

Origen de las aguas subterráneas en el acuífero Ica-Perú, basado en isótopos ambientales

Origin of groundwater in the Ica aquifer-Peru, based on environmental isotopes

Joselito Jersin Robles Silvestre¹, David Bethune², James Emiliano Apaestegui Campos³, Cathryn Ryan⁴

Recibido: 27/06/2022 - Aprobado: 14/11/2022 – Publicado: 31/12/2022

RESUMEN

El valle de Ica, ubicado en la zona central y occidental de Perú, es el principal valle con potencial agroexportador por sus altos índices de productividad y calidad, a la vez el acuífero del cual se extrae agua se enfrenta a una extracción intensiva de agua subterránea; dando lugar a un descenso considerable de los niveles piezométricos a causa de la sobreexplotación del acuífero. Hemos planteado un modelo conceptual para establecer la interconexión entre las precipitaciones ocurridas en la cuenca alta y el acuífero Ica, así como los mecanismos de recarga. Adicionalmente se ha establecido una red de monitoreo isotópico y geoquímico en puntos estratégicos desde la cuenca baja, media y alta, para la evaluación de aguas subterráneas, superficiales y de precipitaciones, esto ha permitido entender que el Acuífero Ica es recargado principalmente por agua proveniente de elevaciones medias y altas de la cuenca y es en estos puntos donde se debe hacer la recarga artificial mediante infiltración; ya que existe una interconexión directa a través de fallas geológicas entre el agua proveniente de altas elevaciones y del mismo acuífero.

Palabras claves: agua subterránea, isótopos, fallas geológicas, modelo conceptual, acuífero.

ABSTRACT

The Ica Valley, located in central and western Peru, is the main valley with agro-export potential due to its high rates of productivity and quality, while the aquifer from which water is extracted faces intensive groundwater extraction, leading to a considerable drop in piezometric levels due to overexploitation of the aquifer. We have proposed a conceptual model to establish the interconnection between the rainfall that occurs in the upper basin and the Ica aquifer, as well as the recharge mechanisms. Additionally, an isotopic and geochemical monitoring network has been established at strategic points from the lower, middle and upper basins, for the evaluation of groundwater, surface water and precipitation, this has allowed us to understand that the Ica Aquifer is recharged mainly by water from medium elevations. and upper reaches of the basin and it is at these points where artificial recharge must be carried out through infiltration, since there is a direct interconnection through geological faults between the water coming from high elevations and the aquifer itself.

Keywords: groundwater, isotopes, geological faults, conceptual model, aquifer.

1 Universidad Nacional Agraria La Molina, Av. La Molina s/n, Lima, Perú.

Autor para correspondencia: joselitorobles@lamolina.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9245-9289>

2 Universidad de Calgary, 2500 University drive NW, Calgary, Canadá. E-mail: bethuned@ucalgary.ca - ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2539-4141>

3 Instituto Geofísico del Perú, Calle Badajoz, 169 Ate, Lima, Perú. E-mail: japaestegui@igp.gob.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9761-1806>

4 Universidad de Calgary, 2500 University drive NW, Calgary, Canadá. E-mail: Cryan@ucalgary.ca - ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4569-8014>

I. INTRODUCCIÓN

Las diversas civilizaciones siempre se han instalado y desarrollado cerca de las fuentes de agua, con lo cual han podido potenciar las actividades agropecuarias hasta volverse sedentarias, esto ha influido para su veneración como fuentes de vida y de transformación (Burstein-Roda, 2018). El consumo del agua ha aumentado considerablemente a nivel global a causa de muchos factores entre ellos la creciente presión demográfica; y actualmente ha alcanzado un estado crítico para la humanidad en términos de disponibilidad, cantidad, acceso y calidad, sobre todo a causa de la sobreexplotación de dicho recurso hídrico en algunas zonas.

A pesar que Perú cuenta con la mayor disponibilidad de agua de América latina, distribuidos en la selva, los andes y franja del desierto costero; los recursos hídricos no tienen una distribución equitativa y uniforme a lo largo y ancho del territorio peruano, por ejemplo la franja costera peruana está expuesta a un estrés hídrico, con pocos ríos de régimen permanente (Indij & Schreider, 2011).

Al sur de Lima, en la zona central y occidental del territorio peruano se encuentra la cuenca del Río Ica (Departamentos de Ica y Huancavelica) con una extensión de 7188 km²; aquí el río Ica recorre el departamento del mismo nombre inicialmente de este a oeste y luego cambia de dirección de norte a sur como producto de la actividad tectónica, este último tramo lo hace en forma paralela a la franja del desierto costero entre la bocatoma La Achirana (Los Molinos) y el sector de Ocucaje. Esta extensión da lugar al valle de Ica, uno de los más fértiles de la costa, pero a la vez presenta un alto déficit de recursos hídricos superficiales y subterráneos; bajo el valle se encuentra uno

de los acuíferos porosos no consolidados más importantes del Perú (Figura 1).

El acuífero permite al departamento Ica sustentar una agricultura con gran crecimiento y potencial agroexportador, pero se ha generado una gran demanda de recursos hídricos a lo largo de todo el año; hecho que conlleva a una extracción intensiva de agua subterránea. La extracción de aguas almacenadas en el acuífero Ica ha generado un desbalance de ingreso y salida de agua, incrementando el descenso de los niveles a tal punto que superan a 1 metro en algunos sectores; esto ha dado lugar a una sobreexplotación del acuífero y deterioro del mismo tanto en cantidad como en calidad, ahora es un problema latente y con él se viene lidiando desde hace algunas décadas atrás (Muñoz, 2016).

Buscar alternativas para contrarrestar el deterioro del acuífero urge a mediano y largo plazo, por ahora se ha intentado recargar el acuífero por la Junta de usuarios de aguas subterráneas del valle de Ica (JUASVI) con zanjas de infiltración en la parte alta de la cuenca y pozas o cochas sobre el mismo acuífero con resultados poco alentadores, ya que se desconoce las zonas más adecuadas para hacerlo, así como estudios sobre la interconexión de las aguas subterráneas procedentes de la cordillera y aguas subterráneas del valle de Ica, a través de las fallas geológicas que estarían recargando el acuífero. La geología e hidrogeología regional ha sido estudiada de cerca por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) desde el 2006, así como por parte de la Autoridad Nacional del Agua (ANA), quien en un primer intento de modelación numérica del acuífero solo se ha calibrado para 31 pozos (ANA, 2017) con un error relativamente alto (9.93%).

Los diversos estudios muchos de ellos muy someros, son importantes, pero es necesario abordar temas aun sin

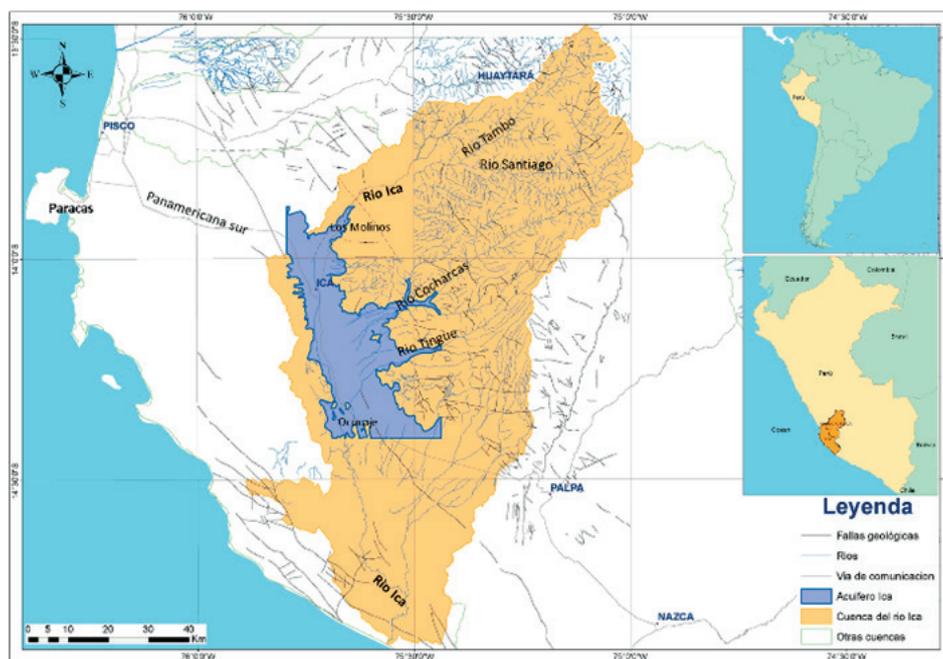


Figura 1. Ubicación del acuífero y la cuenca del río Ica, así como la gran cantidad de fallas geológicas a lo largo de la cuenca y el acuífero.

respuesta como: cuál es el comportamiento del acuífero, el porqué de la salinidad al sur del acuífero, origen de las aguas subterráneas, conexión con la montaña, así como donde y cuando recargar. Abordar las técnicas geoquímicas y de isótopos ambientales presentes en el agua es una alternativa, ya que proporcionan información muy importante sobre el origen, flujo e historia de los cuerpos de agua. En estos casos, los isótopos ambientales representan una poderosa herramienta para caracterizar su hidrogeología y por lo tanto, las zonas de recarga se pueden definir utilizando los contenidos de ^2H y ^{18}O (Lambán et al., 2015). En el presente trabajo se aborda una propuesta de acciones y actividades con el objetivo de comprender el funcionamiento del sistema hidrogeológico de la cuenca, identificando el origen del agua y áreas de posible recarga, así como la interconexión entre las diferentes fuentes basado en técnicas isotópicas.

II. MÉTODOS

En el presente estudio se ha tenido por conveniente considerar tres puntos importantes a trabajar, el muestreo de agua usando una red de monitoreo para análisis isotópico y geoquímico, estudio de las fallas geológicas a lo largo de

la cuenca Ica y cuencas vecinas, así como los mecanismos de recarga y la geología del acuífero Ica, basado en los estudios de INGEMMET y ANA.

2.1 Muestreo de aguas meteóricas

La Agencia Internacional de Energía Atómica (OIEA) así como la Organización Meteorológica Mundial (OMM) como responsables del proyecto de la Red Mundial de Isótopos en Precipitación (GNIP), han estado estudiando los isótopos estables $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en precipitación en todo el mundo desde 1961. En aguas naturales hay dos isótopos estables de hidrógeno (protio ^1H y deuterio ^2H), con un 999.8 ‰ de ^1H y 0.16 ‰ de ^2H ; así como tres isótopos de oxígeno (^{16}O , ^{17}O y ^{18}O) con 997.6 ‰ de ^{16}O y 2.0 ‰ de ^{18}O , ^{17}O es muy poco abundante (Valdivielso et al., 2020).

La Tabla 1 muestra las coordenadas, la elevación, los nombres de las estaciones de monitoreo en donde se ha recolectado muestras de agua para este estudio. Para la toma mensual de muestras de las aguas meteóricas de la cuenca del río Ica durante el último trimestre del 2019, usamos una red de estaciones colectoras de agua de lluvia, río y manantiales; siguiendo los lineamientos de la OIEA. Recolectamos trece muestras de agua de río (Tabla 2), específicamente cinco en el canal Túnel cerro (CHO),

Tabla 1. Ubicación de la red de monitoreo en Ica – Huancavelica, estas estaciones están mapeados en la Figura 2

Estación	Altitud (msnm)	Este (m)	Norte (m)	Ubicación
Choclococha	4547	496237.65	8548959.29	Santa Ana
Cusicancha	3253	467935.37	8507115.34	San Antonio de Cusicancha
Tambo	4071	478955.94	8498270.16	Tambo
Challaca	1800	456925.39	8475526.76	San Francisco Sangayaico
Casa blanca	593	429868.92	8464909.65	Los Molinos
La Achirana	496	426567.15	8460450.86	Los Molinos
Huacachina	401	417428.00	8442425.00	Ica

Tabla 2. Determinaciones de ^2H y ^{18}O en las aguas superficiales de ríos y lagunas

Código	Ubicación	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
CHO 01	Choclococha	-11.7	-96
CHO 02	Choclococha	-5.4	-22
CHO 03	Choclococha	-11.4	-94
CHO 04	Choclococha	-11.4	-94
CHO 05	Choclococha	-11.5	-95
CUS 18	Cusicancha	-15.9	-117
CUS 19	Cusicancha	-16	-117
CUS 20	Cusicancha	-16	-117
TAM 28	Tambo	-13.4	-98.7
TAM 29	Tambo	-12.8	-93.1
ACH 31	Achirana	-10.4	-86
ACH 26	Achirana	-10.8	-88
ACH 27	Achirana	-12.2	-94
HUA No	Huacachina norte	-3.7	-48.15
HUA Su	Huacachina sur	-4.0	-49.15
HUA Oe	Huacachina oeste	-3.26	-47.69
HUA Es	Huacachina este	-3.53	-48.55

tres en el río de Cusicancha (CUS), dos en el río Tambo y tres en el río Ica (ACH); también se ha considerado cuatro muestras tomadas en los extremos (norte, sur, este y oeste) del lago Huacachina (2018) para fines de comparación. Se obtuvieron diez muestras de manantiales de cinco estaciones (TAM, CUS, CHA, CBL y ACH) a lo largo de la cuenca media, con alturas que van desde 496 y 4071 m.s.n.m. dentro de los departamentos de Ica y Huancavelica (Figura 2, Tabla 3). Tomamos ocho muestras de agua de lluvia (Tabla 4) usando colectores, siendo cinco en la estación Choclococha (CHO) y tres en Cusicancha (CUS); considerando que fue el inicio de este trabajo y además se empezó la toma de muestras en meses (octubre) donde las precipitaciones recién inician en la zona alta, lo cual no nos permitió tener mayor cantidad de datos en esta etapa del proyecto.

Los colectores de agua de lluvia consistieron en un depósito colector (cooler), cuya función es almacenar agua proveniente de las precipitaciones durante un periodo de tiempo (15 días o un mes), y para evitar cualquier proceso de cambio de fase (evaporación y condensación), los depósitos se insertaron en una caja de madera, aislada internamente con poliestireno expandido. Estos colectores fueron instalados en la cuenca alta expuesto a precipitaciones en el mismo periodo y cercanas a las estaciones pluviométricas del Servicio nacional de meteorología e hidrología (SENAMHI), en Choclococha (4547 m.s.n.m.), Cusicancha (3253 m.s.n.m.) y Challaca (1800 m.s.n.m.), para ello se siguió las indicaciones de la agencia internacional de energía atómica; se había previsto monitorear por lo menos durante 2 periodos estacionales, aquí mostramos un avance preliminar.

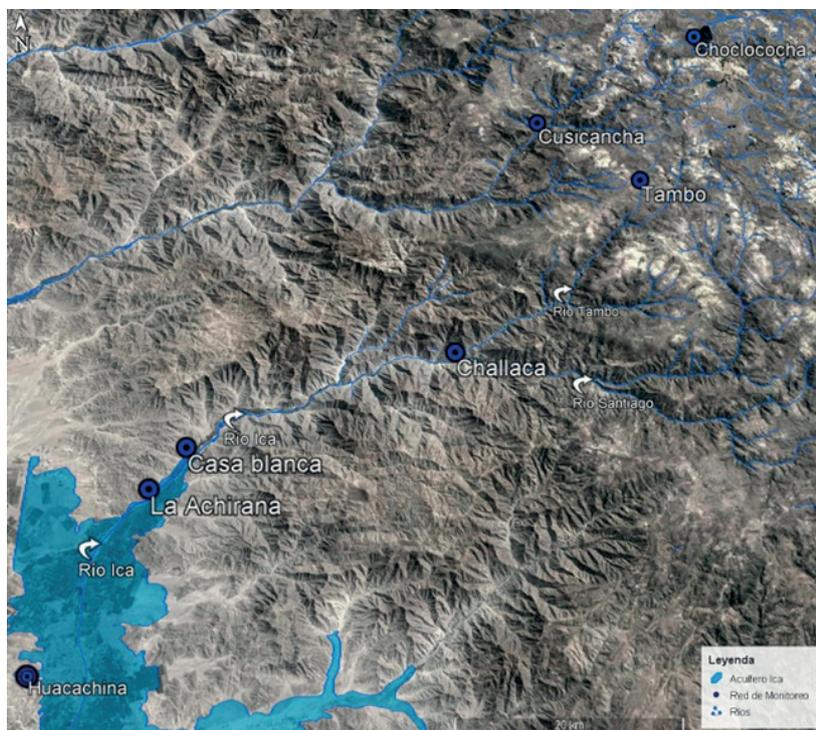


Figura 2. Red de monitoreo isotópico en la cuenca del río Ica.

Tabla 3. Determinaciones de ^2H y ^{18}O en agua de manantiales

Código	Ubicación	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
CUS 11	Cusicancha	-11.3	-84
CUS 12	Cusicancha	-11.4	-85
CUS 13	Cusicancha	-11.4	-85
CUS 14	Cusicancha	-11.3	-85
CHA 21	Challaca	-8.9	-67
CBL 22	Casa Blanca	-10.4	-83
CBL 23	Casa Blanca	-10.4	-83
ACH 24	Achirana	-10.7	-88
ACH 25	Achirana	-12.5	-95
TAM 30	Tambo	-11.5	-84.9

Tabla 4. Determinaciones de ^2H y ^{18}O en agua de lluvia

Código	Ubicación	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
CHO 06	Choclococha	-3.5	-7
CHO 07	Choclococha	-11.6	-96
CHO 08	Choclococha	-11.5	-75
CHO 09	Choclococha	-13.2	-87
CHO 10	Choclococha	-12.1	-78
CUS 15	Cusicancha	-2.4	-14
CUS 16	Cusicancha	-7.5	-51
CUS 17	Cusicancha	-11.4	-78

Las muestras de agua de manantial, río y precipitación se recolectaron utilizando un tubo de recolección debajo de la superficie del río y se filtraron usando filtros de agua de $0.45\ \mu\text{m}$ en botellas de polipropileno de alta densidad (evitando la presencia de aire en el frasco) de 10 ml para isótopos estables y análisis de química general. Todas las botellas se cerraron herméticamente (con tapas de polietileno) y se sellaron con cinta aislante para evitar fugas de agua y reducir posibles cambios de fase.

2.2. Fallas geológicas sobre la cuenca y el acuífero Ica

Nos centramos en revisar diversos estudios para mapear fallas geológicas desarrollados desde (ANA, 1969) hasta los de Vílchez et al. (2019); aquí podemos incidir que hay evidencias de una gran cantidad de fallas geológicas a lo largo de toda la cuenca del río Ica. En la cuenca baja (valle de Ica) se presentan dos sistemas principales de fallas, el primero de mayor antigüedad constituido por líneas de primer orden, orientadas de NNO-SSE formando el graben intermontañoso principal (entre las quebradas Largo y Tingue, así como entre los cerros La Cruz y Prieto) y el segundo de forma perpendicular de orientación OSO-ENE a SO-NE (11 fallas entre la línea Achirana-Guadalupe hasta Ocucaje) (ANA, 1969). Años después se han identificado otras fallas más como la falla que corre paralelo al río Ica en dirección N-S, desde Cerro Prieto hasta su desembocadura en el mar; estas estructuras son las causantes de otras fallas menores que ponen en contacto las aguas superficiales del río Ica con el acuífero (Peña Laureano et al., 2010). La cuenca media y alta presenta diversas fallas que ha sido mapeadas (Figura 1) y estudiadas por INGEMMET, dentro de ellas podemos mencionar a las fallas relacionadas a los yacimientos de Jatún Oreco y Antapite que conforman sistemas de fallas con rumbos NW-SE y NE-SW, así como estructuras menores NNE-SSW y E-W (Vílchez et al., 2019).

Las fallas son un tipo de deformación de la corteza terrestre que finaliza en ruptura, dando lugar a una gran variedad de estructuras geológicas, siendo las fallas geológicas de origen tectónico, las fracturas que se forman en la corteza terrestre, y se encuentran en rocas sedimentarias, intrusivas, metamórficas además de volcánicas producto de las deformaciones tectónicas, muchas de estas estructuras tienen propiedades hidráulicas, cuyas características son

anisótropas, por lo que la percolación se condiciona a la dirección predominante de las estructuras.

2.3. Recarga y la geología

Nuestro estudio se enfoca en la cuenca del río Ica, donde se ha determinado los límites de las principales unidades hidrogeológicas, clasificadas en cinco grupos regionales: 1) acuíferos porosos no consolidados, 2) acuíferos fisurados y acuitardos, 3) acuíferos fisurados y acuitardos, 4) acuíferos fisurados y acuitardos, 5) acuitardos y acuíferos. La secuencia estratigráfica que presenta la cuenca comprende rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas con rangos cronológicos comprendidos entre el Proterozoico y el cuaternario reciente, cuyas características hidrogeológicas son también influenciadas por la edad de las formaciones rocosas. De esta forma, las estructuras geológicas y la estratigrafía condicionan el límite de los sistemas acuíferos, la geometría de las unidades hidrogeológicas, las áreas de recarga y descarga y las direcciones de flujo de las aguas subterráneas desde que se infiltran en la montaña hasta llegar al valle del acuífero Ica (Peña Laureano et al., 2010).

Bajo el valle de Ica, el cual se extiende desde la bocatoma la Achirana hasta el sector Ocucaje, se encuentra el acuífero poroso no consolidado Ica, el cual se recarga continuamente de forma diversa (Peña Laureano et al., 2010), desde el cauce del río Ica y sus afluentes, canales de tierra, regadío, recarga por frente de montaña y recarga por bloque de montaña (MFR y MBR respectivamente, por sus siglas en inglés), este último por pequeños acuíferos a lo largo de la montaña dando lugar así al flujo local, intermedia y regional (Figura 3), consistente en: a) Local, el cual sólo se descarga dentro de la misma subcuenca en que se produjo la recarga; b) Intermedio, que evita la corriente local descargándose en una corriente superior (casi siempre fluye de forma perpendicular a la sección transversal del diagrama); c) Regional, que evita todos los manantiales de montaña y más bien sale directamente del bloque de montaña en el subsuelo, convirtiéndose así en recarga de bloque de montaña; y d) Flujo de pendiente frontal, es aquel que se recarga directamente por encima del frente de la montaña pasando a ser recarga de bloque de montaña (Meixner et al., 2016). El sistema de recarga de montaña, considera básicamente la corriente que ingresa en los frentes de montaña y la transferencia subsuperficial de agua subterránea se da desde el bloque de montaña hacia el acuífero (Figura 3), aún se investiga cómo los sistemas

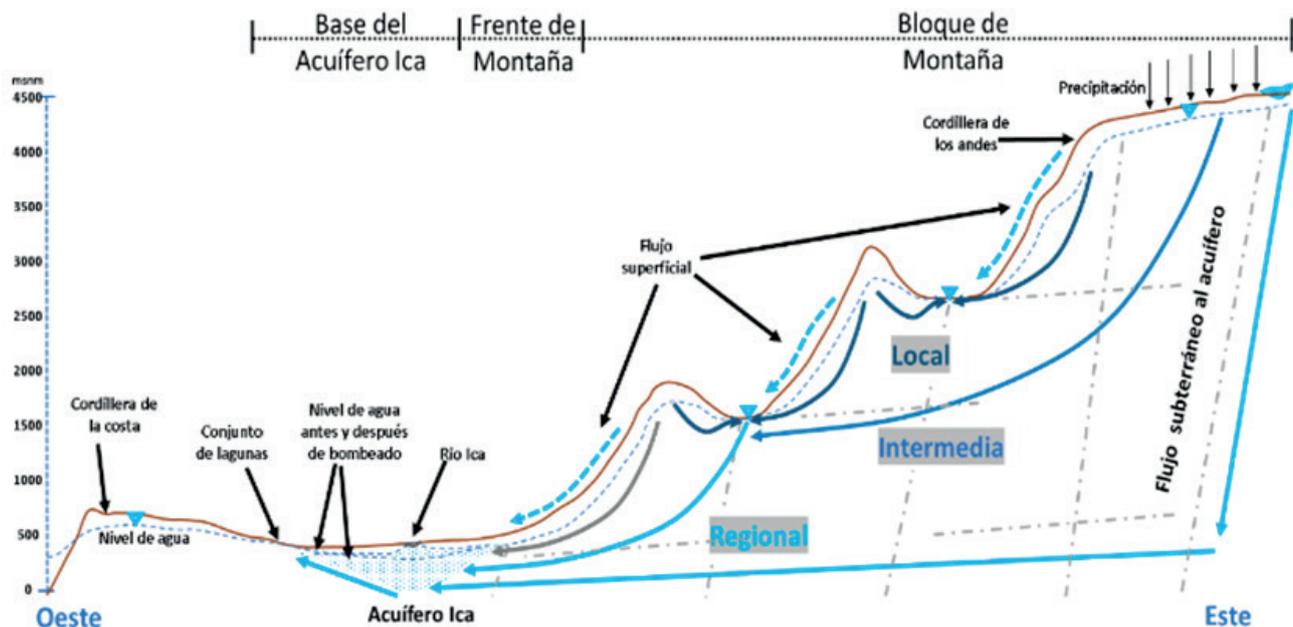


Figura 3. Diagrama conceptual de las 4 principales rutas del flujo (3 líneas solidas que llegan al acuífero y una superficial) en un sistema de bloque de montaña, diferenciando la MFR y MBR que están asociadas a las formaciones geológicas quienes inciden en la capacidad de almacenamiento y transmisibilidad que poseen las rocas y el suelo en su conjunto, para permitir el flujo hacia puntos de descarga de menor elevación como el acuífero Ica.

de montaña recargan los acuíferos en las zonas bajas a través de los procesos de recarga de frente de montaña y de recarga de bloque de montaña, pero se estima que la MBR es del 5 al 50% de la recarga del acuífero de la cuenca (Meixner et al., 2016).

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las muestras de agua (Tablas 2 a 4), se han procesado en el laboratorio de la Universidad de Calgary (Canadá), los valores isotópicos (^2H y ^{18}O) se analizaron usando un reactor (Finnigan Mat TC/EA) de "pirólisis" a alta temperatura acoplado a un espectrómetro de masas de isótopos (Finnigan Mat Delta + XL) en modo de flujo continuo, y las concentraciones de aniones y cationes se midieron con cromatografía iónica, que es una forma de cromatografía líquida que mide las concentraciones de especies iónicas separándolas en función de su interacción con una resina.

Al graficar de forma cruzada los valores de isótopos ambientales de las aguas meteóricas (Deuterio y oxígeno 18), siempre tienen un comportamiento lineal, lo cual se conoce como la Línea Meteorológica Mundial del Agua (GMWL), donde las precipitaciones a mayor elevación (zonas altas) tienden a tener valores más bajos de ^2H y ^{18}O y se ubican hacia la izquierda de la GMWL (Figura 4), aquí para la composición isotópica del agua de precipitación, superficial y de manantial, se usó la línea de agua meteórica local calculada a partir de las precipitaciones diarias $\delta^2\text{H} = 8.13 \delta^{18}\text{O} + 10.8\%$. La composición isotópica mensual de los manantiales de Cusicancha, Casa blanca, La Achirana y Tambos fue en gran medida invariable a lo largo del

tiempo a excepción de Challaca que muestra valores un poco más negativos (Tabla 3). La composición isotópica estable mensual del manantial de Cusicancha varió de -11.3% a -11.4% para $\delta^{18}\text{O}$ y -84% a -85% para $\delta^2\text{H}$ (Fig. 4); El manantial de Casa blanca y la Achirana (similar altitud) tienen un rango de composiciones isotópicas más amplio y más empobrecidos con valores mensuales que van desde 10.4% a -12.5% para $\delta^{18}\text{O}$ y -83% a -95% para $\delta^2\text{H}$ (Tabla 3). En el caso de Tambo (-11.5% para $\delta^{18}\text{O}$ y -84.9% para $\delta^2\text{H}$) y Challaca (-8.9% para $\delta^{18}\text{O}$ y -67% para $\delta^2\text{H}$), los valores del primero es similar a los demás manantiales pero en el manantial de Challaca se muestran valores más negativos, y al tener pocos datos proporcionan poca información.

La lluvia promedio muestreada en 2019 en Choclococha ($\delta^{18}\text{O} = -10.4 \pm 0.2\%$, $\delta^2\text{H} = -68.6 \pm 1\%$) y Cusicancha ($\delta^{18}\text{O} = -7.1 \pm 0.3\%$, $\delta^2\text{H} = -47.8 \pm 2\%$), lo que muestra que la variabilidad interanual en los valores de isótopos de precipitación puede ser muy grande (Tabla 4). Así mismo las muestras de agua superficial del río Ica obtenidas en la estación seca (octubre a diciembre 2019) tenían una composición isotópica enriquecida, mientras que las muestreadas en el Canal Choclococha y el río Tambo tenían una composición isotópica similar a los manantiales en esa zona (Tabla. 2), esto sugiere que los ríos están siendo alimentados por descargas de manantiales o descargas directas de las mismas aguas subterráneas que alimentan los manantiales. Por otro lado, los últimos 4 datos (muestreados por Bethune 2018) de esta Tabla corresponden a la laguna Huacachina (en el acuífero, cerca de Ica) con valores bastante positivos en relación con las demás muestras, lo que indica que sufrieron evaporación.

La señal isotópica de agua de lluvia y superficial (ríos) es bastante parecida, con excepción de las muestras en la Achirana en donde está afectada relativamente por evaporación (en menor proporción a Huacachina), siendo esto es más acentuado con la señal del agua de manantiales (Figura 4), indicando una interconexión entre ellos (aportes de manantiales a corrientes superficiales y viceversa).

Para la composición de deuterio respecto a la elevación de manantiales, ríos, aguas de lluvia de la estación seca de la cuenca del río Ica, podemos afirmar que las flechas indican líneas de mezcla hipotéticas entre fuentes de recarga a gran

altura (estación de San Antonio de Cusicancha), ya que los valores isotópicos casi idénticos al de las aguas en los manantiales (Casa Blanca y La Achirana) que afloran sobre el acuífero, indicarían que es probable que los manantiales limítrofes con el acuífero Ica, compartan una elevación de recarga común a más de ~3000 m.s.n.m. (Figura 5).

Los resultados de la geoquímica del agua se presentan en el diagrama de Piper (Figura 6), aquí se puede distinguir las diversas facies hidrogeoquímicas entre las muestras de agua; destacando tres grupos o facies, que muestran una evolución geoquímica del agua de tipo Ca-Mg-HCO₃,

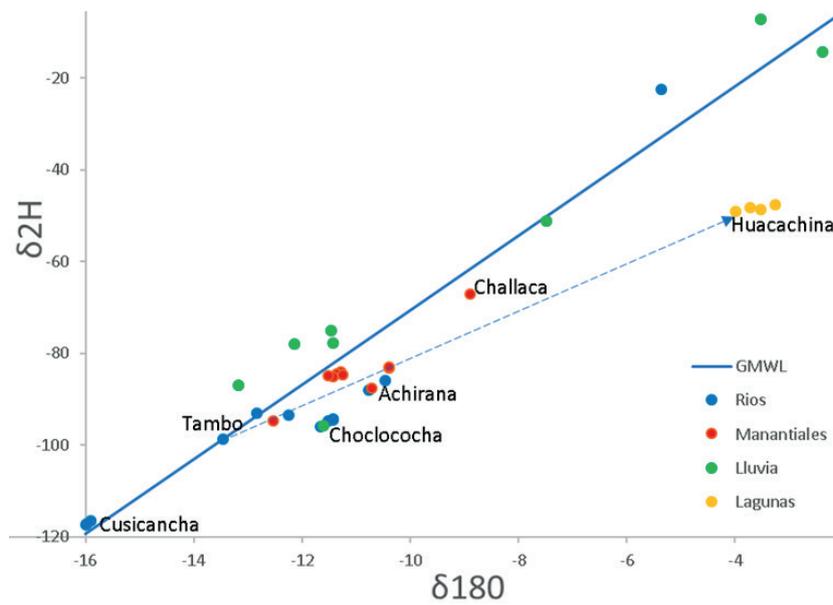


Figura 4. Línea meteórica global (GMWL) y los valores de ²H Vs ¹⁸O para muestras de agua superficial, manantiales y de lluvia de la Cuenca del río Ica.

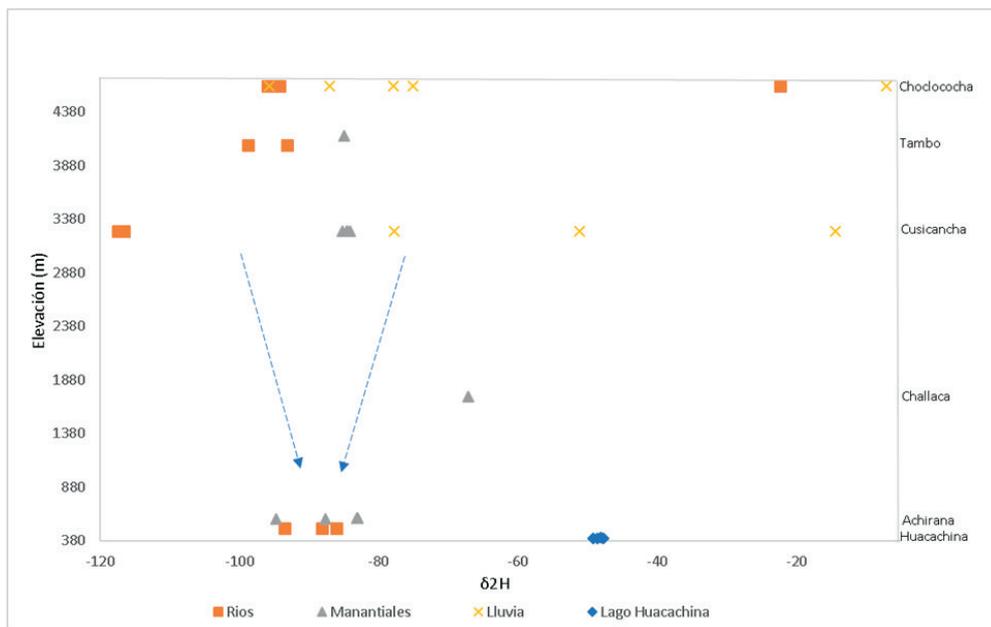


Figura 5. Composición de deuterio respecto a la elevación de manantiales, ríos, aguas de lluvia de la estación seca de la cuenca del río Ica

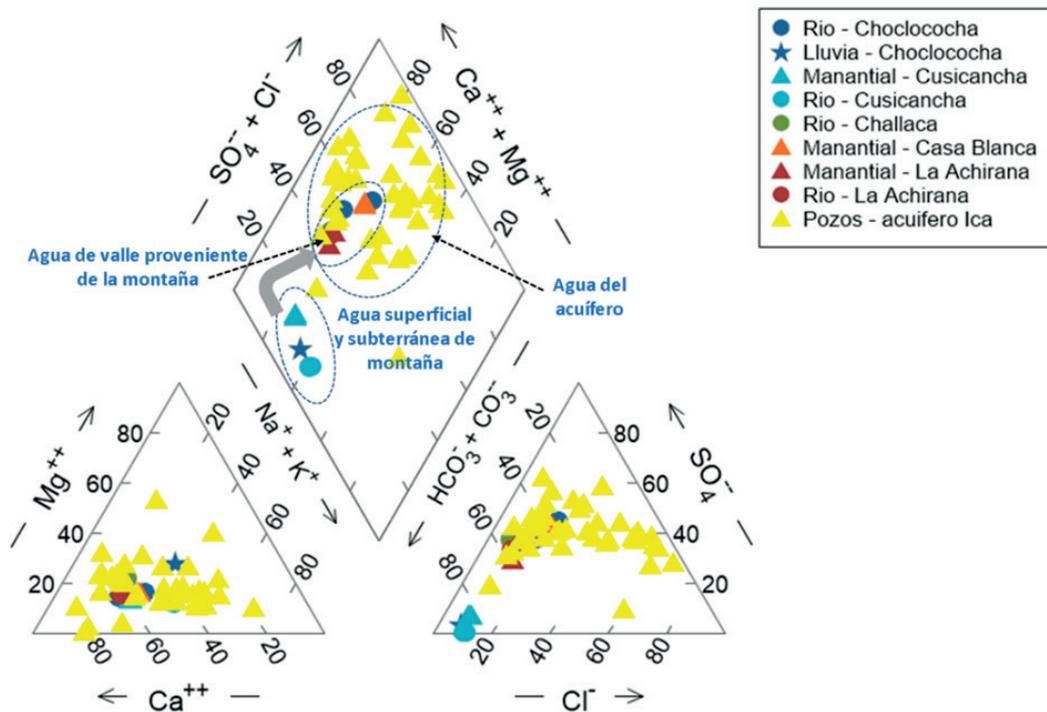


Figura 6. Diagrama de Piper de la composición geoquímica de agua proveniente de precipitación, ríos, manantiales y pozos perforados sobre el acuífero

este tipo de agua se encuentra en manantiales de mayor elevación al agua de tipo Ca-Cl que se encuentra en pozos y ríos en el valle costero. El agua tipo Na-Cl dentro de la región de Ica, se observó en el lago Huacachina que fueron sometidos a evaporación significativa (isotopo valores); y son comparables a los resultados obtenidos por Vilchez et al. (2019), en 35 muestras de manantiales cargadas de cloruro de sodio (Na Cl), al respecto se requiere mayor data tanto en el acuífero y los manantiales de la cuenca para un análisis más profundo; por ahora afirmamos que la presencia de Na-Cl podría resultar de un bombeo excesivo de pozos que extraen agua salina más profunda de la roca sedimentaria debajo del valle, esto parece probable ya que la región de altas concentraciones totales de sólidos disueltos se observa en la región suroeste. Otra posibilidad es que el agua de Na-Cl, sea de agua de mar, reliquia en un período geológico anterior cuando la región era un mar interior.

El agua proveniente de la precipitación que se infiltra en la cuenca alta lo hace sobre una gran cantidad de fallas mapeadas en la Figura 1, a la vez la densidad de fracturas que presentan mejoraría la permeabilidad fortaleciendo la percolación. De forma similar el río Ica a lo largo de su recorrido sobre la cuenca atraviesa numerosas fallas, fracturas y zonas alteradas, muchas de las cuales son hidráulicamente conductivas, capaces de permitir la infiltración de las aguas superficiales y por lo tanto la circulación del agua subterránea a través de ellas, esto nos permite plantear que hay una fuerte recarga desde los andes, como recarga por bloque de montaña.

El relieve que caracteriza a la parte alta de la cuenca donde nace el río Ica son las altiplanicies, montañas y serranías constituidas por materiales sedimentarios, ígneos volcánicos y vulcano-sedimentarios; y es allí donde se presenta acuíferos y acuitados de origen volcánico sedimentario y a la vez fisurado. Conceptualizar la cuenca y el acuífero es muy importante en nuestro estudio, ya que las montañas (los andes) reciben desproporcionadamente grandes cantidades de precipitación (efecto orográfico), devolviendo esta agua a través del flujo de corriente a áreas pobladas de menor elevación, alimentando manantiales que recargan los acuíferos (ver Figura 7).

La caracterización litológicas de la cuenca y el acuífero Ica desarrolladas por INGEMMET muestran un comportamiento permeable o impermeable de las formaciones geológicas de la cuenca, identificadas como un acuífero, acuífero o acuífugo (Figura 7), aquí la cuenca en la parte alta y media está formado mayoritariamente por acuíferos colgados como porosos no consolidados, fisurado sedimentario, fisurado volcánico sedimentario y pequeños acuíferos metamórficos; que permiten transmitir el flujo de forma local, intermedio y regional hasta aflorar finalmente bajo el acuífero Ica. Por otro lado, el río Ica y sus afluentes (ríos Tambo, Santiago, Cocharcas y Tingue) recorren la cuenca desde su origen en los departamentos de Huancavelica y Ayacucho drenando sus aguas hacia la vertiente del océano pacífico; pero en ambos casos ocurre sobre una gran cantidad de fallas geológicas (Figura 1). El agua infiltrada en la montaña constituye principalmente tres rutas de flujo subterráneo de manera local (en el trayecto

hacia abajo van aflorando como manantiales), intermedia (como parte de manantiales y pequeños acuíferos colgados) y regional (infiltración profunda que aflora en el acuífero), tener en cuenta que las trayectorias conceptuales del flujo de agua subterránea no se cruzan.

Considerando la señal isotópica, la geoquímica, la disposición de las fallas geológicas y la geología de la cuenca, nos dan indicios de que el acuífero Ica mayoritariamente se está recargando de forma natural

por las precipitaciones en la cuenca alta y media, que luego son filtradas a través de las fallas geológicas y los acuíferos colgados; dando lugar a las recargas de bloque de montaña y frente de montaña. Conocer su origen, el tiempo y el camino que sigue desde que se infiltra hasta aflorar en el acuífero es de gran importancia para entender la dinámica del mismo; para ello será necesario en adelante monitorear estacionalmente tanto la cuenca como el acuífero; siguiendo el modelo conceptual de la Figura 8.

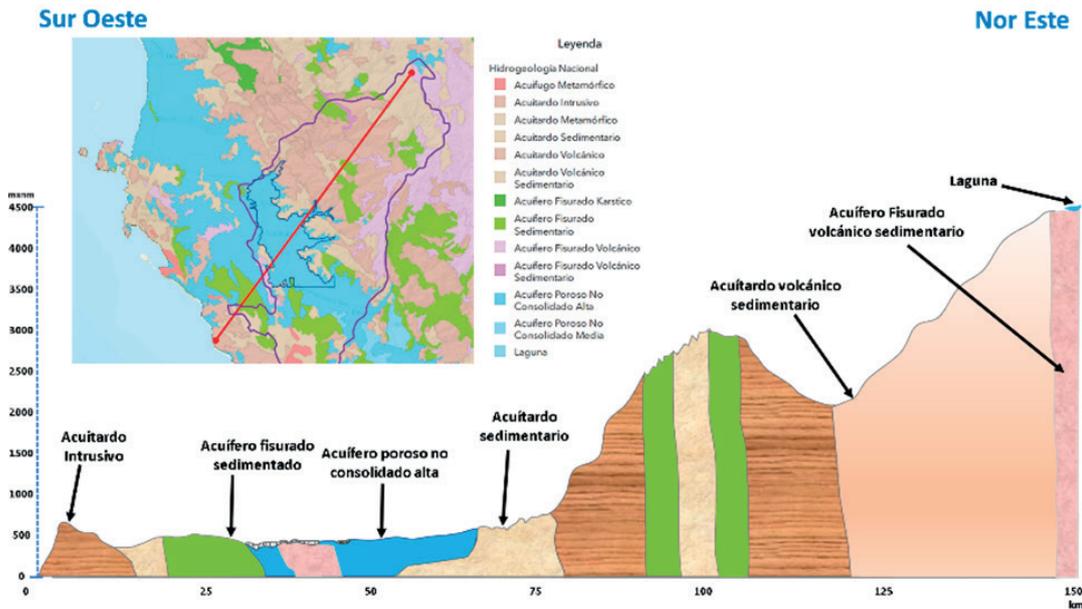


Figura 7. Geología de la cuenca del río Ica

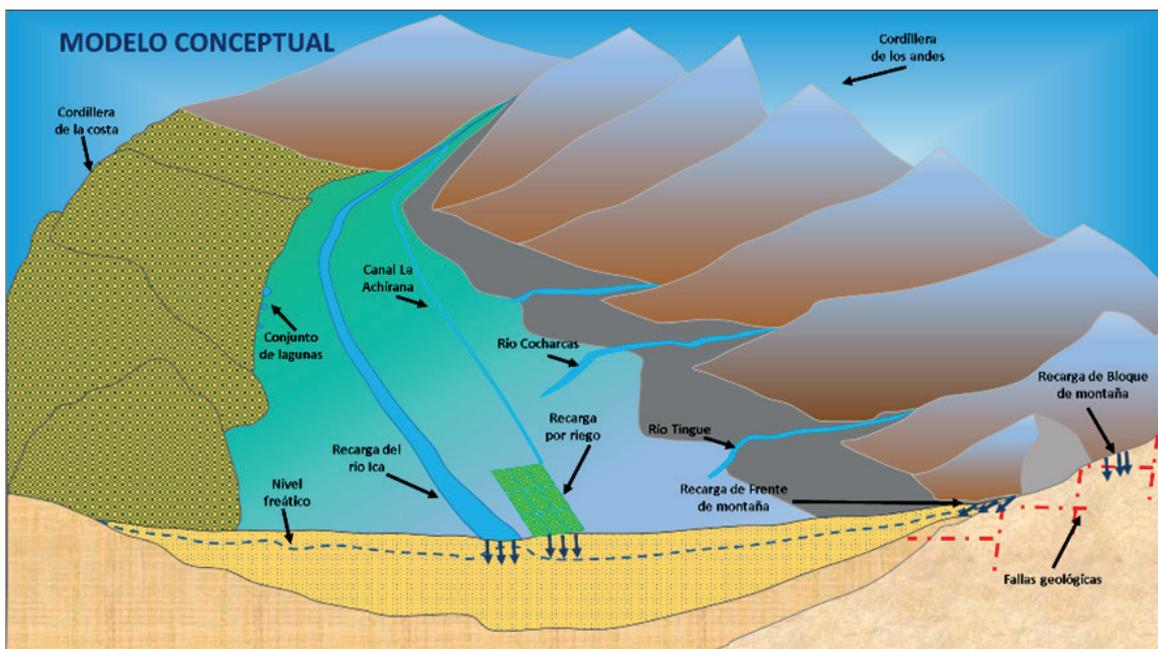


Figura 8. Modelo conceptual del acuífero Ica, considerando la recarga del río Ica a lo largo de su recorrido, así como la recarga por bloque de montaña sobre las fallas geológicas

IV. CONCLUSIONES

- El acuífero Ica recibe agua subterránea de dos fuentes principales para su recarga: caminos de flujo subterráneo de la montaña con rutas de flujo intermedia y regional, centrados en recarga por bloque de montaña (MBR), así como en menor medida por el recorrido que hace el río Ica a lo largo de la cuenca, asociados a rutas de flujo local y superficial. Así lo demuestra la similitud entre la señal isotópica y la geoquímica del agua del manantial de Tambo y las precipitaciones en Cusicancha, comparadas con los manantiales que afloran en Casa Blanca y La Achirana (límite con el acuífero), que indican existe una interconexión hidráulica entre la montaña y el acuífero Ica.
- La interconexión entre el acuífero y la montaña es a través de una gran cantidad de fallas extensas sobre toda la cuenca del río Ica, esto se ha plasmado en nuestro modelo conceptual que establece que el agua superficial se infiltra en la montaña en la temporada de lluvias para luego descargarse hacia el valle Ica, aflorando a través del sistema de las once fallas de orientación OSO-ENE hacia SO-NE, las cuales fueron mapeadas por Tahal (ANA, 1969). Esto es descrito por la geoquímica del agua que muestra la evolución de tres facies del tipo Ca-Mg-HCO₃ en los manantiales de mayor elevación que estarían ingresando como agua superficial y subterránea al acuífero.
- La recarga del acuífero debe considerar los mecanismos de infiltración para aguas meteóricas de la cuenca alta, las cuales tienen una relación directa con el acuífero, esto evidenciado en la señal isotópica de los manantiales ubicados en la cabecera del acuífero y cercanas al río Ica (La Achirana) que indican que comparten una elevación de recarga común a más de ~3000 m.s.n.m.

V. AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Científico del agua (ICA), en especial al Dr. José Machare Ordoñez, así como en la Universidad Nacional Agraria La Molina al Dr. Abel Mejía Marcacuzco, por su apoyo, consejos y apreciaciones para mejorar el presente trabajo de investigación.

VI. REFERENCIAS

- ANA. (1969). Recursos de aguas subterráneas del departamento de Ica. In *Autoridad Nacional del Agua*. CRYDI. <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/1530>
- ANA. (2017). Estudio hidrogeológico del acuífero Ica: Memoria final. *Autoridad Nacional Del Agua. Dirección de Calidad y Evaluación de Recursos*, 42–67. <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/2490>
- Burstein-Roda, T. (2018). Reflexiones sobre la gestión de los recursos hídricos y la salud pública en el Perú. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 35(2), 297–303. <https://doi.org/10.17843/RPMESP.2018.352.3641>
- Indij, D., & Schreider, M. (2011). *Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) y su aprovechamiento para la*

agricultura frente al Cambio Climático en la Región Andina. GIZ GmbH – Oficina Regional Para Los Países Andinos. <https://www.bivica.org/files/recursos-hidricos-gestion.pdf>

- Lambán, L. J., Jódar, J., Custodio, E., Soler, A., Sapriza, G., & Soto, R. (2015). Isotopic and hydrogeochemical characterization of high-altitude karst aquifers in complex geological settings. The Ordesa and Monte Perdido National Park (Northern Spain) case study. *Science of The Total Environment*, 506–507(15), 466–479. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.11.030>
- Meixner, T., Manning, A. H., Stonestrom, D. A., Allen, D. M., Ajami, H., Blasch, K. W., Brookfield, A. E., Castro, C. L., Clark, J. F., Gochis, D. J., Flint, A. L., Neff, K. L., Niraula, R., Rodell, M., Scanlon, B. R., Singha, K., & Walvoord, M. A. (2016). Implications of projected climate change for groundwater recharge in the western United States. *Journal of Hydrology*, 534, 124–138. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2015.12.027>
- Muñoz, I. (2016). Agro-exportación y sobreexplotación del acuífero de Ica en Perú. *ANTHROPOLOGICA*, 1(37), 115–138. <https://doi.org/https://doi.org/10.18800/anthropologica.201602.005>
- Valdivielso, S., Vázquez-Suñé, E., & Custodio, E. (2020). Origin and variability of oxygen and hydrogen isotopic composition of precipitation in the Central Andes: A review. *Journal of Hydrology*, 587(124899). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124899>
- Peña Laureano, F., Sánchez Díaz, M., & Pari Pinto, W. (2010). Hidrogeología de la cuenca del río Ica. Regiones Ica y Huancavelica - [Boletín H 3]. *Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico - INGEMMET*, H(3), 1–349. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/370>
- Vílchez, M. M. S., Ochoa Zubiarte, M. B., & Pari Pinto, W. (2019). Peligro geológico en la región Ica - [Boletín C 67]. *Repositorio Institucional INGEMMET. Geodinámica e Ingeniería Geológica*, C(67), 1–212. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/2353>
- Contribución de autoría**
- Conceptualización: (David Bethune, James Apaestegui Campos, Joselito Robles Silvestre)
- Curación de datos: (David Bethune, Joselito Robles Silvestre)
- Análisis formal: (Joselito Robles Silvestre, David Bethune)
- Adquisición de fondos: (Cathryn Ryan, David Bethune)
- Investigación: (Joselito Robles Silvestre, David Bethune)
- Metodología: (David Bethune, David Bethune, James Apaestegui Campos)
- Administración del proyecto: (Joselito Robles Silvestre, David Bethune)
- Recursos: (Cathryn Ryan, Joselito Robles Silvestre)
- Software: (Joselito Robles Silvestre, David Bethune)
- Supervisión: (James Apaestegui Campos)
- Validación: (Joselito Robles Silvestre, David Bethune)
- Visualización: (Joselito Robles Silvestre, David Bethune)
- Redacción - borrador original: (Joselito Robles Silvestre, David Bethune)
- Redacción - revisión y edición: (James Apaestegui Campos, Cathryn Ryan)