

ESTUDIO DE LA HIDROGEOQUÍMICA DE LOS SISTEMAS KÁRSTICOS EN LOS ANDES DEL NORTE DEL PERÚ

I. INTRODUCCIÓN

Aunque los carbonatos solo representan entre un 10 a 12% de las superficies continentales, su alteración química juega un papel importante tanto en los flujos de transferencia de CO₂ entre la atmósfera y la zona crítica, en la determinación de las condiciones de vida (condiciones fisicoquímicas y fuentes de nutrientes) del medio acuático y en los balances para la exportación de materia disuelta a los océanos. Sin embargo, el impacto de la alteración de las formaciones de carbonato en los ciclos de carbono a corto y largo plazo ha recibido solo una atención limitada en comparación a las formaciones de silicato. Las peculiaridades de estas formaciones son: (1) su cinética de alteración muy superior a la de las rocas de silicato; (2) la precipitación de carbonatos secundarios a partir de los productos de disolución transportados por los hidrosistemas.

La temperatura de la superficie de la tierra es un parámetro de control principal de estos procesos de meteorización, pero actúa en dos direcciones opuestas. Por un lado, termodinámicamente (en un "mundo mineral") la capacidad de disolución de los carbonatos en el agua disminuye con el aumento de la temperatura; pero, por otro lado, las temperaturas más altas favorecen la actividad biológica que aumenta la presión parcial de CO₂ (pCO₂) y los contenidos de ácidos orgánicos en la zona crítica, favoreciendo así su alteración. Recientemente, Calmels et al. (2014) demostraron la importancia de estos controles a lo largo de un transecto altitudinal / climático / ecológico (5-11°C) en un ambiente templado (Jura-Francia). Con el fin de evaluar la relevancia de este control a escala global, Gaillardet et al. (sometido a Chemical Geology) exploró la relación temperatura vs. intensidad de alteración bajo todos los tipos de clima. Estos autores señalan en particular la falta de datos en un entorno tropical, aunque se sabe que en estas regiones dominan los flujos exportados hacia los océanos.

En este contexto, los Andes peruanos constituyen un campo privilegiado de estudio para restringir mejor estos procesos y su generalización. Esta región concentra casi el 90% de las formaciones kársticas de la cuenca del Amazonas, y por lo tanto juega un papel importante en el equilibrio de exportación de sólidos disueltos por el Río Amazonas (Moquet et al., 2011). Además, estas formaciones kársticas se distribuyen a lo largo de un fuerte gradiente de altitud (entre 500m hasta 5000m), lo que ofrece la oportunidad de explorar el efecto de la variabilidad del clima andino / ecológico (menores a 10°C hasta mayores de 20°C) en el flujo y proceso de alteración de carbonatos.

Con respecto a la distribución hidrogeográfica, este estudio se centró en las formaciones carbonatadas karstificadas del Norte del Perú, principalmente en las cuencas andinas de los ríos Marañón y Huallaga, con unas muestras adicionales en la cuenca alta del Río Ucayali (región de Tarma) y en el Alto Cañete (Cuenca del Pacífico). Cabe considerar que algunas de estas resurgencias se encuentran localizadas cerca, o al interior de áreas naturales protegidas por el SERNANP (Figura 1 y Tabla 1).

Este proyecto cuenta con la colaboración de varias instituciones, tanto peruanas como francesas: (1) Instituto Geofísico del Perú (IGP), (2) Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico del Perú (INGEMMET), (3) Universidad Nacional Toribio Rodríguez Mendoza (UNTRM, Chachapoyas), (4) Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD), (5) Instituto de Física del Globo de París (IPGP) y (6) Laboratorio de Geociencias de la Universidad de Paris Sud (GEOPS).

Es así que el presente trabajo se centró en estudiar el papel de los macizos kársticos de los Andes Peruanos en el consumo de CO₂ atmosférico por los procesos de alteración química de las rocas carbonatadas, así como el aporte en nutrientes al ecosistema acuático andino-amazónico por las fuentes kársticas, denominadas resurgencias.

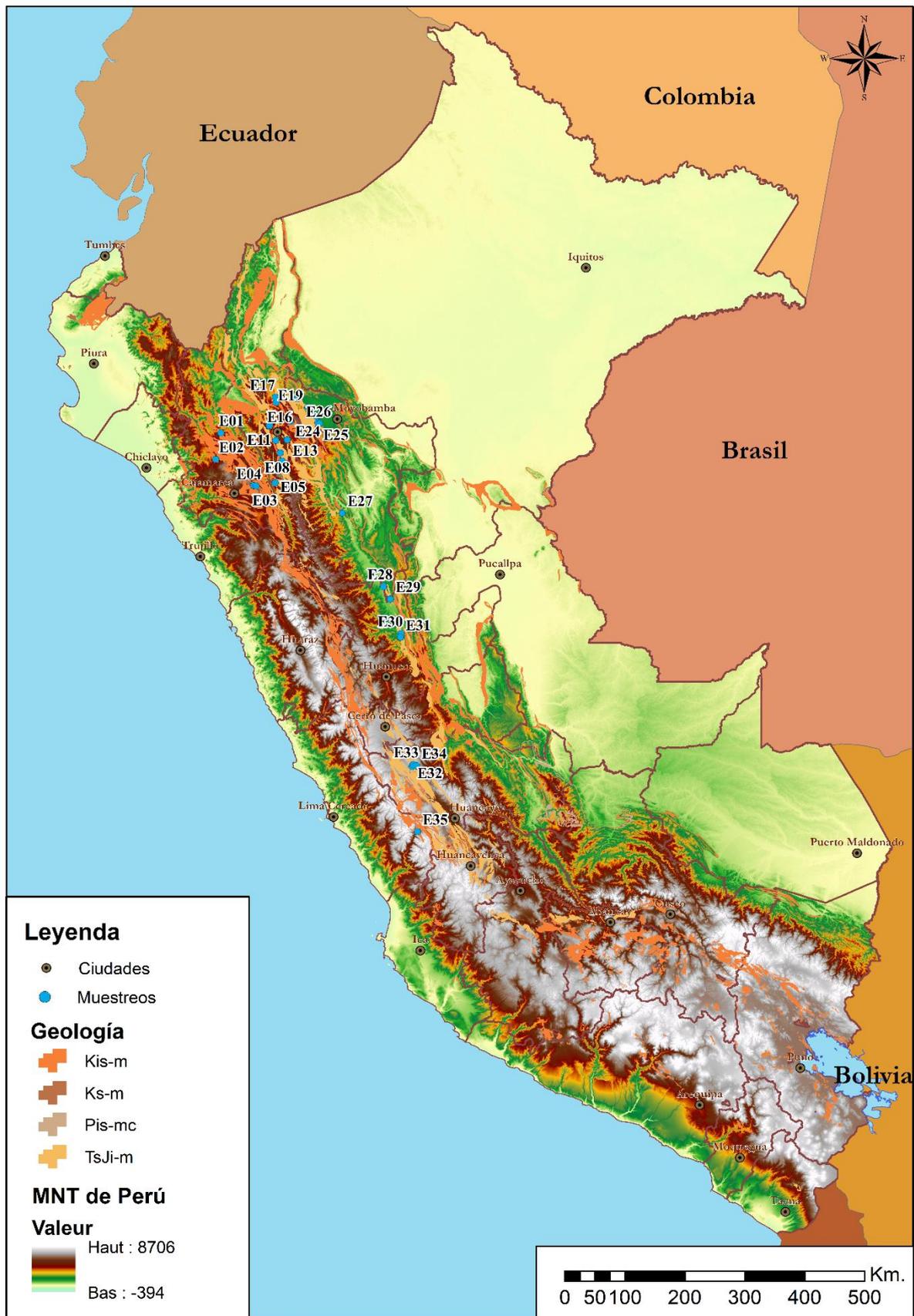


Figure 1. Localización de las resurgencias muestreadas de los sistemas kársticos en los andes del Perú.

II. METODOLOGÍA

Un total de 35 resurgencias kársticas fueron muestreadas. El procedimiento seguido se detalla a continuación:

A. Mediciones in - situ:

- ✚ Se realizó la determinación de las coordenadas geográficas, así como de la altura del punto de muestreo, utilizando un GPS marca Garmin.
- ✚ Se determinó el pH, la conductividad eléctrica, el oxígeno disuelto en el agua y la temperatura con un multi-parámetro marca Hatch.
- ✚ Se determinó la alcalinidad de cada resurgencia utilizando un kit de alcalinidad compuesto de una tituladora digital, ácido sulfúrico 1.6 N y agente Permachem como indicador de viraje (método de Gran).
- ✚ Se determinó el caudal en cada punto de muestreo utilizando ya sea un correntómetro o una pistola láser (velocímetro) con una cinta métrica.



Ilustración 1. A la izquierda: Medición del caudal del Río Olía junto a un estudiante de la universidad Toribio Rodríguez de Mendoza. A la derecha: Determinación de la alcalinidad de la muestra de la resurgencia de Aguas Claras.

B. Mediciones ex – situ:

- ✚ Se llevó a cabo la recolecta de 7 muestras filtradas: cationes y trazas (1), aniones (1), carbono orgánico disuelto (1), isotopos del agua (1) y carbono 13 (3), utilizando un sistema de micro filtración compuesto por un filtrador, un filtro de $0.22\ \mu\text{m}$ y una jeringa. Al final de cada resurgencia, el filtro utilizado fue conservado en una caja petri.
- ✚ Se realizó la toma de una muestra sin filtrar para analizar el isotopo del carbono 14 en cada una de las resurgencias.
- ✚ Se realizó la acidificación de las muestras de carbono orgánico disuelto, así como de cationes y trazas.
- ✚ En 9 resurgencias se tomó una muestra filtrada de carbono 14 y una muestra de 5 litros de aguas que fueron filtradas en el laboratorio de la Universidad Agraria La Molina – Lima, recuperándose solo el filtro utilizado en cada filtración.

Los análisis geoquímicos de las muestras recolectadas serán realizados en el laboratorio del Instituto de Física del Globo de París (IPGP) y el laboratorio de Geociencias de la Universidad de Paris Sud (GEOPS), ambos localizados en Paris, Francia.



Ilustración 2. A la izquierda: Comienzo del muestreo de la resurgencia de Ojo de Mullo, junto a pobladores de la zona. A la derecha: Filtrado de las muestras de la resurgencia de Río Negro.

III. RESULTADOS

El equipo de investigación del presente estudio estuvo conformado por 4 integrantes: J. L. Guyot, F. Ulloa, X. Robert y C. Romero. Así mismo, las actividades de muestreo de agua se realizaron entre los días 16 de febrero y 6 de marzo de 2018, según el cronograma de muestreo de la tabla 1.

Tabla 1. Resultados del muestreo realizado en los sistemas kársticos andinos del Perú

| N° | Nombre de la Resurgencia | Grados decimales | | | Fecha | pH | T (°C) | Oxígeno disuelto (mg/L) | Conductividad (mS/cm) | Alcalinidad (ppm HCO ₃ ⁻) | Caudal (m ³ /s) | ANP |
|------|--------------------------|------------------|---------|--------|---------------------|-----|--------|-------------------------|-----------------------|--|----------------------------|---------------|
| | | Lat. | Long. | Altura | | | | | | | | |
| E01 | Ojo de Mullo | 6.2410 | 78.7194 | 2071 | 16/02/2018 16:00 | 7.4 | 13.7 | 6.6 | 158 | 128 | 1.05 | PN Cutervo |
| E02 | Chancay | 6.6403 | 78.7971 | 1859 | 18/02/2018 10:00 | 8.0 | 16.0 | 8.3 | 51 | 92 | 10 | |
| E03 | Lluñez | 7.0374 | 78.2272 | 3578 | 19/02/2018 11:10 | 7.1 | 11.2 | 6.2 | 251 | 164 | 0.15 | |
| E04 | Peña Saturno | 7.0437 | 78.1901 | 3636 | 19/02/2018 13:00 | 7.1 | 12.3 | 6.6 | 272 | 240 | 0.1 | |
| E05 | Pusac | 6.9984 | 77.9065 | 1460 | 20/02/2018 11:50 | 7.8 | 15.2 | 8.4 | 152 | 100 | 12 | |
| E06 | Leymebamba | 6.7099 | 77.8039 | 2240 | 20/02/2018 17:50 | 7.6 | 12.5 | 8.1 | 125 | 92 | 1.5 | |
| E06A | Leymebamba Salida | 6.6665 | 77.8006 | 2085 | 21/02/2018 9:00 | 7.7 | 13.0 | 8.2 | 105 | 100 | 0.5 | |
| E07 | Timbuj | 6.5433 | 77.8272 | 1972 | 21/02/2018 9:50 | 7.8 | 13.2 | 7.9 | 115 | 72 | 5 | |
| E08 | Condechaca | 6.3545 | 77.8961 | 1791 | 21/02/2018 11:22 | 7.5 | 15.5 | 7.4 | 104 | 64 | 3 | |
| E10 | Quiocta | 6.1391 | 77.9906 | 2773 | 21/02/2018 18:50 | 7.6 | 15.3 | 6.8 | 282 | 178 | 0.025 | |
| E09 | Huacangral | 6.1228 | 77.9896 | 2850 | 21/02/2018 17:30 | 8.3 | 15.0 | 7.2 | 139 | 124 | 0.225 | |
| E11 | Río Seco - Soloco | 6.2807 | 77.4886 | 2626 | 22/02/2018 13:30 | 7.5 | 13.1 | 7.1 | 116 | 72 | 3.25 | |
| E12 | Río Olla | 6.3465 | 77.7224 | 2542 | 23/02/2018 14:30 | 7.9 | 12.3 | 8.1 | 112 | 92 | 2.05 | |
| E13 | Pinufina | 6.0675 | 77.6715 | 2798 | 24/02/2018 12:55 | 8.2 | 13.0 | 7.7 | 72 | 48 | 0.08 | |
| E14 | Lindero | 6.0534 | 77.6824 | 2894 | 24/02/2018 14:55 | 8.0 | 12.5 | 7.5 | 90 | 74 | 0.035 | |
| E15 | Cacaguta | 5.7803 | 77.8903 | 1841 | 25/02/2018 11:00 | 7.8 | 18.3 | 7.6 | 232 | 190 | 0.003 | |
| E16 | Shatuca | 5.7013 | 77.9016 | 1911 | 25/02/2018 13:48 | 7.4 | 16.0 | 7.0 | 174 | 140 | 1 | |
| E17 | Aguas Claras | 5.7225 | 77.5750 | 964 | 25/02/2018 17:00 | 7.7 | 18.0 | 5.4 | 149 | 116 | 3 | |
| E18 | Tigre Perdido | 5.8540 | 77.4165 | 929 | 26/02/2018 9:30 | 7.9 | 20.0 | 8.3 | 181 | 118 | 0.1 | |
| E19 | Peña Blanca | 5.8539 | 77.3945 | 856 | 26/02/2018 10:45 | 7.5 | 20.3 | 5.8 | 205 | 168 | 1.2 | |
| E20 | Piedra Brillante | 5.8996 | 77.3603 | 910 | 26/02/2018 12:30 | 7.7 | 20.5 | 8.2 | 176 | 124 | 0.1 | |
| E21 | Soritor | 5.9124 | 77.3706 | 780 | 26/02/2018 16:30 | 7.7 | 19.2 | 8.2 | 156 | 164 | 0.9 | |
| E22 | Palestina | 5.9270 | 77.3522 | 819 | 26/02/2018 17:50 | 7.9 | 19.8 | 8.4 | 175 | 152 | 0.1 | |
| E23 | Tioyacu | 5.9923 | 77.2872 | 825 | 27/02/2018 11:45 | 7.7 | 18.5 | 8.0 | 154 | 100 | 3.4 | |

| | | | | | | | | | | | | |
|-----|-------------------------|---------|---------|------|---------------------|-----|------|-----|-----|-----|-------|----------------|
| E24 | Río Negro | 6.0876 | 77.2628 | 855 | 27/02/2018 14:15 | 7.6 | 16.8 | 7.3 | 172 | 150 | 16.5 | |
| E25 | Cascayunga | 6.0995 | 77.2402 | 880 | 27/02/2018 16:45 | 7.4 | 21.1 | 7.9 | 212 | 158 | 0.1 | |
| E26 | Resurgencia de Churos | 7.4511 | 76.8979 | 399 | 02/03/2018 16:45 | 8.4 | 22.9 | 8.8 | 155 | 118 | 1.75 | PN Río Abiseo |
| E27 | Manantial de Santa Cruz | 8.5628 | 76.2798 | 502 | 03/03/2018 10:00 | 7.5 | 21.4 | 8.0 | 195 | 160 | 0.04 | |
| E28 | Alcantarillado | 8.7511 | 76.1773 | 538 | 03/03/2018 12:00 | 7.5 | 22.1 | 8.3 | 197 | 148 | 0.8 | |
| E29 | Remanso Azul | 9.2729 | 76.0150 | 645 | 03/03/2018 15:00 | 7.4 | 22.2 | 8.2 | 145 | 102 | 3 | |
| E30 | Ojo de agua | 9.3286 | 76.0243 | 674 | 03/03/2018 17:40 | 7.3 | 21.6 | 7.7 | 218 | 154 | 0.02 | PN Tingo María |
| E31 | Antipa Yarguna | 11.2810 | 75.8518 | 4052 | 04/03/2018 13:20 | 8.1 | 10.7 | 7.1 | 213 | 156 | 0.01 | |
| E32 | Pacu Huayen | 11.2509 | 75.8328 | 3838 | 04/03/2018 15:00 | 7.8 | 11.2 | 7.1 | 216 | 152 | 0.005 | |
| E33 | Huagapo | 11.2683 | 75.7867 | 3558 | 04/03/2018 16:00 | 8.0 | 11.5 | 7.5 | 172 | 122 | 0.1 | |
| E34 | Alis | 12.2670 | 75.7699 | 3307 | 05/03/2018 12:00 | 7.3 | 13.2 | 4.5 | 255 | 184 | 1 | RP Nor Yauyos |

Así mismo se realizó los gráficos de la alcalinidad en función de la conductividad (figura 2) y de la temperatura en función de la altura (figura 3).

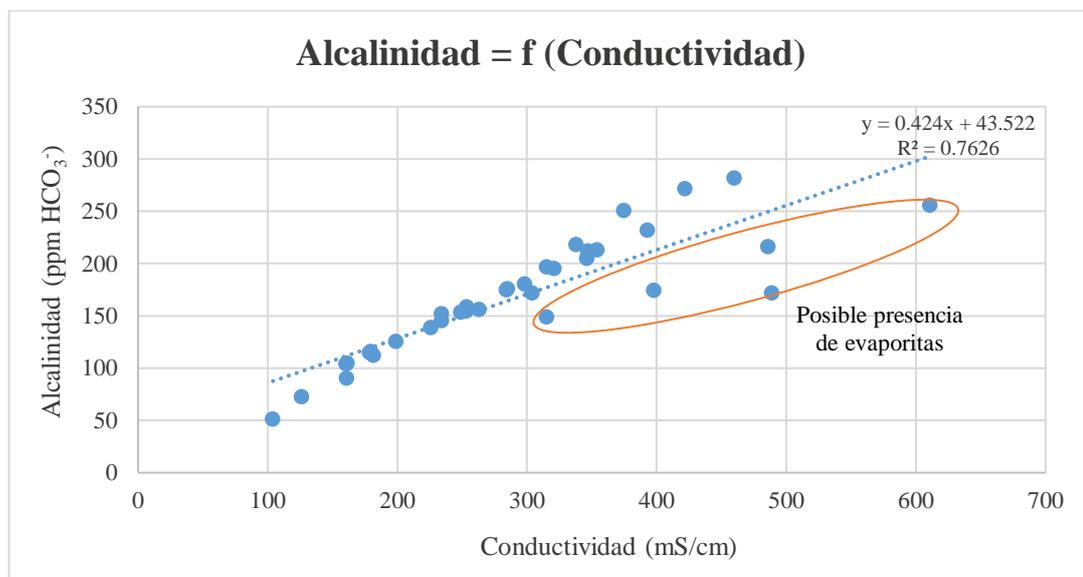


Figura 1. Conductividad en función de la alcalinidad.

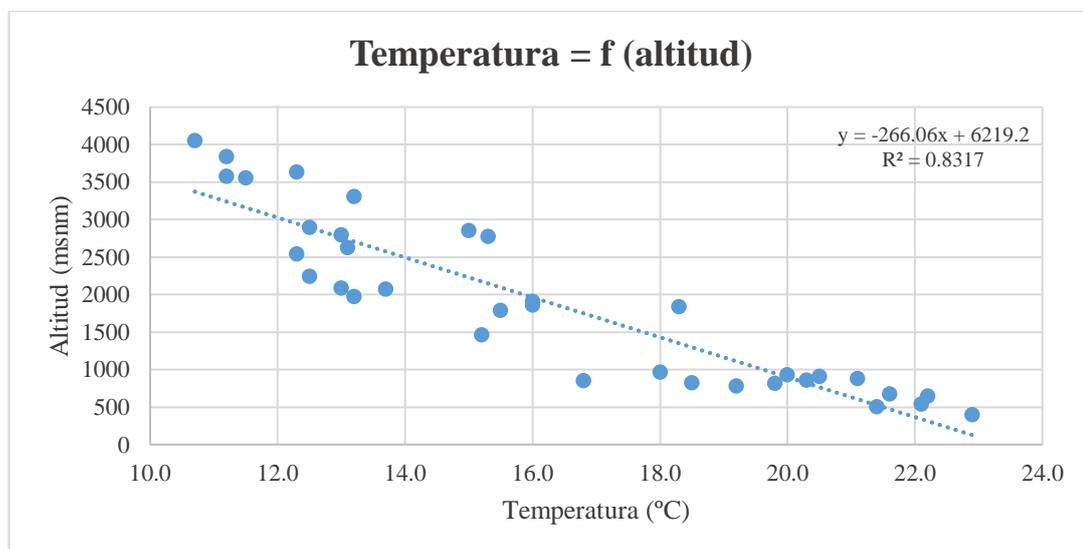


Figura 2. Temperatura en función de la altura.

IV. CONCLUSIONES

Como se puede apreciar en la figura 2 y 3, los datos recolectados nos muestran una buena afinidad entre la conductividad y la alcalinidad, con un coeficiente de correlación positivo de 0.76; lo cual refleja que una alcalinidad alta conlleva a una fuerte conductividad, en la mayoría de las resurgencias. Sin embargo, en los puntos de muestreo Shatuca (E16), Aguas Claras (E17), Pacu Huayen (E32), Huagapo (E33) y Alis (E34), observamos una desviación de esta tendencia. Suponemos que esto es debido a la presencia de otro anión mayor que influencia sobre la conductividad, pudiendo provenir, por ejemplo, del yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) o de la halita (NaCl), ambas evaporitas. Esto se podrá confirmar a partir de los análisis geoquímicos que se llevarán a cabo en Francia. Cabe destacar que, si no consideramos estas 5 resurgencias, el coeficiente de correlación aumenta hasta 0,98. Por otro lado, se evidencia la fuerte correlación inversa (0.83) entre la temperatura y la altitud. Estos resultados preliminares nos servirán posteriormente para completar el estudio de los sistemas kársticos andinos.

En el mes de agosto del 2018 se realizará la entrega de los resultados del análisis geoquímico de las resurgencias y a finales del mismo mes se realizará la presentación del informe técnico completo durante la conferencia de Chachapoyas (27-28/08), coorganizada con el SERNANP.

V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Calmels, D., Gaillardet, J., & François, L. (2014). Sensitivity of carbonate weathering to soil CO_2 production by biological activity along a temperate climate transect. *Chemical Geology*, 390(Supplement C), 74–86.
- Moquet, J.-S., Crave, A., Viers, J., Seyler, P., Armijos, E., Bourrel, L., Guyot, J.-L. (2011). Chemical weathering and atmospheric/soil CO_2 uptake in the Andean and Foreland Amazon basins. *Chemical Geology*, 287(1–2), 1–26.