaylillas
	INTRUSIVE AQUITARS: Challaviento & Yarabamba. FISSURED AQUIFERS: Huilacollo
	FISSURED AQUIFERS: Barroso
	FISSURED AQUIFERS: Huilacollo, Barroso & Chachacumane
	VOLCANIC AQUITARS: Huaylillas & Pachia
	FISSURED AQUIFERS: Huilacollo & Barroso

Figure 7. Piper diagram in the Caplina sub-basin after Peña et al. (2009)

The geochemical facies of the main surface and groundwater sources in the Caplina sub-basin (Figure 7) experience spatially polarized ion exchange. In contrast, in the Uchusuma and Cauñani sub-basins (Figure 8), it is observed that they retain certain neutrality, corroborating the presence of sediment transport with an erosive tendency in the Uchusuma sub-basin, but not chemical weathering.



LEGEND:

	INTRUSIVE AQUITARS: Yarabamba. FISSURED AQUIFERS: Huilacollo
	VOLCANIC AQUITARS: Huaylillas. FISSURED AQUIFERS: Huilacollo
	VOLCANIC AQUITARS: Huaylillas & Pachia
	FISSURED AQUIFERS: Chulluncane, Huilacollo. INTRUSIVE AQUITARS: Challaviento
	VOLCANIC AQUITARS: Huaylillas & Toquepala.

Figure 8. Piper diagram in the Uchusuma and Cauñani sub-basins
after Peña et al. (2009)

Peña et al. (2009) identify four geochemical facies in surface and underground water sources in the Caplina basin, regrouping into three due to the predominance of anions and their relationship with the emerged geological environment.

Group I: Calcium-sulfated

The dominant family in the basin is the calcic-sulfated one. Sulfates come from the oxidation of sulfides due to hydrothermal alteration in the mineral occurrences of the intrusive Yarabamba and Challaviento (Acosta et al., 2010). On the surface of fissured aquifers: Huilacollo and Barroso, the hydrothermal alteration extends in-depth, arising in catchments and springs. In this sense, the weighting of the surface alteration was mapped by Acosta et al. (2010) (Table 9). Meanwhile, Ca^{2+} ions are released due to chemical reactions in calcareous sedimentary formations, such as Ataspaca.

Group II: Sodium–chloride and calcium–chloride

The chloride anions come from the Aruma and Calientes hot springs in the outcrops of Huilacollo, Barroso, and Chachacumane, which were predominated in the deep waters of the Borateras geothermal field (Vargas et al., 2012). The geochemistry of the geothermal reservoirs of the South volcanic axis encompassed as the part of the Caplina basin.

Likewise, there was a considerable influence of Na^+ and Ca^{2+} from the Huaylillas formation. An increase in reactions was observed in volcanic aquitards with high porosity, despite receiving little precipitation.

Group III: Calcium bicarbonate

Calcium-bicarbonate sources represent the ideal composition of andesitic volcanic rocks (Ng, 2015) which were located in the fissured aquifers of Huillacollo, Barroso, Chulluncane. In mixing groundwater,

meteoric, and glacier water, they generate seasonal variation in the hydrochemistry of the basins (Ansari et al., 2019). The bicarbonate anion would come from a concise path of local flow. They are related to the reaction of CO₂ coming from the pores of the soil.

The characterization of the three groups is described in Tables 10, 11, and 12. The source type of the sampling point is related to the local geology and type of water to identify the dominant geological formation in the mineralization of the water. In this way, the hydrogeological unit corresponds to the hydrogeological behavior of the dominant geological formation.

Table 10. Calcium sulfate family in the Caplina basin after Peña et al. (2009)

SOURCE	Sampling point	Sub-basin	Local geology	Water type	Dominant geological formation	Hydrogeological unit
RIVER	Represa Paucarani	Maure	Fluio glacial Deposit	Ca-Mg-Na-SO ₄		GEO THERMAL
RIVER	Canal Uchusuma (C Blanco)	Uchusuma	Q-fa, Chocolate, Yarabamba	Ca-Mg-Na-SO ₄	Yarabamba	Intrusive aquitard
RIVER	Río Uchusuma (Sector Higuera ni)	Uchusuma	Socosani, Chocolate, Yarabamba	Ca-Na-Mg-SO ₄		
RIVER	Túnel Uchusuma	Uchusuma	Huilacollo	Ca-Mg-Na-SO ₄	Huilacollo	Fissured aquifer
SPRING	Paso de los Vientos	Uchusuma	Huilacollo, Huaylillas	Ca-Mg-Na-SO ₄ -HCO ₃		
SPRING	Captación Ataspaca	Caplina	Ataspaca, Chachacumane	Ca-Mg-SO ₄	Chachacumane	Fissured aquifer
SPRING	Captación Palca – Consumo	Caplina	Ataspaca, Socosani, Chachacumane	Ca-Mg-SO ₄ -HCO ₃		
SPRING	Quebrada Toquela	Caplina	Challaviento, Huilacollo, Barroso	Ca-Mg-SO ₄	Challaviento / Huilacollo	Intrusive Aquitard Fissured Aquifer
SPRING	Manante Aruma	Caplina	Huilacollo, Barroso, Huaylillas	Ca-Na-Mg-SO ₄ -Cl	Huilacollo/ Barroso	Fissured aquifer
SPRING	Manantial Pampa Soroche	Caplina	Qpl-morrenas, Barroso	Ca-Na-Mg-SO ₄ -HCO ₃		
RIVER	Captación Caplina	Caplina	Chachacumane, Socosani, Ataspaca	Ca-Na-SO ₄ -Cl	Chachacumane	Intrusive aquitard
RIVER	Río Caplina Parte baja	Caplina	Toquepala, Challaviento, Yarabamba	Ca-Na-SO ₄	Challaviento/ Yarabamba	
SPRING	Captación Palca – Agro	Caplina	Chocolate, Socosani, Toquepala, Challaviento	Ca-SO ₄ -HCO ₃	Challaviento	Volcanic aquitard
SPRING	Manante Ataspaca	Caplina	Huaylillas y Toquepala	Ca-Na-SO ₄ -Cl	Huaylillas	
UNDERGROUND WELL	Quebrada Ancopuja	Uchusuma	Huaylillas	Ca-Na-SO ₄ -HCO ₃		Alluvial
UNDERGROUND WELL	IRHS - 220 Las Palmeras	Zona Mezcla	Q-fa	Ca-Na-SO ₄ -Cl		Alluvial
UNDERGROUND WELL	IRHS - 146 Cooperativa 60	Zona Mezcla	Q-fa	Ca-Na-Mg-SO ₄ -Cl		Alluvial
RIVER	Quebrada Humalata	Caplina	Tarata	Ca-SO ₄	-	Sedimentary
RIVER	Quebrada Piscollane	Caplina	Barroso, Qh- bofedal, Q-fa	Ca-SO ₄	Barroso	Fissured aquifer
SPRING	Manante Cocavira	Caplina	Huilacollo y Qh-bofedal	Ca-SO ₄	Huilacollo	
SPRING	Manantial Tirata	Caplina	Huilacollo	Mg-Ca-SO ₄		

Table 11. Sodium chloride and calcium chloride family in the Caplina basin after Peña et al. (2009)

6	Sampling point	Sub-basin	Local geology	Water type	Dominant geological formation	Hydrogeological unit
SPRING	Captación "D" Cauñani	Cauñani	Q-fa, Huaylillas, Pachia	Na-Ca-Cl-HCO ₃	Huaylillas	Volcanic aquitard
MANANTIAL	Captación "C" Cauñani	Cauñani	Q-fa, Huaylillas, Pachia	Na-Ca-Cl-HCO ₃		
UNDERGROUND WELL	IRHS - 024 La Esperanza	Zona Mezcla	Q-fa, Huaylillas, Chocolate (Guaneros)	Na-Ca-Cl-SO ₄	Huaylillas	Fissured aquifer
SPRING	Manante Termal Calientes	Caplina	Chachacumane, Socosani, Ataspaca	Na-Ca-Cl-SO ₄	Chachacumane	
SPRING	Aguas Termales Aruma	Caplina	Huilacollo, Barroso, Huaylillas	Na-SO ₄ -Cl	Huilacollo/ Barroso	
UNDERGROUND WELL	IRHS - 112 La Yarada	Zona Mezcla	Fluvial-alluvial Dep. (Q-fa)	Na-Ca-SO ₄ -Cl		Alluvial with Marine Intrusion
UNDERGROUND WELL	IRHS - 054 Velasco Alvarado	Zona Mezcla	Fluvial-alluvial Dep. (Q-fa))	Ca-Na-Cl-SO ₄		
UNDERGROUND WELL	IRHS - 051 Los Palos	Zona Mezcla	Fluvial-alluvial Dep. (Q-fa)	Ca-Na-Cl-SO ₄		

Table 12, Calcium bicarbonate family in the Caplina basin after Peña et al. (2009)

CODE	Sampling point	Sub-basin	Local geology	Water type	Dominant geological formation	Hydrogeological unit
SPRING	Manante Yangane	Uchusuma	Chulluncane	Ca-Cl-HCO ₃	Chulluncane	Fissured aquifer
SPRING	Manante Piscollane	Caplina	Huilacollo, Barroso	Ca-Mg-Na-HCO ₃	Huilacollo, Barroso	
SPRING	Quebrada Quilla	Caplina	Chulluncane, Challaviento	Ca-Mg-HCO ₃ -SO ₄	Challaviento	Intrusive aquitard
SPRING	Quebrada Coapalca	Uchusuma	Moquegua, Huaylillas	Ca-Na-HCO ₃ -SO ₄	Huaylillas	Volcanic aquitard
SPRING	Quebrada Haquimanqui	Uchusuma	Toquepala, Moquegua, Huaylillas	Ca-Na-HCO ₃ -SO ₄		

79.41% of the samples evaluated are connected with hydrogeological units classified as high and medium susceptibility (Table 9). This high correspondence validates the correct proposed classification. In addition, it was found that fissured aquifers influence 41.2% of the total samples with hydrothermal alteration, predisposing ion exchange. 20.6% of these samples outcrop in volcanic aquitards without considerable ionic exchange and 17.6% correspond to intrusive aquitards with a surface alteration.

Conclusions

The weighting methodology allowed to generate the susceptibility map to chemical weathering, with 79% validation to the hydrogeochemistry of the basin. Three hydrogeological units stand out in the Caplina basin: (1) Fissured aquifers with hydrothermal alteration in the Huilacollo, Barroso volcanic, Chulluncane, and Chachacumane formations. (2) Intrusive aquitards with hydrothermal alteration in the Yarabamba and Challaviento units. (3) Aquitards of volcanic and porous origin in the Huaylillas formation.

In the hydrogeochemical analysis of water facies, the sulfate anion predominance was originated from the oxidation of sulfides due to the mineral occurrences of Cu and Ag associated with intrusive aquitards. The pattern associated with greater susceptibility is the presence of hydrothermal alteration. The calcium and sodium facies were resulted from chemical reactions in altered fissured aquifers and flow in calcareous sedimentary formations. Likewise, the reactions are intensified in the entrapment of the aquitards of the Huaylillas formation.

The geological formations studied emerge in the Caplina and Magollo sub-basins, based on a heuristic selection in the morphometric parameters of all the tributary sub-basins to the Caplina basin. From this methodology, it is possible to identify the characteristics of the sub-basins with the highest historical recharge. They have an oblong shape with a compactness coefficient (> 2.25) and the elongation ratio (> 0.39), the hypsometry of mature and old basins. The sub-basins with lower flow velocity have low slopes (3% -12%), with drainage density $< 0.8 \text{ Km}^{-1}$. These parameters establish a basis for a classification weight of susceptibility to chemical weathering in an arid basin.

References

- Acosta, H., Alván, A., Mamani, M., Oviedo, M. & J. Rodríguez (2010). Geología de los cuadrángulos de Pachía (36-v) y Palca (36-x), escala 1:50 000. INGEMMET, Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, 139, 100p., 7 mapas.
- Adhami, M. & Hamidreza S. (2016). Sub-watershed prioritization based on sediment yield using game theory. *Journal of Hydrology*, 541(B), 977-987. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.08.008>.
- ANA (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. <https://doi.org/10.1007/s12594-019-1346-y>.
- Bransford, J. & Stein, B. (1987). Trad Cast: solución ideal de problemas. Madrid: 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: Talleres Gráficos Alonso.
- Custodio, E. (1992). Study & modelling of saltwater intrusion into aquifers. Barcelona.
- Custodio, E. & Llamas, M. (1983); Hidrología Subterránea; Ediciones Omega. Tomo I y II. Barcelona
- Delgadillo, A. & Páez, G. (2008). Aspectos hidrológicos, subcuencas susceptibles a crecidas, escenarios de riesgo. En C. Ferrer & M. Duarte (Eds.). (2008). 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: FUNDAPRIS.

Foster, Stephen & Tuinhof, Albert & Kemper, Karin & Garduno, Hector & Nanni, Marcella. (2003). Characterization of Groundwater Systems - key concepts and frequent misconceptions.

García M. y Fernández A., (2009). Hidrogeología básica. Las aguas subterráneas y su flujo (3º edición). Ediciones FIEC, 135 pág.

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. <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. [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, Elsevier.

Henao, J. (1988). *Introducción al manejo de cuencas hidrográficas*. Bogotá: Universidad Santo Tomás.

Horton, R. (1932). Drainage basin characteristics. *Transactions of the American Geophysical Union*, nº 13, pp. 350-361.

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*, Nº XIX, pp. 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. <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). <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. <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 REGION. Universidad de Chile.

Monge, R.; Cervantes, J. (2000). Memoria explicativa de la Geología del Cuadrángulo de Pachía y Palca (36-v). Instituto Geológico Minero y Metalúrgico: 11 p. Lima.

Motta (1990). Agua y conflictos en el valle del Caplina (Tacna) Siglos XVI – XIX

Mourier, B., Walter, C., & Merot, P. (2008). Soil distribution in valleys according to stream order. *CATENA*, 72(3), 395–404. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.07.012>

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, 152 p.

Ortiz, O. (2004). Evaluación hidrológica. *Hidrored*, (1), 1-7.

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, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.019>.

Pacheco, F., Van der Weijden, C. (2014). Role of hydraulic diffusivity in the decrease of weathering rates over time. *J. Hydrol.* 512, 87–106. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.02.041>.

Peña, F., Cotrina, G & Acosta, H. (2009). Hidrogeología de la Cuenca del Río Caplina, Boletín N° 1, INGEMMET. Lima, Perú.

Proyecto Especial Tacna, PET (2013) Registro de campaña de muestreo hidroquímico en el acuífero La Yarada. Gobierno regional de Tacna.

Pino V., E., Ramos F., L., Mejía M., J., Chávarri V., E., & Ascencios T., D. (2020). Medidas de mitigación para el acuífero costero La Yarada, un sistema sobreexplotado en zonas áridas. *Idesia (Arica)*, 38(3), 21–31. <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. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292019000400055>.

Pino, Edwin, 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. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-05-07>.

Pino, Edwin, 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. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-06-06>.

Pino V., 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. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292019000300039>.

Pino V., E., Chávarri V., E., & Ramos F., 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. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292018005001301>.

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. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124935>

Sánchez, F. (2017). Hidrología Superficial y Subterránea. Createspace Independent Pub., 414 pp.

Secretaria de Gestión de Riesgos. (2015). Propuesta Metodológica para el Análisis de Amenaza por Movimientos en Masa. Quito, Ecuador.

Schumm, S. (1956). The evolution of drainage systems and slopes in badlands at Pearth Amboy, New Jersey. Bulletin of the Geological Society of America, N° 67, pp. 597-646.

Strahler, A. (1952a). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. Bulletin of Geological Society of America. N° 63, pp. 1117-1142

Strahler, A. (1952b). Hypsometric analysis of erosional topography. Bulletin of Geological Society of America. N° 63, pp. 923-938.

Strahler, A. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. Trans. Am. Geophys Union 38, 913-920. DOI: 10.1029/TR038i006p00913

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

Wilson, J., & García, W. (1962). Geología de los cuadrángulos de Pachia y Palca Hoja 36v y 36x. INGEMMET-Comisión de la Carta Nacional.

Zomlot, Z., Verbeiren, B., Huysmans, M., & Batelaan, O. (2015). Spatial distribution of groundwater recharge and baseflow: Assessment of controlling factors. Journal of Hydrology: Regional Studies, 4, 349-368. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.07.005> Toda la bibliografía debe estar referenciada en el cuerpo principal del documento.