

HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA CUENCA DEL RÍO ILO-MOQUEGUA - PERÚ

Wai Long Ng*, Fluquer Peña* & Percy Sulca*

(*) INGEMMET, Av. Canadá 1470 San Borja, Lima; wng@ingemmet.gob.pe & fpena@ingemmet.gob.pe
pdsgeoaqp@gmail.com

I.- INTRODUCCIÓN

La cuenca del río Ilo-Moquegua se encuentra ubicada en el sur del Perú, políticamente abarca parte de las provincias de Mariscal Nieto e Ilo, de la Región Moquegua. Desde el punto de vista geográfico se ubica entre las coordenadas: Este 247 000 y 347 000, y Norte 8 034 000 y 8 135 000, limita por el norte con la cuenca del río Tambo, por el sur con el Océano Pacífico, por el este con la cuenca del río Locumba, y por el oeste con la cuenca del río Honda. Tiene un área aproximada de 3 792 km². El río Moquegua es el colector principal de las aguas de la cuenca y se forma por las confluencias de los ríos Huaracane y Torata, de dirección noreste a suroeste cuyos tributarios y quebradas menores tienen un sistema de drenaje de tipo subparalela, en la parte superior y dendrítico en la parte media e inferior. La cuenca tiene un relieve variado, producto de una compleja actividad tectónica, con depósitos de materiales volcánicos erosionados por los diferentes cursos de agua, en la parte alta se encuentra una pequeña altiplanicie (Titijones), caracterizada por zonas de baja pendiente y con evidencias de formar zonas de infiltración y recarga de acuíferos, precisamente en este sector se extrae agua subterránea mediante pozos y sondeos profundos. En zonas más altas encontramos la Cordillera Occidental (cerros Huertalla, Arundaya, Asana y otros), a manera de pequeños conos volcánicos y elevaciones que constituyen las zonas de alimentación y recarga de acuíferos volcánicos, con evidencias de surgencia natural a través de manantiales. El flanco andino occidental, es una franja compuesta por derrames volcánicos de dirección noroeste a sureste, con esporádica presencia de manantiales de bajo caudal, seguida de estribaciones andinas occidentales que se caracterizan por tener una topografía agreste formada de materiales impermeables. Bordeando el flanco andino se encuentran, laderas de baja pendiente, de aspecto árido, con quebradas secas, anchas y alargadas producto de la erosión. Hacia la parte baja de la cuenca, se observan: la pampa costanera, de baja pendiente y disectada por numerosas quebradas, la Cordillera de la Costa, con un relieve moderado de rocas duras e impermeables, y las laderas escarpadas (al borde del río Ilo) que forman una pared de abrupta pendiente y difícil acceso. En los alrededores de Ilo, se ubica la faja litoral, paralela a la línea de costa, de baja pendiente y evidente presencia de un acuífero costero. Desde Moquegua hasta Ilo a lo largo del río Moquegua e Ilo, se observan dos importantes valles, donde la presencia de aguas subterráneas se manifiestan por la presencia de 168 pozos de captación, el mismo que contribuye con el desarrollo de una intensa actividad agrícola de los valles.

El agua subterránea es un disolvente universal, cuando infiltra en el subsuelo y circula en profundidad, va adquiriendo la composición química de las rocas y suelos que atraviesan; por lo tanto, llegan a superficie con una determinada marca química. Para conocer los ambientes de circulación del agua subterránea, las litologías atravesadas y sus características hidrogeoquímicas, se realizaron dos campañas de muestreo de aguas subterráneas en la cuenca del río Ilo-Moquegua, cuyo resultado, análisis e interpretación se muestran en el presente artículo.

II.- GEOLOGÍA

Las propiedades geoquímicas de las rocas, son las que otorgan la composición química a las aguas subterráneas, cuyos elementos dependen de su estado físico (fracturada, porosa, etc.), espesor y composición de las rocas. Los materiales geológicos de la cuenca del río Ilo-Moquegua, están conformados por rocas antiguas como las del Complejo Basal de la Costa, sobre ella y en discordancia se encuentra el Grupo Cabanillas (descrita como Grupo Yamayo por Bellido, 1962), que representa

una parte del paleozoico; sobreyaciendo y en discordancia, se encuentra la parte inferior de la Formación Chocolate, compuesta por derrames de lavas andesíticas, dacíticas y traquiandesíticas, también se intercalan aglomerados volcánicos. Nuevos estudios mostraron que sobre la Formación Chocolate y en discordancia, se encuentra la Formación Puente, del Grupo Yura; compuesta por conglomerados de clastos volcánicos en matriz abundante en limolitas (en la base), seguidas de areniscas de grano medio a fino intercalados con delgados niveles de limolita (Acosta & Alván, 2010), las mismas que se observan en la quebrada Guaneros. Ingresando al Cretácico afloran ampliamente rocas del Grupo Toquepala, distinguiendo sus formaciones Huaracane, Inogoya, Paralaque y Quellaveco (tobas, brechas piroclásticas, conglomerados, areniscas, y lavas), por encima de estos materiales se ubica el Grupo Moquegua con sus miembros inferior (areniscas arcósicas a tufáceas) y superior (areno-conglomerádica), cuya deposición (42 Ma.) se dio producto de la formación de una cuenca intramontaña (55 Ma.) que tenía como límites el pie de la cordillera occidental y la cordillera de la costa. Cubriendo al Grupo Moquegua y en discordancia se encuentran las tobas de la Formación Huaylillas y por encima con semejante relación se ubica la Formación Millo (volcano sedimentarios del mioceno superior - plioceno superior). En la parte noreste de la cuenca (cerca al poblado de Azana), aflora la Formación Capillune (volcano sedimentarios del plioceno superior), que descansa discordante sobre la Formación Huaylillas, y con semejante relación infrayace a los volcánicos del Grupo Barroso. Estas Formaciones tienen condiciones de ser buenos acuíferos, las mismas que otorgan propiedades químicas a las aguas subterráneas que circulan a través de ellas. Los materiales volcánicos del Barroso se extienden en toda la parte alta de la cuenca, los afloramientos de mayor extensión son los complejos volcánicos Chuquiananta y Huertalla, y los de menor extensión los de Humajalso, estrato volcán Mesacalani y Suches. Finalmente, los Depósitos Cuaternarios están distribuidos por toda la cuenca según su tipo de formación, los depósitos pleistocénicos lo conforman las de Terraza ubicada en la quebrada Tres mellizos, los Depósitos Morrénicos en los alrededores del Grupo Barroso y los Depósitos Aluviales más notorios cerca de las quebrada Chayanto y Pampa Guaneros. Asimismo, los depósitos cuaternarios holocénicos lo conforman los Depósitos Marinos, que afloran en el litoral a lo largo de la línea de costa, cerca de la carretera Ilo-Tacna, y los Depósitos Fluvioglaciares en las inmediaciones del Grupo Barroso. Los Depósitos Aluviales (más recientes), se encuentran distribuidos por toda la cuenca, rellenando las esporádicas quebradas, los Depósitos Eólicos son materiales permeables pero de poca importancia hidrogeológica. Los Depósitos Fluviales se ubican rellenando las quebradas, principalmente se observan desde la quebrada Mataballo y la localidad de Osmore Chico, hasta la desembocadura del río Ilo, los mismos que poseen muy buenas condiciones para formar acuíferos.

Las rocas intrusivas de distintas edades y litología variable son por lo general compactos, tienen características de comportarse como una barrera impermeable que separa la cuenca del río Ilo-Moquegua en dos, la parte alta con acuíferos fisurados volcánicos y la parte baja con acuíferos poroso no consolidados en los valles.

La parte estructural la conforman los lineamientos, fracturas y fallas que afectan a rocas de casi todas las edades. Las fallas más importantes que atraviesan la cuenca son: Incapuquio, Torata, Micalaco, Quellaveco y Chololo, además de lineamientos como el de Asana, Capillune y otros. La mayor densidad de estos se aprecia desde la parte media hacia el noreste de la cuenca, y en algunos casos con presencia de fracturas que condicionan la surgencia del agua subterráneas.

III.- HIDROGEOQUÍMICA

Durante el trabajo de campo se han inventariado un total de 121 fuentes de aguas subterráneas, de los cuales 33 se han seleccionado para el muestreo y análisis hidroquímico, de las 33 muestras seleccionadas 25 corresponden a manantiales, 05 a pozos y 03 a puntos de control. Las muestras de aguas se han seleccionado considerando la litología de las rocas, las condiciones hidráulicas de la fuente y el espacio de cobertura en la cuenca (Figura 3); tomándose muestras de la misma surgencia en caso de manantiales (Foto 1) y de la boca del pozo (Foto 2). El muestreo se ha desarrollado de acuerdo a un protocolo de muestreo para agua subterráneas y las campañas de campo se desarrollaron en dos periodos (años 2008 y 2011).

Para obtener las características hidroquímicas de las aguas subterráneas se han evaluado las concentraciones de los componentes iónicos mayoritarios, cationes y aniones, además de metales

disueltos. Todas las determinaciones analíticas se realizaron en el laboratorio de análisis químico de aguas de INGEMMET por el método de ICP- Masa.

La interpretación de los datos se realizó en base al cálculo de determinadas relaciones iónicas y mediante el apoyo de diagramas hidroquímicos, cuyo empleo es útil y práctico que se utiliza en todos los estudios hidrogeoquímicos. Para validar los resultados del laboratorio, se realizó el balance de iones (cationes y aniones), los cuales dieron valores que se encuentran dentro de los rangos válidos para procesos químicos de aguas (<10%). La representación de los datos se presenta en tres formas: Usando los diagramas de Stiff dentro del mapa hidroquímico de la cuenca (Figura 3) y usando los diagramas de Piper (Figura 1 y 2) que representan facies hidroquímicas predominantes y los diagramas de Scatter (Figura 1 y 2), cuya relación iónica de Na+K y SO₄+Cl nos ayudó a determinar si la procedencia de los flujos de aguas subterránea son locales, intermedios o regionales (Miffling, 1988).



Foto 1. Manantial Surapatilla Grande (104705-001) procedente de lavas volcánicas del Barroso.



Foto 2. Pozo IRHS-001-ILO Ubicado en el acuífero poroso no consolidado del valle de Ilo.

RESULTADOS, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN

Las aguas subterráneas en la cuenca, proceden de acuíferos con características diferentes, los acuíferos de la parte alta corresponden al Grupo Barroso y la Formación Capillune y los acuíferos del piso de valle (Moquegua e Ilo) corresponden al acuífero poroso no consolidado.

En las 33 muestras analizadas se tiene un predominio común de dos facies hidroquímicas: las bicarbonatadas cálcicas y las sulfatadas mixtas. Para tener mayores detalles de la composición química se ha discretizado los resultados en dos categorías de análisis: Una para fuentes que proviene de manantiales y puntos de control (Figura 1) y otra para pozos ubicados en los acuíferos porosos no consolidados (Figura 2).

En el primer grupo (Figura 1), fuentes monitoreadas en la parte alta y baja, se observan tres facies predominantes: las aguas bicarbonatadas cálcicas (19 fuentes), sulfatadas cálcicas (7 fuentes) y sulfatadas sódicas (2 fuentes).

1. Las fuentes de predominancia bicarbonatada cálcicas (HCO₃-Ca), representan surgencias de agua subterránea muy jóvenes y corresponden a sistemas de flujo locales de muy corto recorrido, los bicarbonatos están relacionados a la reacción del CO₂, provenientes de los poros del suelo que presentan una elevada concentración adquirido en los primeros metros de la infiltración (zona no saturada). La predominancia del catión calcio con aportes de sodio y ligeras cantidades de Mg, tienen origen en las plagioclasas intermedias, y en menor grado de biotitas, hornblendas y/o augitas presentes en las rocas volcánicas de esta zona (lavas andesíticas principalmente). Dentro de este mismo grupo, en algunas fuentes existen ligeros incrementos del anión sulfato (Figuras 1 y 3) lo que indica, que estas surgencias son también locales, pero de mayor recorrido y tiempo de permanencia en el acuífero. Dos muestras de este grupo tienen ligeras excepciones a esta explicación y los dos corresponden a los puntos de control Charaque y Jiménez (río Tumulaca), ambos fueron monitoreadas después de que la fuente tuvo un corto recorrido en superficie.

- La segunda predominancia corresponde a aguas de facies sulfatadas cálcica ($\text{SO}_4\text{-Ca}$), que corresponde a 7 muestras, las mismas que tienen ligeras variaciones a facies sulfatadas-bicarbonatadas y sulfatadas cloruradas, con aportes mayoritarios de calcio. Estos grupos corresponden a surgencias relacionados a sistemas de flujo locales, de recorrido intermedio, siendo aún aguas jóvenes, tanto en su recorrido como en su maduración química, la cual se puede corroborar con el diagrama de Scatter (Figura 1) mediante la relación $\text{Cl}+\text{SO}_4$ y $\text{Na}+\text{K}$ (Mifflin, 1988). El manantial Pacae, ubicado en el piso de valle de Moquegua, tiene predominancia sulfatada cálcica y se encuentra relacionado al contacto con materiales salinos, sedimentos y rocas erosionadas y depositadas en el piso de valle de Moquegua, la misma que a su vez indica que tiene contacto con aguas de riego, cargadas de fertilizantes y plaguicidas (usado en todo el valle en labores agrícolas). En el diagrama Scatter (Figura 1) el manantial Pacae corresponde al flujo intermedio, estos se debe a sus valores elevados de Cl y SO_4 , sin embargo interpretamos que el incremento de sulfatos en las aguas de este manantial se debe a la infiltración de aguas de riego (cargada con fertilizantes y plaguicidas) y en algún momento de la circulación tuvieron contacto con los flujos de aguas subterráneas que afloran en el manantial Pacae.
- La tercera facie, sulfatada sódica ($\text{SO}_4\text{-Na}$) pertenece a dos fuentes, al manantial Santos y a la fuente de agua potable de Arundaya, las mismas que contienen elementos iónicos cargados por el contacto de las aguas con la dilución de rocas volcánicas. Estas muestras tienen la predominancia sulfatada, pero a la vez un gran incremento en el sodio, la misma que proviene de la meteorización de silicatos y la disolución de rocas volcánicas con contenido intemperizado de arenas y limos.

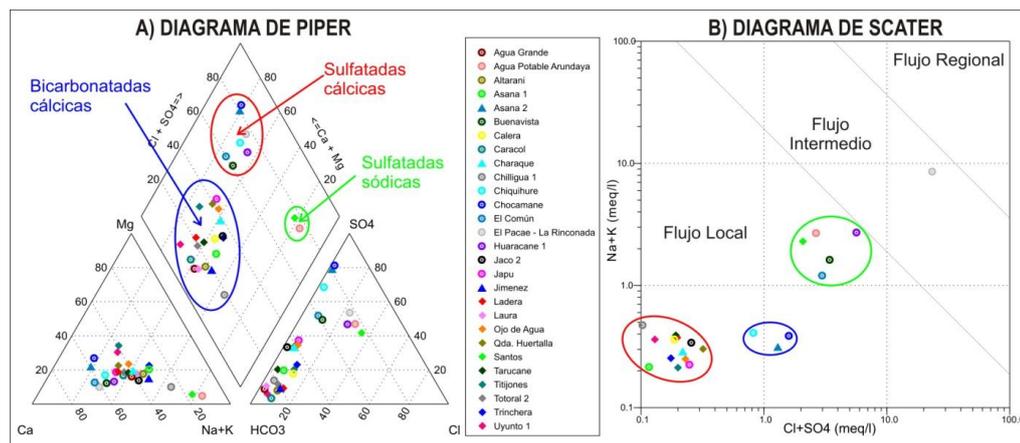


Figura 1: A) Diagrama de Piper y B) Diagrama de Scatter de manantiales y puntos de control.

Haciendo un análisis adicional de su composición, distribución, recorrido, tiempo de permanencia y sistema de flujo al que están asociados las fuentes, según el diagrama de Scatter (Figura 1B), de izquierda a derecha se diferencian tres grupos, todas con flujos de recorrido local. El primero (encerrado en rojo) constituidos por 19 fuentes (no se observan más fuentes porque sus concentraciones son inferiores a la escala del gráfico), son más puntuales, de característica subsuperficial y poco tiempo de residencia en el subsuelo. El segundo grupo de fuentes (encerrado en azul), pertenecientes a 3 fuentes, de flujo local, pero con mayor recorrido y tiempo de residencia que el primer grupo. El tercer grupo (encerradas en verde) correspondientes a 5 fuentes, también pertenecen a flujos locales, pero de mayor recorrido que las dos anteriores, inclusive sus flujos se encuentran cerca de la línea divisoria entre flujos local e intermedio, esto nos ayuda a interpretar que las 5 fuentes de este grupo tuvieron mayor tiempo de residencia en el subsuelo y posiblemente con poco tiempo de almacenamiento en un reservorio acuífero. Estos valores se correlacionan con la composición química interpretada en el diagrama de Piper (Figura 1A).

El segundo grupo de fuentes monitoreadas (Figura 2) corresponden enteramente a pozos, ubicados en el valle de Moquegua (5 fuentes), donde se observa que pertenecen a la facies sulfatada cálcica.

- La facie predominante sulfatada cálcica ($\text{SO}_4\text{-Ca}$), encontrada en las muestras de los pozos tienen ligeras variaciones en contenido de Cl . En general los pozos se caracterizan por la presencia de niveles freáticos altos, muy cerca de superficie, por lo cual son aguas poco profundas que están en contacto con aguas de riego cargados de plaguicidas y fertilizantes. Las aguas del pozo IRHS-001-

MOQ, que también tiene considerables aportes de cloruro, tiene un uso agrícola e industrial. Los 5 pozos monitoreados están amenazados por constante contaminación agrícola, ya que se encuentran sobre terrenos de cultivo y con niveles freáticos muy cerca de la superficie. Las aguas de predominancia sulfatada cálcica fueron ploteadas también en el diagrama de Scatter (Figura 2) para ver su relación con la procedencia de flujos, sin embargo, el alto contenido de sulfatos de procedencia antrópica (infiltración de aguas superficiales usadas en el riego de zonas agrícolas más el uso de fertilizantes y plaguicidas) influyen en la evolución química natural de las aguas subterráneas, por lo tanto la procedencia encontrada en el gráfico no corresponde a aguas de flujos intermedio ni regionales.

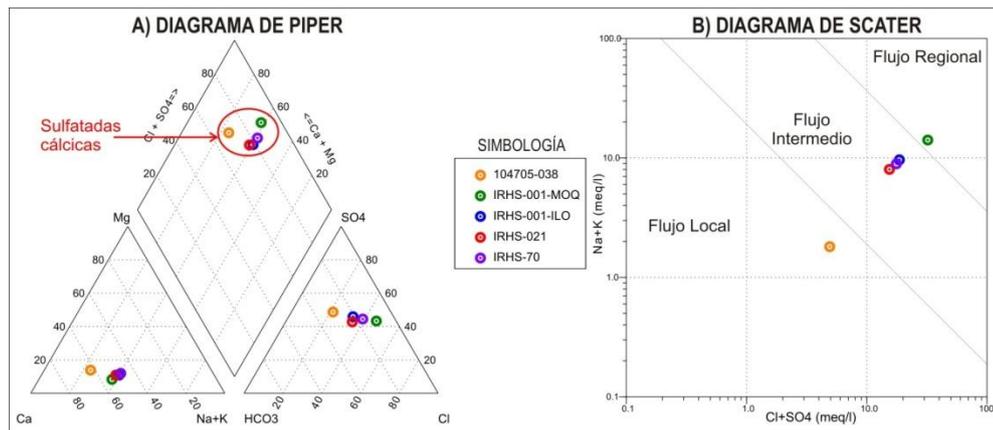


Figura 2: Diagrama de Piper 1A y Diagramas de Scatter para fuentes de aguas subterránea muestreadas en pozos.

En toda la cuenca se observa la distribución espacial de las fuentes de aguas subterránea con su respectivo diagrama de Stiff (Figura 3), cuya interpretación visual de las predominancias químicas del aguas subterránea está separado en tres categorías: la primera corresponde a muestras con menor concentración iónica (≤ 1 meq/L) diferenciados en el color verde, la segunda a concentraciones ≤ 5 meq/L y en color marrón, y la tercera tiene concentraciones ≤ 20 meq/L en color azul. La primera y segunda concentración corresponde a la parte superior de la cuenca (excepto la fuente Jiménez, que está en la parte media), estas fuentes están relacionadas directamente a la zona de precipitación, las mismas que indican un leve enriquecimiento iónico con los materiales subsuperficiales y las rocas volcánicas. La tercera categoría, de concentraciones altas, indican un mayor enriquecimiento iónico y se encuentran representadas por pozos y manantiales de piso de valle.

Cabe destacar que existen 4 fuentes monitoreadas con contenidos variables de nitratos al resto de las muestras: El Común, Huaracane, Totoral y Pozo Moquegua 1 con 5.17, 12.68, 24.9 y 98.34 mg/L respectivamente. El primero se encuentra dentro de la concentración normal, Totoral dentro del límite para consumo humano, y el Pozo Moquegua 1 excede los límites mínimos exigidos para consumo humano, por lo tanto solo se utiliza en el riego. Estas fuentes están relacionadas a la oxidación-reducción de las especies nitrogenadas en el agua por fenómenos biológicos así como por la descomposición de material orgánico.

CONCLUSIONES

- La evolución hidrogeoquímica del agua subterránea indica que la mayoría de los manantiales provienen de un sistema de flujo local, que se recarga con la precipitación pluvial. Su composición química presenta facies bicarbonatadas mixtas (cálcicas-sódicas) que indican que los manantiales tienen dos grupo de zonas de influencia: Una muy local, que infiltra por la fracturas y poroso de las rocas volcánicas y descargan muy rápido y otra también local pero de mayor rango de recorrido y mayor tiempo de permanencia en el acuífero.
- La evolución hidrogeoquímica de las aguas subterráneas que provienen de los pozos corresponden a facies sulfatadas mixtas (cálcicas-sódicas) cuya característica de su recorrido, interacción agua-roca, está más relacionada al contacto de las aguas subterráneas con aguas superficiales, las mismas que provienen del río Ilo-Moquegua y del riego de zonas agrícolas cargadas de fertilizantes y plaguicidas.

- Las fuentes con variaciones en contenidos de sulfato y nitrato se debe al contacto de aguas de riego que infiltran en el subsuelo hasta llegar al acuífero del valle Ilo-Moquegua, a esto se suma el vertido de aguas servidas de la ciudad de Moquegua directamente sobre el acuífero, que además genera una posible contaminación orgánica.

REFERENCIAS

- Acosta, H. & Alvan, A. (2008) Revisión de la Formación guaneros en la localidad tipo: implicancias en la evolución estratigráfica de la costa sur del Perú. SGP. XIV Congreso Peruano de Geología, resumen extendido.
- Acosta, H., et al. (2011). Geología de los cuadrángulos de Pachía y Palca, INGEMMET. Bol 139, A.
- Bellido, E. & Guevara, C. (1963). Geología del cuadrángulo de Punta de Bombón y Clesesí, INGEMMET. Bol 005, A.
- Bellido, E. (1979). Geología del cuadrángulo de Moquegua, INGEMMET, Bol 015, A.
- Custodio, E. & Llamas, M. (1996). Hidrología subterránea. 2ª. Ed. Barcelona. Omega, 2 t.
- FCIHS, (2009). Hidrogeología.
- García, W. (1978) Geología del cuadrángulos de Puquina, Omate, Huaitire, Mazo Cruz y Pizacoma, INGEMMET, Bol 29, A.
- Martínez, W. & Zuloaga, A. (2000). Memoria explicativa de la geología del cuadrángulo de Moquegua (35-u).
- Narvaez, S. (1964). Geología del cuadrángulos de Ilo y Locumba, INGEMMET. Bol 007, A.
- Peña, F., et., al. (2011). Comportamiento hidrogeológico de las rocas volcánicas en el sur del Perú. X ECI-2011 de verano.
- Rodríguez, J. (2011). Magmatismo meso-cenozoico de la cordillera de la costa y borde oeste de la cordillera occidental del sur de Perú. Tesis.
- Sánchez, A., Rosell, W. & Raymundo, T. (2000) Memoria explicativa de la revisión geológica de los cuadrángulos de Punta de Bombón (35-s), Clesesí (35-t), Ilo (36-t), Locumba (36-u), La Yarada (37-u), Tacna (37-v), Huaylillas (37-x), Juli (33-v), Pizacoma (34-y) e Isla Anápiá (33-z).
- SENAMHI, (2010). Balance hídrico superficial Cuenca del río Ilo- Moquegua.
- Sulca, P. et al. (2011). Importancia de la hidroquímica en la prospección y exploración de aguas subterráneas. X ECI-2011.

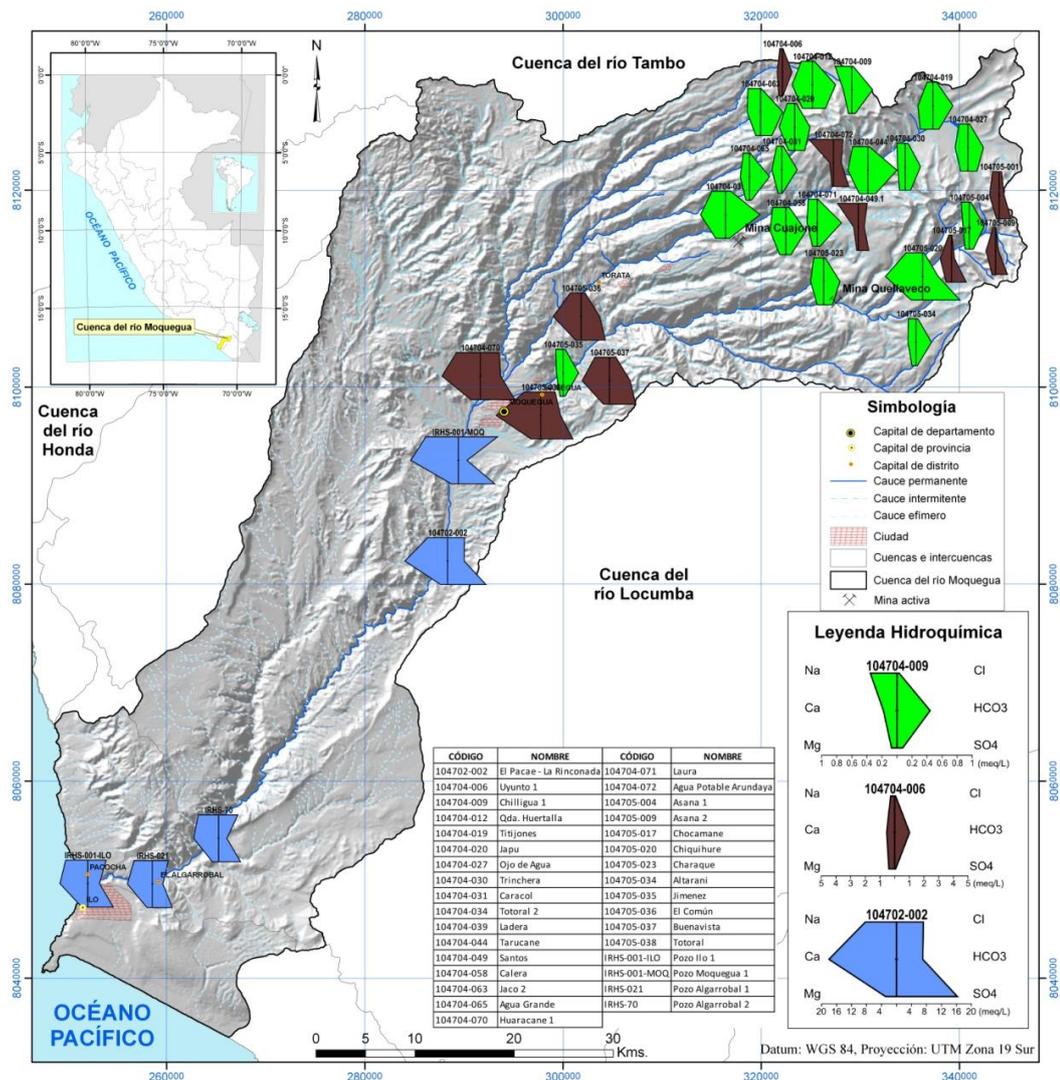


Figura 3: Mapa hidroquímico de la cuenca del río Ilo - Moquegua.