



SGP
FUNDADA 1924

Sociedad Geológica del Perú

Journal Homepage: www.sgp.org.pe

ISSN 0079-1091

Las resurgencias del Alto Mayo (San Martín, Perú): estudio hidrológico sobre un karst tropical andino-amazónico

Olivier Grandjouan¹⁻², Liz Hidalgo³⁻⁴, James Apaéstegui⁵, Patrice Baby², Gérard Cochonneau², Elmer Condori⁶, Jhan Carlo Espinoza⁵, Pascal Fraizy², Darwin Huaman⁵, Hervé Jourde⁷, Naomi Mazzilli⁸, Sergio Morera⁵, Fluquer Peña⁶, Fabien Renou⁶, Xavier Robert⁹, William Santini², Abdel Sifeddine³, Jean Loup Guyot²

¹ UnilaSalle, Beauvais, Francia (ograndjouan@gmail.com)

² IRD-GET, Lima, Perú

³ IRD-LOCEAN, Paris, Francia

⁴ UNTRM, Chachapoyas, Perú

⁵ IGP, Lima, Perú

⁶ INGEMMET, Lima, Perú

⁷ UM2-HSM, Montpellier, Francia

⁸ UAPV-EMMAH, Avignon, Francia

⁹ IRD-ISTERRE, Lima, Perú

ABSTRACT

The Alto Mayo calcareous mountains (San Martín, Perú) present a developed and active karstic system, nowadays poorly studied. The aim of this study is to determine the discharge of the main resurgences of this region and their catchment area. We used hydrologic and pluviometric data used from the local observatory (ANA and SENAMHI) and from the KarstAm project. We measured some resurgences' discharges at 24 m³/s on average, ranking them among the most important of South America. The seasonable variability of the discharges shows an atypical behavior, closer to a porous than a karstic aquifer. As the specific discharges are higher than the regional tendency, we reevaluated catchment areas, by assuming the presence of major karstic captures upstream. We also corrected the precipitation values using the regional vector method. These recalculated specific discharges are then closer to the regional tendency, but the run-off coefficient remains too high. We attribute the errors to the precipitations values in the global Alto Mayo basin that seem underestimated.

RESUMEN

El macizo kárstico del Alto Mayo (San Martín, Perú) tiene una red de drenaje desarrollada, activa y poco estudiada. El propósito de este estudio es determinar los caudales de las resurgencias y sus cuencas hidrográficas correspondientes. Los datos hidrológicos y pluviométricos utilizados provienen de los observatorios locales (ANA y SENAMHI) y del proyecto KarstAm. Los caudales medidos alcanzan hasta 24 m³/s en promedio para algunas resurgencias, situándolas entre las más grandes de Sur América. La poca variabilidad temporal del caudal de uno de los acuíferos (Río Negro) muestra un comportamiento atípico en relación a los acuíferos kársticos, pareciéndose más a un acuífero poroso. Los caudales específicos de las cuencas topográficas son superiores a la tendencia regional, por lo que las cuencas hidrográficas han sido recalculadas suponiendo la presencia de captación kárstica. Los datos de precipitación han sido corregidos con el método del vector regional. Los caudales específicos recalculados son más cercanos a los valores regionales, aunque se mantienen con elevados coeficientes de escurrimiento. Estos errores son atribuidos a una subestimación general de las precipitaciones en la cuenca del Alto Mayo.

Palabras claves: Karst, Alto Mayo, Andes, Amazónico, caudal, cuenca hidrográfica

1. Introducción

La zona intertropical posee los sistemas kársticos más importantes del mundo y albergan las más grandes resurgencias y manantiales (Michel, 1991). Los manantiales kársticos con los caudales más altos se encuentran en Asia del Sureste seguida por Papua Nueva Guinea (Tobio : 85-115 m³/s en promedio) (Maire, 1981) y China (Disu : 33 m³/s en promedio) (Yuan, 1981; Tricart, 1985). Las resurgencias con los caudales más importantes América del Sur se encuentran reportados en Brasil, con caudales promedios de 5 m³/s en la región de São Domingos (Guyot et al., 1996).

La Amazonia queda ausente en la literatura científica con referencia a sistemas kársticos (Ford & Williams, 2007), debido a los pocos estudios realizados. No obstante, varias expediciones organizadas por el IRD (Instituto de Investigación para el Desarrollo) y el IGP (Instituto Geofísico del Perú), encontraron también importantes resurgencias en el piedemonte andino-amazónico del norte de Perú.

El macizo kárstico del Alto Mayo, en la región San Martín en Perú (Figura 1), posee una red de drenaje subterráneo importante, con resurgencias de gran caudal (~24 m³/s), ubicándose entre los más importantes de Sur América (Bigot et al., 2014). Los acuíferos y manantiales asociados tienen un papel importante a nivel económico y social. En la región de San Martín la producción de arroz, que depende de este recurso hídrico, ha sido intensificada a partir de los años 1970 alcanzando el primer lugar en términos de producción y superficie cosechada a nivel nacional (DPA DRASAM, 2016). Las ciudades y pueblos dependen también de estos acuíferos (ej. Rioja, Segunda Jerusalé).

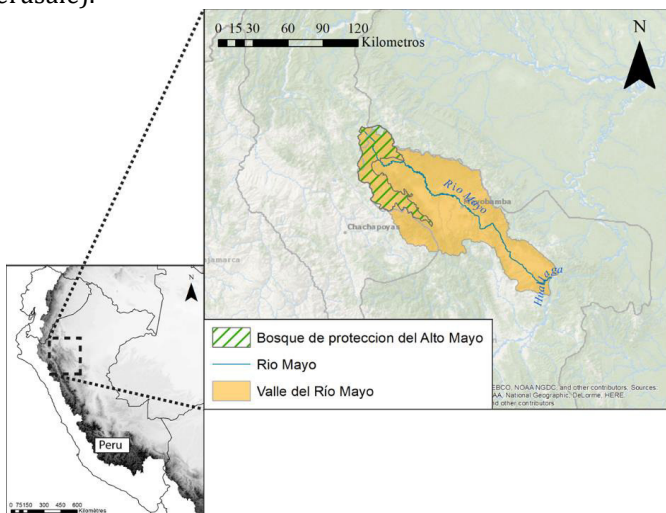


Figura 1 - Localización del valle del Río Mayo en la cuenca Amazónica peruana; los datos de altura provienen del SRTM 30 m (modificados según Guyot et al., 2007)

Los estudios relativos a estos karsts andino-amazónicos no son numerosos, a pesar de la importancia y vulnerabilidad de este recurso. Los regímenes hidrológicos de las principales resurgencias y sus respectivas cuencas hidrográficas no son conocidos. Varias expediciones del

IRD (Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo) en colaboración con el Instituto Geofísico del Perú (IGP) en el Marco del Laboratorio Mixto Internacional Paleotracas (LMI Paleotracas) y el observatorio del medio ambiente amazónico Hybam (SO-Hybam) han permitido tener una primera visión de los karsts en la región Alto Mayo desde el año 2011. Para entender el comportamiento hidrológico de los acuíferos del Alto Mayo, se formula las siguientes preguntas: ¿Cuál es el caudal medio de las resurgencias del macizo kárstico del Alto Mayo y como varía temporalmente? ¿Cuáles son las cuencas hidrogeológicas asociada a las resurgencias del macizo kárstico del Alto Mayo?

2. La cuenca del Alto Mayo

El valle del Río Mayo está localizado en el piedemonte andino-amazónico del Norte del Perú, en el lado Este de los Andes, al extremo Oeste de la cuenca Amazónica (Treidel, 2004). Está situado entre las coordenadas: 5,24°S y 6,43°S de latitud, y 77,46°W y 76,14°W de longitud. Perteneció a la región administrativa de San Martín, entre las provincias de Rioja y Moyobamba. El bosque de protección del Alto Mayo (Figura 1) engloba un área de 1820 km² (Figura 2) y protege desde 1987 la fauna y flora regional.

El Río Mayo desemboca en el Río Huallaga, el cual es afluente del río Marañón que a su vez desemboca en la región peruana del Río Amazonas.

La margen derecha del Río Mayo está marcada por la presencia de un macizo kárstico con orientación NNE-SSW y definido por el anticlinal Cerro Blanco (Baby et al., 2016) (Figura 3). La altitud varía entre 1000 y 3500 m. Las rocas aflorantes son principalmente sedimentarias carbonatadas del Jurásico al Cretácico (Alva-Hurtado, 1992). Varios plegamientos tectónicos y superposiciones pueden ser observados en esta zona activa sísmicamente: 6 sismos de magnitud 6 a 7 han sido registrados en los últimos 60 años (Treidel, 2004).



Figura 2 - Valle del Alto Mayo

La formación Chulec (Ki-ch) con calizas beige del Cretácico inferior rodea el grupo Pucará, que forma el

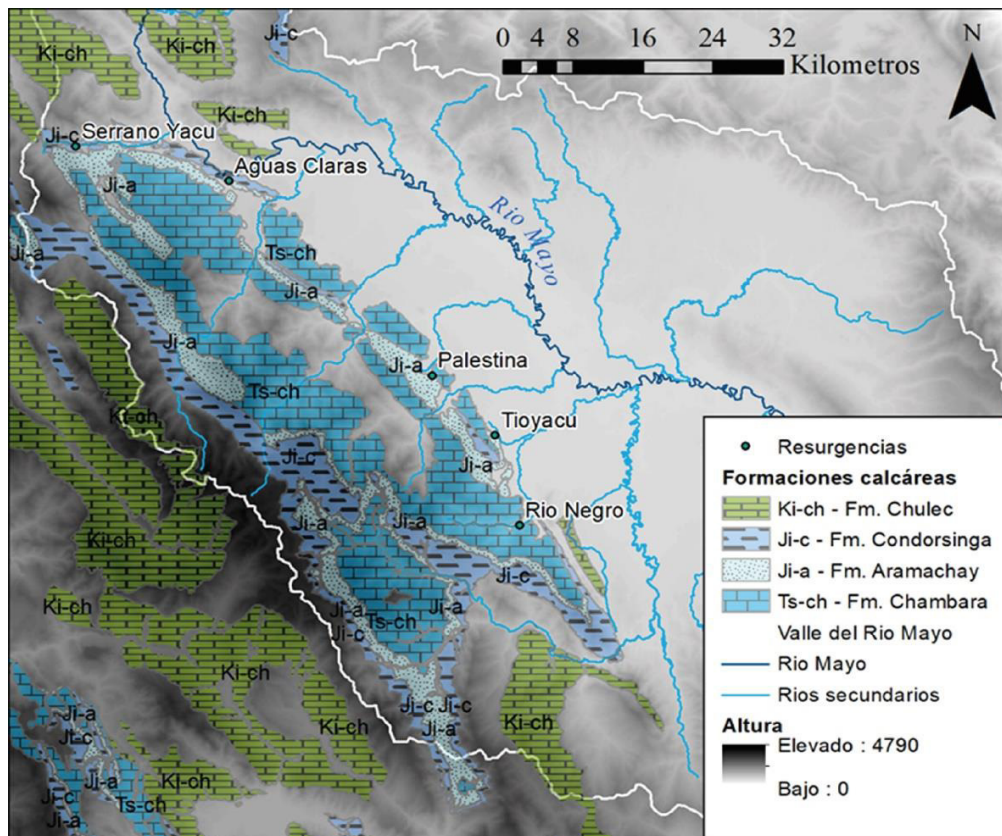


Figura 3 - Mapa al 1/100 000 de los afloramientos calcáreos en el Alto Mayo y localización de las principales resurgencias (modificado según INGEMMET, 2016)

anticlinal Cerro Blanco. El grupo Pucará está compuesto desde su tope por la formación Condorsinga (Ji-c) (calcáreo gris oscuras a beige en estratos de 10 a 40 cm), la formación Aramachay (Ji-a) (calizas arenosas intercaladas con silt) y la formación Chambará, (calizas masivas gris con horizontes dolomíticos) (De la Cruz *et al.*, 1998). En esta última formación se desarrollan los principales sistemas kársticos (Renou, 2013). Las numerosas misiones del IRD y del IGP han permitido observar varias galerías kársticas, fósiles o activas. Pero, hoy día, el macizo está únicamente parcialmente explorado espeleológicamente.

Desde la perspectiva climatológica, el régimen de precipitación en la cuenca del Río Mayo está marcado por una variación estacional baja (Espinoza *et al.*, 2009). Esta tendencia es característica del Oeste Amazónico, y atribuida a la forma cóncava de la cordillera en esta zona (Laraque *et al.*, 2007). Las precipitaciones en la cuenca varían entre 1 000 y 1 700 mm/años, con un régimen bimodal conocido como régimen Ecuatorial (Guyot & Lavado, 2003). La temporada seca casi no existe, y el periodo más lluvioso se presenta entre marzo y mayo, con un segundo periodo, menos intenso, entre octubre y diciembre (Johnson, 1976).

El régimen hidrológico observado en los ríos de la cuenca responde al régimen de lluvias, Es decir los caudales presentan también un comportamiento bimodal con periodos de creciente de marzo a abril (ANA, 2010). El caudal del Río Mayo varía entre 250 m³/s y 545 m³/s. Los principales tributarios del Río Mayo son los ríos Tonchima, Río Negro, Serrano Yacu y Naranjos, los cuales provienen del macizo calcáreo del Alto Mayo.

3. Material y métodos

3.1. Delimitación de las cuencas topográficas

Para definir las cuencas hidrográficas correspondientes a las resurgencias del macizo del Alto Mayo, primero se delimitó las cuencas topográficas de los ríos (Tonchima, Indoche, Naranjos, Naranjillos, Yuracyau y Uquihua) y resurgencias (Río Negro, Aguas Claras, Tío Yacu, Palestina y Serrano Yacu) de la margen derecha de la cuenca del Alto Mayo.

El área de las cuencas topográficas se calculó haciendo uso de un DEM (Digital Elevation Model) SRTM30 (Shuttle Radar Topography Mission) con resolución espacial de 30m (USGS, 2015) y la opción Hidrología del software ArcGIS, así mismo se estableció como puntos de control a las estaciones hidrológicas (Figura 5). Una corrección topográfica preliminar del DEM fue necesaria para tenerlo hidrológicamente correcto, usando las opciones "Relleno" del software.

3.2. Datos pluviométricos

Los datos de lluvia usados provienen del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Las estaciones no son numerosas dentro de la cuenca del Alto Mayo, y están ubicadas hasta una distancia de 100 km alrededor (Figura 4). Además, como los datos tienen muchos vacíos y valores falsos, una corrección de los mismos fue necesaria.

Los datos pluviométricos e hidrológicos son gestionados en el software Hydraccess (Descargable en: <http://www.ore->

Tabla 1 – Nombres, coordenadas, periodo de observaciones y promedio de precipitaciones anuales de las estaciones pluviométricas usadas en el estudio. Las lluvias corregidas corresponden al resultado de las correcciones con el método del vector regional (ver parte 3 – Resultados pluviométricos y vector regional) – Datos del SENAMHI.

Estaciones	Lat.	Long.	Altura	Periodo de observaciones	Promedio de precipitaciones (mm/años)	Precipitaciones corregidas (mm/años)
Alao	-6,5189	-76,7300	407	1973-2015	890	917
Aramango	-5,4233	-78,4403	570	1997-2016	1787	1696
Bagua Chica	-5,6606	-78,5422	410	1967-2015	667	658
Balsa Puerto	-5,8336	-76,5836	356	1964-1973	1411	1511
Borja	-4,4503	-77,4503	150	1965-1976	3475	3720
Chachapoyas	-6,2086	-77,8811	2450	1965-2015	902	909
Chazuta	-6,5689	-76,0983	170	1965-1995	759	837
Chingaza	-5,4169	-78,4336	578	1995-2015	2120	2280
Chiriaco	-5,1522	-78,2881	281	1964-2015	2533	2542
Cuñumbuque	-6,5083	-76,5083	400	1966-2015	525	614
El Pintor	-5,7625	-78,5253	549	1981-2015	655	668
El Porvenir	-6,5931	-76,3219	202	1966-2015	672	677
Imacita	-5,0836	-78,3669	300	1969-1979	3049	3122
Jamalca	-5,8940	-78,2375	1189	1964-2016	1074	1090
Jazan	-5,9486	-77,9825	1425	1988-2015	1006	879
Jepelacio	-6,1014	-76,9150	1192	1965-2015	765	858
Jumbilla	-5,8836	-77,7503	2284	1965-1973	610	701
Lamas	-6,4236	-76,5253	747	1964-1983	920	1011
Leimebemba	-6,5503	-77,8003	2800	1965-1990	1144	1173
Magunchal	-5,8914	-78,1892	643	1981-2015	782	794
Moyobamba	-6,0503	-76,9336	800	1965-2015	869	864
Naranjillo	-5,8300	-77,3897	900	1976-2015	746	817
Pacayzapa	-6,2561	-76,7781	924	1966-2015	789	990
Picota	-6,9489	-76,3389	200	1964-2015	532	635
Pilluana	-6,7786	-76,2806	200	1964-2015	595	642
Pomacochas	-5,8003	-77,9169	2181	1966-1974	799	799
Pongo de Caynarachi	-6,3336	-76,3003	240	1966-2015	1990	2064
Rioja	-6,0467	-77,1669	817	1965-2015	862	864
Rodriguez de Mendoza	-6,3003	-77,4169	2900	1964-1971	1588	1715
San Antonio	-6,4236	-76,4236	578	1965-2015	1106	1155
San Pablo	-6,8131	-76,5761	274	1968-2015	850	867
San Ramon	-5,9489	-76,0847	131	1970-2015	1258	1307
Santa Maria de Nieva	-4,8308	-77,9397	227	2001-2015	3228	3228
Saposa	-6,9150	-76,7794	312	1967-2015	815	848
Sauce	-6,6944	-76,2033	600	1964-2015	1001	1031
Shamboayacu	-7,0003	-76,1669	350	1997-2015	1033	988
Shanusi	-6,0678	-76,2539	147	1967-2015	1267	1468
Shilcayo	-6,5586	-76,0558	250	1984-1991	742	714
Sisa	-6,6169	-76,6836	381	1965-1986	1371	1459
Soritor	-6,1353	-77,0844	890	1965-2015	1813	1835
Tabalosos	-6,4064	-76,6097	341	1967-2015	1327	1325
Tarapoto	-6,5129	-76,3715	249	1999-2015	1371	1329
Tingo de Ponaza	-6,9336	-76,2503	235	1999-2015	1043	987
Yurimaguas	-5,8941	-76,1183	139	1964-1994	2056	2034

hybam.org/index.php/fre/Software/Hydraccess) del Servicio de Observación HYBAM. Este programa permite calcular las precipitaciones medias mensuales y anuales (Tabla 1). Las precipitaciones areales para las cuencas se calculó por el método de interpolación Kriging. La agrupación de zonas climáticas homogéneas, corrección y completación de datos fue realizado con el método de Vector regional - MVR (Hiez, 1977 y Brunet Moret, 1979). Este método consiste en crear una estación ficticia (un vector) que representa en “promedio” todas las estaciones de la zona, con la cual se compararán cada una de las estaciones (Hiez, 1977; Vauchel, 2004). Para calcular esta “estación vector”, el MVR aplica el concepto de promedio

extendido de precipitación al período de trabajo, que es una estimación del posible valor medio que se hubiera obtenido por medio de observaciones continuas durante el periodo de estudio. El «vector regional» resultante representa la variabilidad interanual pluviométrica de una zona, y es similar al comportamiento de todas las estaciones que forman parte de dicha zona o región (Espinoza et al., 2009a).

3.3. Datos hidrológicos

Los datos hidrológicos utilizados en el estudio provienen de la base de datos de los organismos de investigación en

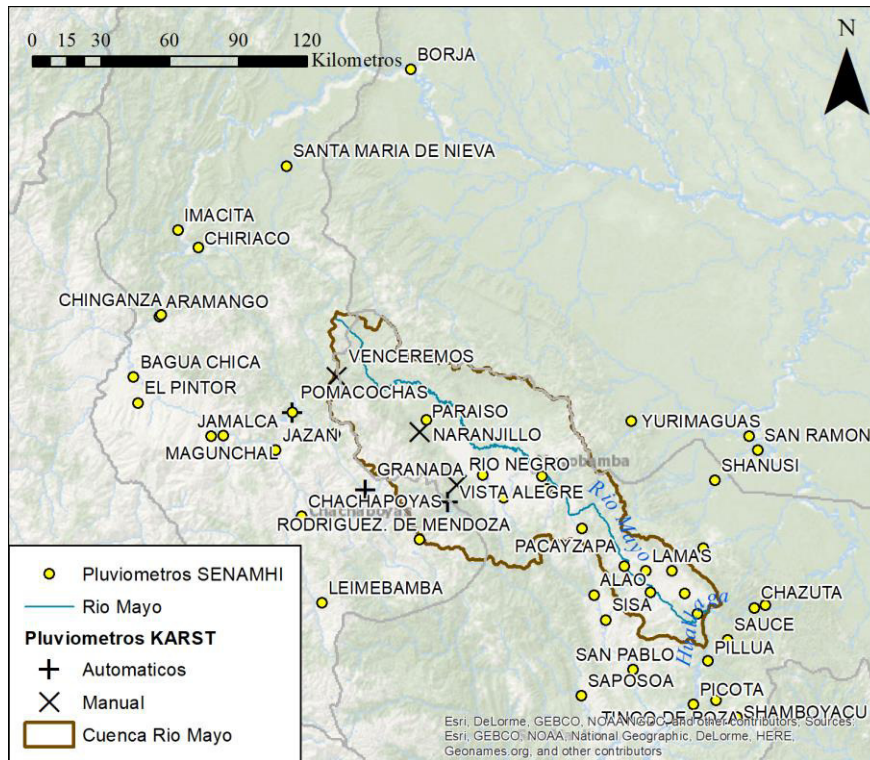


Figura 5 - Localización de las estaciones pluviométricas del SENAMHI usadas para el estudio

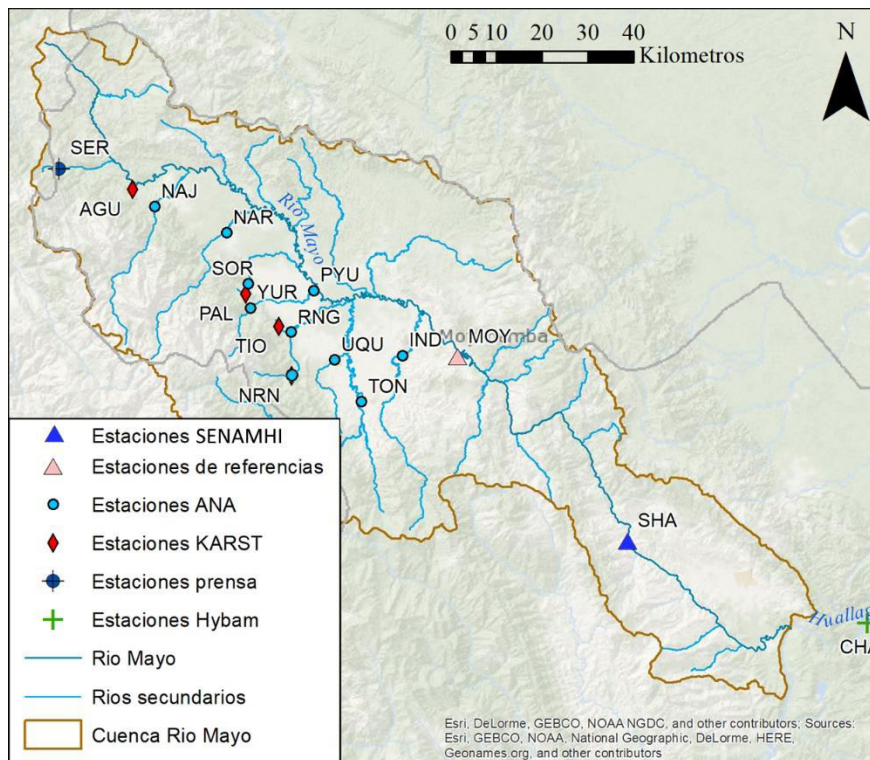


Figura 4 - Localización de las estaciones hidrológicas

Perú (Figura 5). La Agencia Nacional del Agua (ANA) posee algunas estaciones de observaciones en la cuenca del Río Mayo, controlando la evolución de los caudales de los ríos más importantes de la región. Los datos de la resurgencia Serrano Yacu provienen de un estudio de viabilidad para un proyecto de represamiento de aguas para la generación de energía eléctrica. La estación Chazuta del Servicio de Observación HYBAM permitió estimar el aporte del Río Mayo en el Río Huallaga. Las estaciones hidrológicas están

situadas a la margen derecha del Río Mayo que corresponde al macizo calcáreo del Alto Mayo. Las coordenadas y periodos de observación de cada estación están enumerados en la tabla 2.

Los caudales han sido determinados por diferentes métodos, en función a la velocidad del agua, la profundidad y la accesibilidad. Cada estación posee una regla limnimétrica, un equipo fijo que permite medir los niveles de agua. Los aforos se han realizado periódicamente

Tabla 2 - Referencia, nombre, coordenadas, operador de medidas, periodo de observación y caudal promedio (en m³/s) para las 16 estaciones hidrológicas de la zona de estudio. Las líneas sombreadas corresponden a los ríos proviniendo de resurgencias.

ID	Estaciones	Ríos	Lat.	Long.	Organismo	Periodo de observaciones	q promedio (m ³ /s)
CHA	Chazuta	Rio Huallaga	-6,5756	-76,1278	HYBAM	1999-2015	3097
SHA	Shanao	Rio Mayo	-6,4200	-76,6000	SENAMHI	1973-2017	413
MOY	Moyobamba	Rio Mayo	-6,0700	-76,9200	Fictif	n.a.	n.a.
PYU	Puente Yuracyacu	Rio Alto Mayo	-5,9800	-77,2200	ANA	2001-2014	173
IND	Puente Indoche	Rio Indoche	-6,0474	-77,0424	ANA	2004-2014	15
UQU	El Chorro	Rio Uquihua	-6,0581	-77,1773	ANA	2001-2017	3
TON	Soritor	Rio Tonchima	-6,1402	-77,1252	ANA	2001-2014	51
YUR	La Florida	Rio Yuracyacu	-5,9553	-77,3415	ANA	2001-2016	7
SOR	Palestina	Rio Soritor	-5,9085	-77,3469	ANA	2001-2017	5
NAR	San Luis	Rio Naranjillo	-5,8062	-77,3887	ANA	2001-2015	13
NAJ	El Diamante	Rio Naranjos	-5,7548	-77,5302	ANA	2001-2017	17
RNG	Puente Rio Negro	Rio Rio Negro	-6,0017	-77,2613	ANA	2001-2017	24
TIO	Puent Tioyacu	Rio Tioyacu	-5,9925	-77,2842	ANA	2012-2017	3
SER	Serrano Yacu	Rio SerranoYacu	-5,6813	-77,7190	Proyecto Presa	(1996) 2007-2008	19

teniendo en cuenta dichos niveles de agua (niveles de referencia). Los datos del ANA y del SENAMHI para las estaciones utilizadas son disponibles desde 2001 (Autoridad Nacional del Agua, 2010; Carranza, 2008). Los niveles son convertidos en caudal en base a las curvas de calibración (Figura 6). El software Hydracces permite calcular y visualizar los caudales mensuales y anuales.

El observatorio HYBAM posee sus propias estaciones de medición y observadores que miden dos veces al día el nivel del agua en la regla limnimétrica. Estos niveles y los aforos son importantes para calibrar las curvas altura -gasto (Armijos et al., 2003). El observatorio posee también sus propios equipos ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) de 600 kHz, utilizados desde 2001 en el Amazonas y sus tributarios (Guyot et al., 2007). Un perfil transversal del río y su gradiente de velocidad es generado a medida que el ADCP atraviesa perpendicularmente la sección del río, el cual es observado en tiempo real con el software Winriver II. Las informaciones obtenidas son el caudal, la velocidad, la profundidad del río y una estimación del área y la forma de la sección transversal.

3.4. El proyecto KarstAm

El proyecto KarstAm es un programa del IRD y sus asociados (Instituto Geofísico del Perú -IGP, Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico de Perú - INGEMMET) cuyo objetivo es estudiar el comportamiento hidrológico

de las resurgencias del macizo cárstico del Alto Mayo, además de la región Amazonas (resurgencia de Soloco). Cuatro resurgencias principales son estudiadas en el Alto Mayo: Palestina, Aguas Claras, Río Negro y Tío Yacu (Figura 5). El control hidrológico se inicia con la misión de campo en mayo 2011 donde se instala un captor CTD-Diver® en la cueva de Palestina. Este equipo permite medir el nivel, la temperatura y la conductividad eléctrica del agua y está asociado a un barómetro para corregir luego con la presión atmosférica. Otros captos similares fueron instalados en las resurgencias de Aguas Claras (septiembre 2014), de río Negro (junio 2015) y Tío Yacu (septiembre 2016). La tabla 3 describe las diferentes resurgencias estudiadas y sus periodos de observación. Los datos son descargados en cada misión de campo con el software Diver Office®. Paralelamente el nivel de agua es controlado en un punto de referencia con una cinta métrica, además de una medida en la regla limnimétrica. Estas medidas ayudan al control y validación de las medidas del CTD en caso de error o de desfase. En total, 15 misiones de campo fueron realizadas en la zona entre mayo 2011 y abril 2017 con el fin de controlar los equipos y realizar los aforos para mejorar las curvas de calibración.

Los aforos realizados por el proyecto KarstAm se ha valido de instrumentos como el correntómetro (mecánico y electromagnético) para las resurgencias de menor caudal y Radar y ADCP para las resurgencias más grandes

El proyecto instaló también nuevas estaciones pluviométricas, particularmente en las zonas de mayor altitud, que carecen de datos. Cuatro pluviómetros

Tabla 3 - Estaciones del proyecto KarstAm, coordenadas, frecuencia del captor CTD-Diver®, periodo de observación y caudal promedio medido (en m³/s). Las líneas oscuras corresponden a ríos proviniendo de resurgencias

ID	Resurgencias	Lat.	Long.	Frecuencia de medidas	Periodo de observaciones	q promedio (m ³ /s)
PAL	Palestina	-5,9264	-77,3523	15 mn (del 05/11 hasta el 02/14) 30 mn (del 02/14 à hoy día)	Mayo 2011 -> Hoy día (Interrupción del 02/15 hasta el 06/15)	1
AGU	Aguas Claras	-5,7185	-77,5611	30 mn	Septiembre 2014 -> Hoy día (Sensor robado del 01/16 hasta el 09/16)	8
NRG	Rio Negro	-6,0828	-77,2620	30 mn	Junio 2015 -> Hoy día	24
TIO	Tioyacu	-5,9925	-77,2842	30 mn	Septiembre 2016 -> Hoy día	3

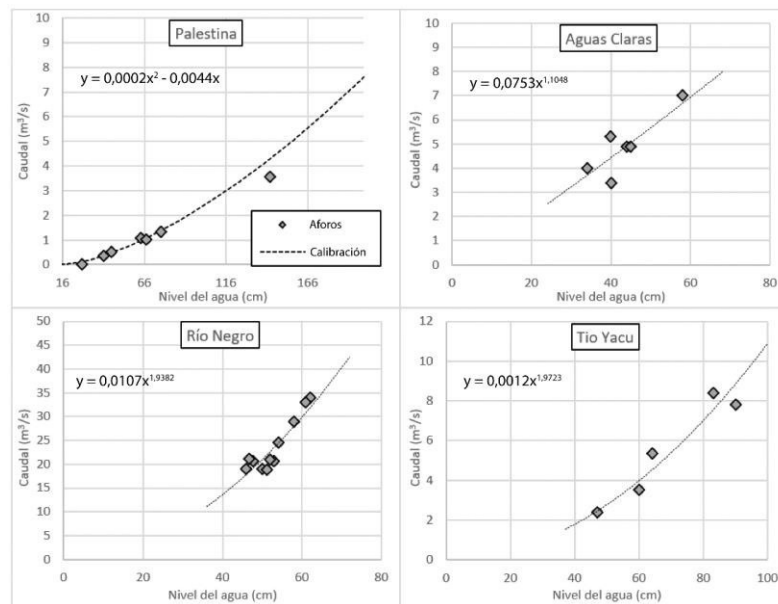


Figura 6 - Curvas de calibración de las resurgencias de Palestina, Río Negro, Aguas Claras y Tioyacu, creadas según los aforos y los niveles de agua leídas en los limnómetros

manuales han sido instalados en Paraiso, Palestina, Río Negro y Venceremos, y tres automáticos en Vista Alegre, Granada y Pomacochas (Figura 4). No obstante, estos captosres han sido recientemente instalados y aún no hay suficientes datos para ser calibrados y usados en la región.



Figura 7 - Aforo del Río Negro con ADCP

4. Resultados e interpretaciones

4.1. Comportamiento hidrológico de las resurgencias

Los datos hidrológicos del proyecto KarstAm permitieron generar histogramas de los caudales para las cuatro resurgencias estudiadas (Río Negro, Palestina, Aguas Claras y Tío Yacu) (Figura 8). La evolución de los caudales respectivos es presentada como un año hidrológico de septiembre a agosto. Estos datos no pudieron ser comparados en un año común debido de la falta de información evocada en la tabla 3.

La resurgencia de Río negro tiene los caudales más importantes de la zona, con promedio anual de 24 m³/s,

variando entre 18 m³/s y 35 m³/s. Su periodo de aguas altas es entre abril y junio, y un segundo pico de crecida entre diciembre y febrero. Esta bimodalidad en los datos de caudal puede ser explicada por las tendencias pluviométricas regionales (Guyot & Lavado 2003).

Las estaciones hidrológicas andinas son caracterizadas por variaciones de caudal frecuentes y rápidas (Figura 8). Este comportamiento se refleja en las resurgencias estudiadas (Palestina, Tío Yacu, Aguas Claras), a excepción de Río Negro que varía lentamente durante el año, como en estaciones de baja altitud.

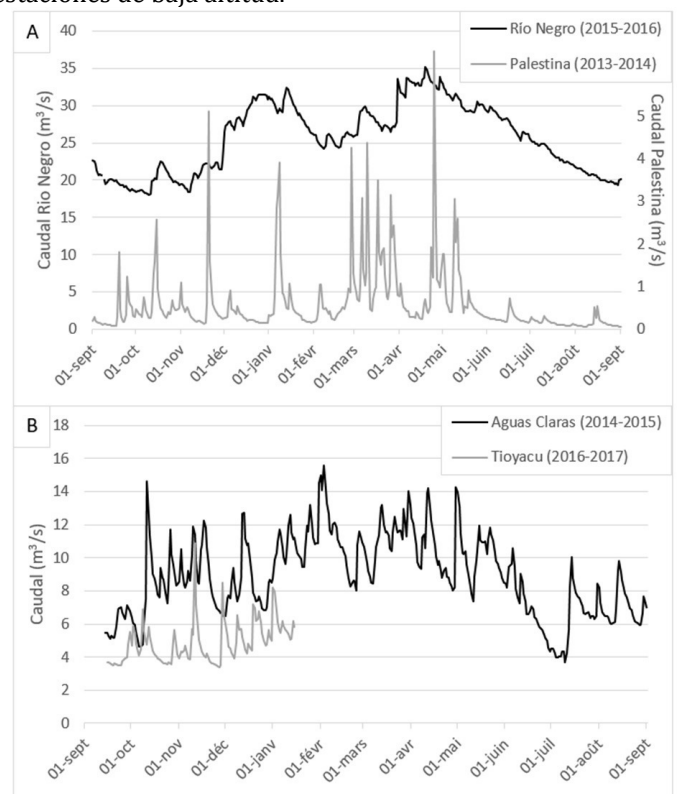


Figura 8 - Caudales promedio de las resurgencias de Río Negro (2015-2016) y de Palestina (2013-2014)(A), y de las resurgencias de Aguas Claras (2014-2015) y Tío Yacu (2016-2017) (B) para un año hidrológico.

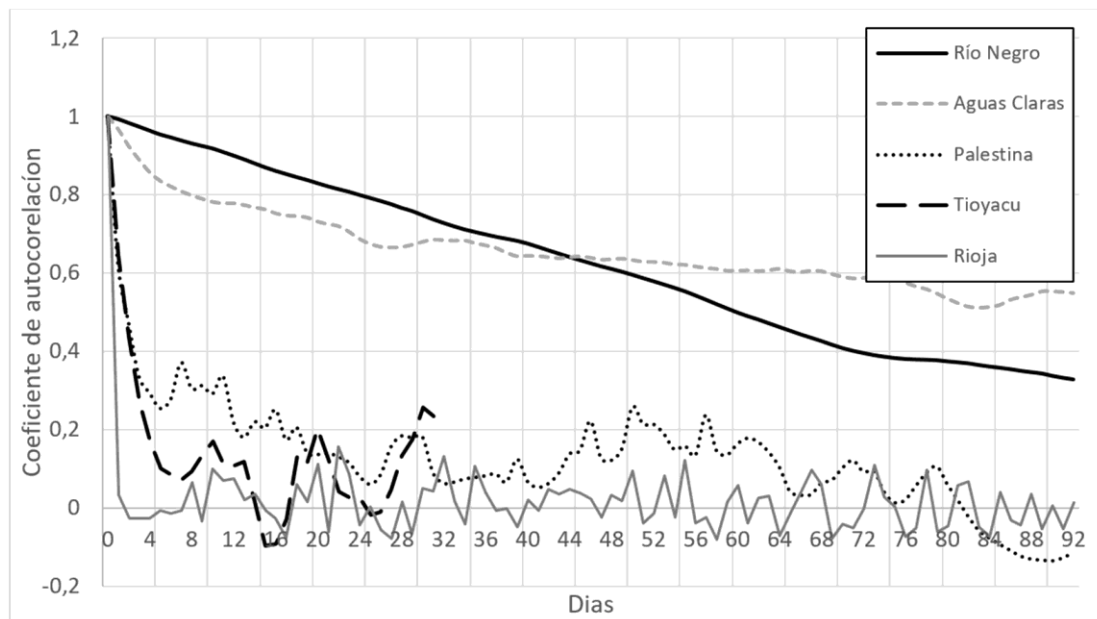


Figura 9 - Autocorrelogramo de los caudales diarios de las resurgencias kársticas de Río Negro, Aguas Claras, Palestina y Tioyacu, y de la pluviometría diaria de la estación Rioja, en 92 días

Una auto correlación de los valores de caudal en un año ha sido hecha para cada resurgencia (Figura 9). Las resurgencias de Palestina y Tío Yacu presentan coeficientes que se decorrelan rápidamente, comportamiento típico de las recargas y descargas de los acuíferos kársticos (Ford & Williams, 2007), debido a su alta respuesta hidrológica. Las resurgencias de Río Negro y Aguas Claras son marcadas por una disminución muy lenta de los coeficientes de auto correlación. Según Mangin (1984), los correlogramas enseñan la memoria que tienen los acuíferos kársticos. Los coeficientes traducen la importancia de las reservas kársticas y la manera como se descargan. Palestina y Tío Yacu tienen una curva de auto correlación que baja rápidamente hasta 0, así que no tienen mucho efecto de memoria, por lo tanto, tienen pocas reservas de agua. Paralelamente Aguas Claras y Río Negro presentan un efecto de memoria alto, que muestra un almacenamiento de agua importante.

Los diferentes comportamientos hidrológicos en estos acuíferos también pueden indicar diferentes niveles de karstificación de los sistemas (Mangin, 1984). Mientras más rápido el coeficiente de auto correlación baja hasta 0, más karstificado es el sistema. Al contrario, como en las resurgencias de Río Negro y Aguas Claras, podría indicar un nivel de karstificación muy bajo con pocos conductos de transmisión. Aunque son acuíferos tipo kárstico, estos presentan características más cerca de un acuífero poroso. Sin embargo, estos comportamientos atípicos también han sido reportados en otras resurgencias kársticas en Bulgaria (Pulido-Bosch, 1995).

4.2. Delimitación de las cuencas topográficas

Las cuencas topográficas delimitadas por las estaciones hidrológicas son presentadas en la Figura 10. Para cada cuenca fue calculado un caudal específico (q_s) que corresponde a la proporción entre el caudal promedio calculado y el área de la cuenca:

$$q_s = q/A$$

Siendo q el caudal promedio en m^3/s y A el área en km^2 . Las tendencias regionales muestran valores de caudal específico entre 40 y 60 $L/s.km^2$. En efecto las estaciones andinas de Chazuta y Borja (Figura 4) presentan respectivamente valores de q_s de 49 $L/s.km^2$ y 40 $L/s.km^2$. (Guyot et al., 2007). Estos valores son más bajos para las estaciones amazónicas de Requena (38 $L/s.km^2$) y Lagarto (37 $L/s.km^2$) (Santini et al., 2014).

Los valores de caudal específico calculados para las cuencas de las resurgencias y ríos aparecen en la Figura 10. Algunos valores son aparentemente incoherentes comparados con las tendencias regionales. Las resurgencias de Río Negro y Soritor tienen caudales específicos de 158 y 180 $L/s.km^2$ respectivamente. Los caudales específicos de las otras resurgencias en estudio presentan valores aún más incoherentes: Serrano Yacu (366 $L/s.km^2$), Aguas Claras (775 $L/s.km^2$), Palestina (563 $L/s.km^2$) y Tío Yacu (2965 $L/s.km^2$). El coeficiente de escurrimiento también fue calculado por cada cuenca topográfica. Este índice es calculado según las precipitaciones promedio y los caudales:

$$Coef. \text{ de escurrimiento} = q/P$$

Siendo q la cantidad de agua que escurre y P el promedio de las precipitaciones anuales en la cuenca en $mm/año$. Este coeficiente está definido como la proporción entre el escurrimiento directo y las precipitaciones caídas en la cuenca. Su valor varía entre 0 y 1 según el clima y la superficie del suelo (Gottschalk & Weingartner, 1998). Es típicamente inferior a 0 en regiones semiáridas y áridas, y superior a 0.5 en las regiones tropicales (Ponce & Schietty, 1995). La precipitación media anual en la zona de estudio es de 1200 $mm/año$, y la tendencia regional del coeficiente de escurrimiento es de 0.6 (Guyot, 2006).

Los coeficientes de escurrimiento calculados en base a las cuencas topográficas resultan incoherentes. Varían de 4.8 para el Río Negro, hasta 98.8 para Tío Yacu (ver tabla 4). Los valores superiores a 1 indicarían una mayor cantidad de escurrimiento directo en la cuenca con relación a la

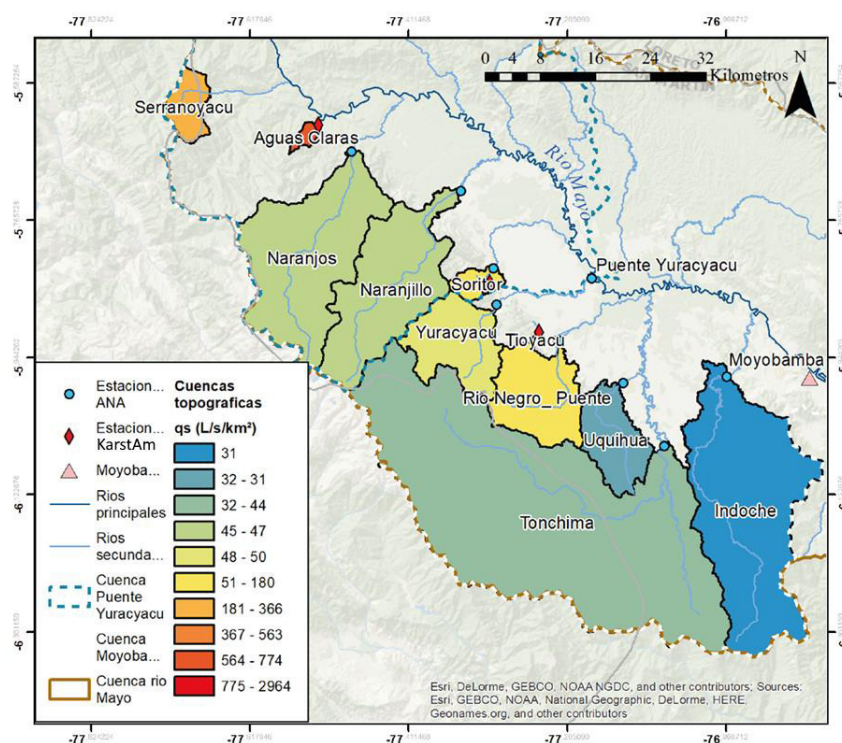


Figura 10 - Mapa de las cuencas topográficas y sus caudales específicos por las estaciones hidrológicas del estudio generados con la opción hidrología de ArcGIS

Tabla 4 - Área, caudal promedio (en m^3/s), caudal específico (en $L/s.km^2$), coeficiente de escurrimiento y porcentaje de calcáreo del área correspondiendo a las cuencas topográficas. Las líneas oscuras corresponden a ríos proviniendo de resurgencias

Cuencas (por estación)	Area (km^2)	q promedio (m^3/s)	qs ($L/s/km^2$)	Coef. de escurrimiento	% Calcáreo
Shanao	8493	413	49	1,38	29
Indoche	490	15	31	0,7	17
Uquihua	108	3	31	0,8	35
Tonchima	1157	51	44	1,1	52
Río Negro	152	24	158	4,8	78
Tioyacu	1	3	2964	98,8	97
Puente Yuracyacu	3135	173	55	1,7	37
Yuracyacu	141	7	50	1,7	78
Soritor	26	5	180	6,4	90
Palestina	1	1	563	19,8	100
Naranjillo	287	13	47	1,7	72
Naranjos	360	17	47	1,6	58
Aguas Claras	10	8	774	24,4	100
Serrano Yacu	48	19	366	10,5	22

cantidad de precipitaciones caída en la misma, lo cual es inconsistente.

Los valores más elevados corresponden a las superficies más pequeñas dentro de las cuencas topográficas (entre 1 y $50 km^2$). Con la ayuda de un mapa geológico al 1/50 000 (INGEMMET, 2016), se observa que varias formaciones calcáreas conforman la orografía (Figura 3). Un porcentaje de afloramiento calcáreo para cada cuenca esta presentada en la tabla 4. Las cuencas que tienen caudales específicos y coeficientes de escurrimiento altos corresponden a aquellos que tienen un porcentaje de afloramiento calcáreo elevado: Soritor (90%), Tío Yacu (97%), Aguas Claras (100%) y Palestina (100%).

La primera interpretación muestra que las cuencas topográficas de las resurgencias presentan un área de captación bastante baja comparada a sus caudales, mientras que en las cuencas contiguas se observa lo contrario. En efecto, los índices calculados son inferiores a las tendencias regionales: Indoche ($qs = 31 L/s.km^2$) y Uquihua ($qs = 31 L/s.km^2$). Estos valores muestran un

desequilibrio con las cuencas anteriores. En tal sentido, se plantean dos posibles soluciones para corregir dichos valores hacia estimaciones más realistas. La primera solución, es reequilibrar las cuencas hidrográficas para tener áreas más coherentes en base a la tendencia regional. Suponiendo que las cuencas de las resurgencias se extiende más allá de las delimitaciones topográficas. La segunda opción es de verificar y recalcular los datos pluviométricos.

4.3. Resultados pluviométricos y vectores regionales

La evaluación de los datos pluviométricos con el método del vector regional ha permitido clasificar tres regiones climáticas principales en la zona de estudio (Figura 11). Las estaciones contenidas en cada zona tienen una homogeneidad climática, es decir están sometidas a un similar régimen de precipitaciones durante el año. La zona 1 corresponde a la zona amazónica con altitudes menores a 300 m, que se extiende hasta el pie de monte andino. Las precipitaciones son de 1900 mm en promedio anual. La

zona 2 corresponde al pie de monte andino, con altitudes ente 300 y 1 500 m. Esta parte presenta los primeros relieves antes de la cordillera andina, cuyas precipitaciones anuales son de 1 100 mm en promedio. La zona 3 situada al Oeste, es un valle aislado y protegido de las precipitaciones provenientes de la amazonía con precipitación media anual de 1135 mm en promedio. Una cuarta zona menos marcada puede ser considerada entre las estaciones de Chachapoyas, Pomacochas y Rodriguez de Mendoza, con las precipitaciones más bajas (980 mm de promedio anual) y altitudes ente entre 1 500 y 3 500 m. Sin embargo no hay suficientes datos para confirmar ello. El mapa de vectores regionales enseña que el Alto Mayo está afectado solamente por el vector de la zona 2.

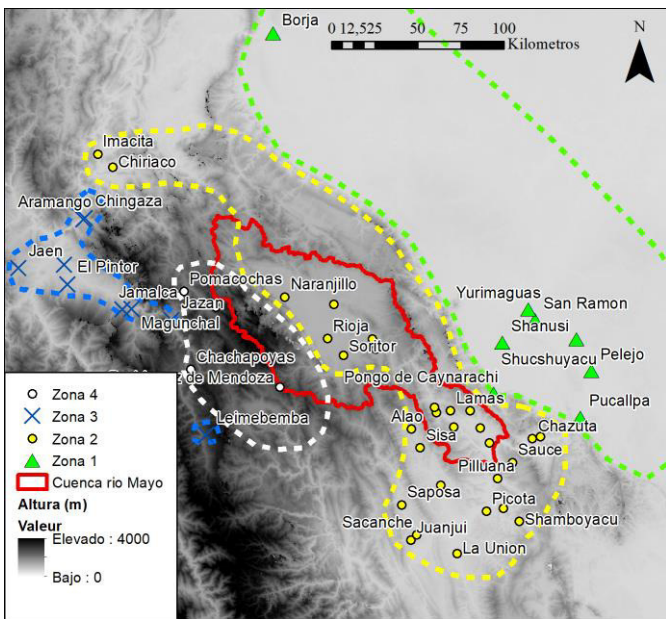


Figura 11 - Mapa de vectores regionales según los datos pluviométricos proviniendo de las estaciones pluviométricas del SENAMHI

Además de permitir la delimitación aproximativa de los vectores regionales, el método del vector regional es útil para la crítica de los datos. Un índice de calidad es calculado por cada estación y comparado entre las estaciones de su zona respectiva. Este índice permite verificar si una estación corresponde a su zona. Con los tres vectores principales de la región, los vacíos en los datos de lluvias pueden ser completados. Un grupo de datos completo fue obtenido con el objetivo de recalculer los valores promedio de precipitaciones para cada cuenca. Igualmente, los coeficientes de escurrimiento fueron recalculados (Ver tabla 1 para las precipitaciones corregidas).

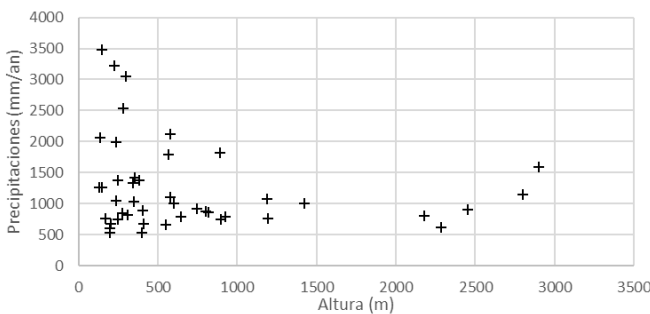


Figura 12 - Promedio de lluvias anual en mm/año según la altura de las estaciones pluviométricas del SENAMHI (1964-2016)

Con estas correcciones, se estableció el perfil pluviométrico altitudinal (Figura 12). La Figura 13 muestra la repartición de lluvias por isoyetas. Estas representaciones confirman la repartición de las lluvias al nivel de pie de monte andino (Pepin et al., 2013).

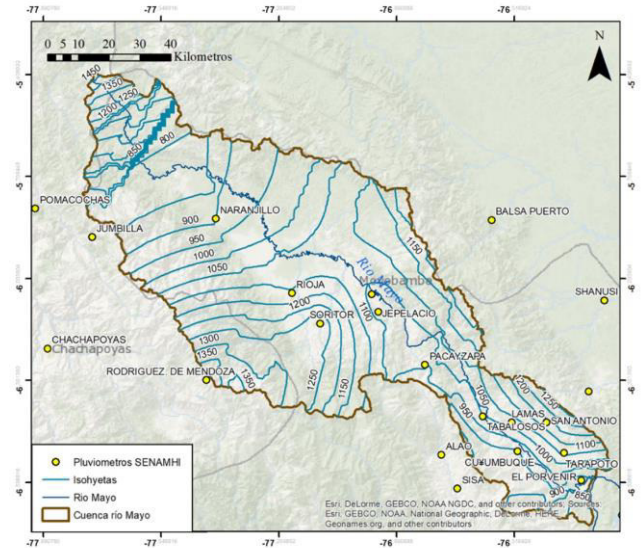


Figura 13 - Mapa de isoyetas de precipitaciones anuales en la cuenca del Río Mayo. Los periodos de observaciones de los datos utilizados se ven en la tabla 1

4.4. Delimitaciones de las cuencas hidrogeológicas

Las correcciones de los datos pluviométricos no han sido suficientes para obtener valores de coeficiente de escurrimiento coherentes. Un reajuste de las superficies de las cuencas hidrográficas fue necesario. Las cuencas conformaciones calcáreas karstificadas en la margen derecha del río Mayo pueden tener captación subterránea de redes hidrológicas contiguas, incrementando así el área real de su cuenca. Al contrario de la cuenca topográfica, la cuenca hidrogeológica puede ser mucho más extensa según la geología y la estructura. Guyot et al., (1997) expone el ejemplo del karst de São Domingos, en la región de Goiás en Brasil donde evidencia un fenómeno de captación kárstica.

Las cuencas topográficas correspondientes a las resurgencias presentan un qs anormalmente elevado, superior a 121 L/s.km², mientras que la tendencia regional es de 51 L/s.km². Esta diferencia proviene de una subestimación de la superficie de la cuenca hidrogeológica. En este caso las aguas subterráneas drenan más allá de lo indicado por las delimitaciones de cuenca topográfica (320 km²). Por la presencia de captura y de redes kársticas, la superficie realmente drenada es de 1 500 km². Muchos otros ejemplos de captura por karst existen, como la Moselle (Gamez et al., 1995) o el Doubs (Chauve et al., 1987) en Francia. Este mismo fenómeno ocurre en las resurgencias del Alto Mayo.

Para estimar la superficie real drenada por las resurgencias estudiadas, se realizó una comparación con

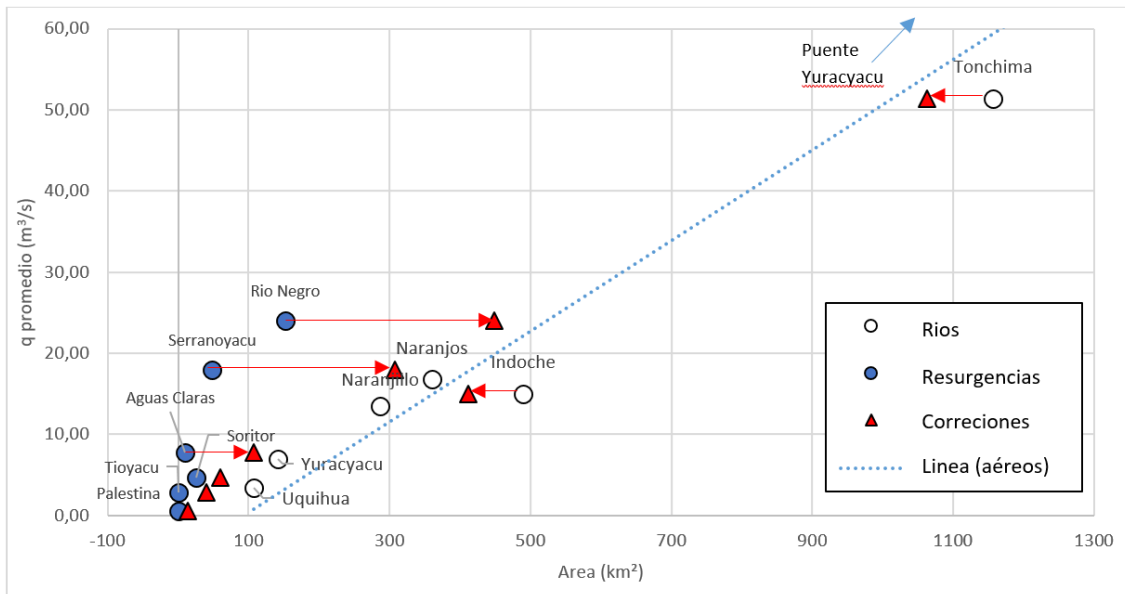


Figura 15 - Caudal promedio en función del área de las cuencas topográficas y del tipo de río (Superficial o kárstico) y corrección de la superficie de las cuencas según la curva de tendencia de los ríos aéreos

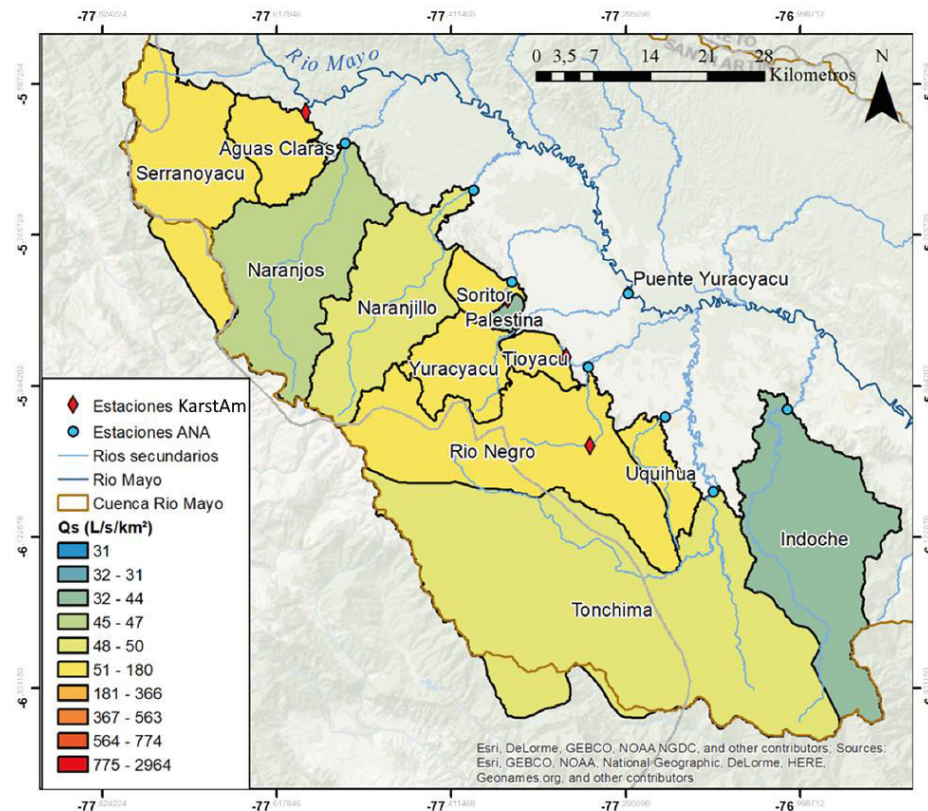


Figura 14 - Mapa de las cuencas hidrogeológicas estimadas y sus caudales específicos, según las cuencas topográficas, la geología y la estructura

los ríos superficiales que no provienen de resurgencias. La Figura 14 representa el caudal de los ríos y resurgencias en función de la superficie de sus cuencas topográficas. La tendencia lineal fue calculada en base a los valores de los ríos superficiales. Las fuentes kársticas están fuera de esta tendencia. Una proyección de estos puntos, manteniendo el caudal específico, hacia la línea de tendencia permite estimar la superficie necesaria para obtener caudales relativamente coherentes (Figura 14). Los triángulos rojos representan las correcciones hechas.

La Figura 15 presenta los resultados de la delimitación de las cuencas hidrogeológicas, en base a la corrección efectuada. El área de la cuenca del río Negro necesitó de mayores correcciones. Originalmente tenía estimada un área de 152 km² y fue corregida, a un área de cuenca hidrogeológica de 448 km², abarcando varios afloramientos calcáreos karstificados. Esta nueva delimitación implicó reducir las cuencas de Tonchima (de 1157 km² a 1063 km²), Uquihua (de 108 km² a 62 km²) e Indoche (de 490 km² a 412 km²). Las cuencas más pequeñas han sido multiplicadas por 10 veces su tamaño.

Tabla 5 - Superficie de las cuencas hidrogeológicas, caudal específico (en L/s.km²) y coeficiente de escurrimiento para las cuencas hidrogeológicas estimadas

Cuenca (por estación)	Área cuenca topográfica (km ²)	Área cuenca hidrogeológica estimada (km ²)	qs (L/s/km ²)	Coef. de escurrimiento
Indoche	490	412	36	0,8
Uquihua	108	62	55	1,4
Tonchima	1157	1063	48	1,2
Rio Negro	152	448	53	1,6
Tioyacu	1	40	73	2,4
Yuracyacu	141	116	60	2,0
Soritor	26	60	78	2,8
Palestina	1	13	41	1,4
Naranjillo	287	281	48	1,7
Naranjos	360	360	47	1,6
Aguas Claras	10	107	73	2,3
Serrano Yacu	48	307	58	1,6

La cuenca hidrogeológica de Aguas Claras se estimó a 107 km². La casi totalidad de las cuencas más pequeñas (Tío Yacu, Palestina) son cubiertas por formaciones calcáreas. Las hipótesis son bien variadas sobre la delimitación de las cuencas hidrogeológicas.

En base a la estimación de las cuencas hidrogeológicas, los valores de caudal específico y coeficiente de escurrimiento han sido recalculados (tabla 5). Estas modificaciones han permitido obtener caudales específicos más cercanos a las tendencias regionales de 40-60 L/s.km² (Guyot et al., 2007). El caudal específico de Rio Negro ha sido reducido de 158 hasta 53 L/s.km². La reducción de las áreas de Tonchima e Indoche permitió incrementar sus caudales específicos hasta 48 y 36 L/s.km². No obstante, las resurgencias kársticas guardan aún caudales específicos bastante altos para la región, como Tío Yacu (78 L/s.km²) o Aguas Claras (73 L/s.km²). Así mismo, casi todos los coeficientes de escurrimiento, excepto por Indoche, se mantienen con valores incoherentes. Es decir, todos son superiores a 1, hasta 2.8 en el caso del Soritor.

Estas estimaciones son hipotéticas, teniendo en cuenta la falta importante de datos geológicos disponibles en la zona (buzamiento, espesor de los estratos, etc). Un trabajo de campo es necesario para delimitar precisamente las cuencas hidrogeológicas. Sin embargo, la modificación de las cuencas ha permitido recalculer caudales específicos coherentes, ilustrando la existencia de un fenómeno de captación kárstica en la zona. El macizo calcáreo del Alto Mayo esta kárstificado, por lo que redes hidrológicas enteras pueden ser capturadas por las cuencas subterráneas. Una observación hidrológica regular y precisa de los ríos kársticos y superficiales debe ser establecido, acompañado de aforos. Por otra parte, los datos de precipitaciones utilizados deben ser verificados y completados. Una subestimación de las lluvias en la región estudiada explicaría también los resultados hidrológicos anormales de los sistemas kársticos.

5. Conclusión

Los caudales de las resurgencias karsticas del macizo del Alto Mayo serían los más altos de Sur América. Solo la resurgencia de Aguas Claras con un caudal promedio de 8 m³/s, presentaría valores superiores a las mayores

resurgencias kársticas documentadas en este continente (Sao Domingos, Goiás, Brasil, con 5 m³/s). La resurgencia de Rio Negro tiene un caudal promedio de 24 m³/s, alcanzado 35 m³/s en crecida, ubicándose así entre las más importantes resurgencias kársticas del mundo. Sin embargo, la variabilidad temporal de los caudales en Rio Negro y Aguas Claras ilustra un comportamiento atípico. Parecen tener un caudal constante en el tiempo, actuando más como acuíferos porosos que kársticos.

Las cuencas hidrogeológicas de estas resurgencias no son conocidas. Las delimitaciones de las cuencas topográficas generadas a partir de los datos SRTM 30 m tuvieron problemas de coherencia en relación a los caudales de los ríos. Los valores de caudal específico calculados fueron superiores a las tendencias regionales de 40-60 L/s.km². La presencia de formaciones calcáreas karstificadas en la zona del Alto Mayo permite suponer la existencia de captaciones kársticas, por lo cual las cuencas hidrogeológicas serían mayores que las cuencas topográficas. Las cuencas topográficas delimitadas han sido modificadas para estimar la superficie de las cuencas hidrogeológicas. Estas correcciones permitieron recalculer caudales específicos más cercanos a las tendencias regionales. Sin embargo, estas estimaciones son hipotéticas, teniendo en cuenta los pocos datos geológicos y estructurales disponibles. Varias misiones de campo son aún necesarias para confirmar la presencia de estas captaciones kársticas, y para delimitar precisamente las cuencas hidrogeológicas de las resurgencias kársticas del Alto Mayo.

Los coeficientes de escurrimiento recalculados superan los valores teóricos aceptados (0:1) Estos errores son atribuidos a una subestimación importante de las lluvias. Para corregir este problema, el proyecto KarstAm ha instalado pluviómetros principalmente en zonas de mayor altitud (>1000m), donde aparentemente habría mayores precipitaciones. Con ello se complementarían la red de estaciones del SENAMHI en la región del Alto Mayo, las cuales están localizadas principalmente en zonas de baja altitud (< 1000m)

Este estudio permito hacer un primer balance hidrológico de la región del Alto Mayo. Los datos hidrometeorológicos del ANA y del SENAMHI en esta zona de estudio no son suficiente para definir correctamente el carácter hidrológico e hidrogeológico del macizo. El proyecto KarstAm se consolida como necesario e

importante para cuantificar el recurso hídrico de esta región, conocer el comportamiento de los acuíferos y de sus redes subterráneas, además su vulnerabilidad. Para establecer un balance hidrológico correcto, algunas cosas tienen que ser mejoradas: extender la red de estaciones pluviométricas en la cuenca del Alto Mayo, aumentar la cantidad de aforos en los ríos de la zona, y explorar más en detalle la red kárstica del macizo y su geología.

Agradecimientos

Este estudio fue realizado con el apoyo del Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD), del Instituto Geofísico del Perú (IGP) y de Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Queremos agradecer los observadores y las personas que nos apoyaron durante las diferentes misiones de campo.

Referencias

- Alva-Hurtado, J.E., Meneses, J.F., Chang, L., Lara, J.L., Nishimura, T., 1992. Ground effects caused by the Alto Mayo earthquakes in Peru. Earthquake Engineering, Tenth World Conference, Balkema, Rotterdam.
- Armijos, E., Crave, A., Vauchel, P., Fraizy, P., Santini, W., Moquet, J.S., Arevalo, N., Carranza, J., Guyot, J.L., 2013. Suspended sediment dynamics in the Amazon River of Peru. Journal of South American Earth Sciences, v. 44, p. 75-84.
- Autoridad Nacional del Agua, 2010. Boletín técnico - Recursos hídricos del Perú en cifras. Ministerio de Agricultura, 104 p.
- Baby, P., Dosseto, A., Bigot, J.Y., Calderon, Y., 2016. El carst del Cerro Blanco (Alto Mayo, Perú): testigo de una tectónica andina hiperactiva. In: 1ro Simposio internacional del Carst en Perú, Tarapoto (Perú). Sept. 2016, Tarapoto, Perou.
- Bigot, J.Y., Guyot, J.L., Fabre, O., 2014. Pérou, Alto Mayo 2013. Spelunca, v. 133, p.9-11.
- Brunet-Moret Y. 1979. Homogénéisation des précipitations. Cahiers ORSTOM, *Serie Hydrologie* 16: 3-4.
- Carranza, J.L., 2008. Monitoreo hidrológico de la calidad de agua en la Cuenca amazonica peruana. SENAMHI - Ministerio del Ambiente, 24 p.
- Chauve, P., Jacquemin. P., Mania, J., 1987. Un exemple d'alimentation induite d'un réservoir karstique par pertes de rivière en pays calcaire. Bulletin de la Société Géologique de France, v. 8, p. 123-129.
- De la Cruz, J., Lara, M., Raymundo, T., 1998. Geología de los cuadrángulos de Cahuapanas y Nueva Cajamarca. Boletín A 115. INGEMMET. 125 p.
- DPA Dirección regional de agricultura San Martín-DRASAM, 2016. Diagnóstico de la cadena de valor del cultivo de arroz y maíz. MINAGRI. Disponible en : http://frenteweb.minagri.gob.pe/sisca/?mod=consulta_cult
- Espinoza, J.C., Ronchail, J., Guyot, J.L., Cocheneau, G., Filizola, N., Lavado, W., De Oliveira, E., Ombosa, R., Vauchel, P., 2009. Spatio-temporal rainfall variability in the amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia and Ecuador). International Journal of Climatology 29, 1574e1594.
- Ford, D., Williams, P., 2007. Karst Hydrogeology and Geomorphology. John Wiley & Sons, Ltd., 576 p. ISBN 9780470849965.
- Gamez, P., Wehrei, A., Fizaine, J-P., Scapoli, J., 1995. L'implication du karst dans la capture de la Moselle. Revu Géographique de l'Est, v. 35, p. 297-308.
- Guyot, J.L., Auler, A., Oga, D., Obstancia, I., Appay. J.L., 1996. Bilan hydro-géochimique. In: Goiás 94 & 95 - Expéditions Franco-Brésiliennes Goiás 94 & 95. GPBE-GREGEO-GSBM, Brasilia, p.52-58.
- Gottshalk, L., Weingartner, R., 1998. Distribution of peak flow derived from a distribution of rainfall volume and runoff coefficient, and a unit hydrograph. Journal of hydrology, v. 208, n°3-4, p.148-162.
- Guyot, J.L., Filho, L.M., Auler, A., 1997. Régime hydrologique et flux de matières dissoutes du karst de Sao Domingos, Goiás, Brésil, p.271-274.
- Guyot, J.L., Lavado, W., 2003. Caractéristiques climatiques et hydrologiques de la région. Bulletin hors-série du GSBM : Spécial PUCARA'2003, p. 61-65.
- Guyot, J.L., 2006. Hydro-climatologie du massif de Soloco. Bulletin hors-série du GSBM spécial Chachapoyas'2004 & Soloco'2005, p. 86-89.
- Guyot, J.L., Bazan, H., Fraizy P., Ordonez, J.J., Armijos, E., Laraque, A., 2007. Suspended sediment yields in the Amazon basin of Peru: a first estimation. Water Quality and Sediment Behaviour of the Future: Predictions for the 21st Century. IAHS Publ. 314.
- Hiez G. 1977. L'homogénéité des données pluviométriques. Cahier ORSTOM, série Hydrologie 14: 129-172.
- INGEMMET, 2016. Sistema de Información Geológico y Cadastral Minero. Version 3.0. Fecha de actualización : 15/10/16. Disponible en : <<http://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/index.html>>
- Johnson, A., 1976. The climate of Peru, Bolivia and Ecuador. World Survey of Climatology 12, 147e218.
- Laraque, A., Ronchail, J., Cochonneau, G., Pombosa, R., Guyot, J.-L., 2007. Heterogeneous distribution of rainfall and discharge regimes in the Ecuadorian Amazon Basin. Journal of Hydrometeorology 8 (6), 1364e1381.
- Maire, R., 1981. Inventory and general features of PNG karsts. Spelunca, v. 3, p. 7-8.
- Mangin, A., 1984. Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoire et spectrale. Journal of Hydrology, v. 67, p. 25-43.
- Michel, R., 1991. Le karst tropical humide. Essai de synthèse. L'exemple du Zaïre. Bulletin de la Société géographique de Liège, v. 27, p.3-22.
- Pepin, E., Guyot, J.L., Armijos, E., Bazan, H., Fraizy, P., Moquet, J.S., Lavado, W., Pombosa, R., Vauchel, P., 2013. Climatic control on eastern Andean denudation rates (Central Cordillera from Ecuador to Bolivia). Journal of South American Earth Sciences, v. 44, p. 85-93.
- Ponce, V.M., Shetty, A. V., 1995. A conceptual model of catchment water balance. II: Application to runoff and baseflow modeling. Journal of hydrology, v. 173, n°1-4, p. 41-50

- Pulido-Bosch, A., Padlila, A., Dimitrov, D., Machkova, M., 1995. The discharge variability of some karst springs in Bulgaria studied by time series analysis. *Hydrological Sciences Journal*, v. 40, n°4, p.517-532.
- Renou, F., 2013. Characterization of the hydrological and hydrochemical contribution of the North Andean calcareous massifs to the Andean tributaries of the Amazon River (Marañón and Huallaga rivers) through the study of two karstic resurgences: A comparative study of the hydrology and the hydrochemistry of the resurgences of Palestina and Soloco. Thèse de master EAU : Université de Montpellier 2. 67 p.
- Roche, M., Aliaga, A., Campos, J., Pena, J., Cortes, J., Rocha, N., 1990. Hétérogénéité des précipitations sur la cordillère des Andes Boliviennes. In : Lang, H., Musy, A. (Eds.), *In Situ Produced Cosmogenic Nuclides and Quantification of Geological Processes. Hydrology in Mountainous Regions*, vol. 193. IAHS Publ., pp. 381e388.
- Santini, W., Martinez, J.M., Espinoza-Villar, R., Cochonneau, G., Vauchel, P., Moquet, J.S., Baby, P., Espinoza, J.C., Lavado, W., Carranza, J., Guyot, J.L., 2014. Sediment Budget in the Ucayali River basin, an Andean tributary of the Amazon River. *Sediment Dynamics from the Summit to the Sea. IAHS Publ.* 367.
- Treidel, H., 2004. *Geomorphologic Features, Soils and Vegetation of the Central Cordillera Cahuapanas (Alto Mayo, Peru)*. Thèse de master en Geo-écologie : Université de Bayreuth, 111 p.
- Tricart, J.L.F., 1985. Quelques aspects du karst en Chine. *Karstologia : revue de karstologie et de spéléologie physique*, v. 5, n°1, p.53-60.
- USGS, 2015. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global [en línea]. Fecha de actualización : 01/01/2015. Disponible en : <https://lta.cr.usgs.gov/SRTM1Arc>
- Vauchel, P., 2004. Derniers développements du logiciel Hydracces. *Actes des Séminaires et ateliers scientifiques du 30e de l'ORSTOM/IRD en Equateur*, p. 247-251.
- Yuan, D., 1981. A brief introduction to China's research in karst. *Inst. Karst Geol., Min. of Geol., Guillin*, 35 p.