

6 SEPT.
2016

**COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO E
HIDROGEOQUÍMICO DE LAS
RESURGENCIAS KÁRSTICAS DE
PALESTINA (RIOJA) Y SOLOCO
(CHACHAPOYAS)**

Fabien RENO, James Apaestegui, William
Santini, Jean-Loup Guyot

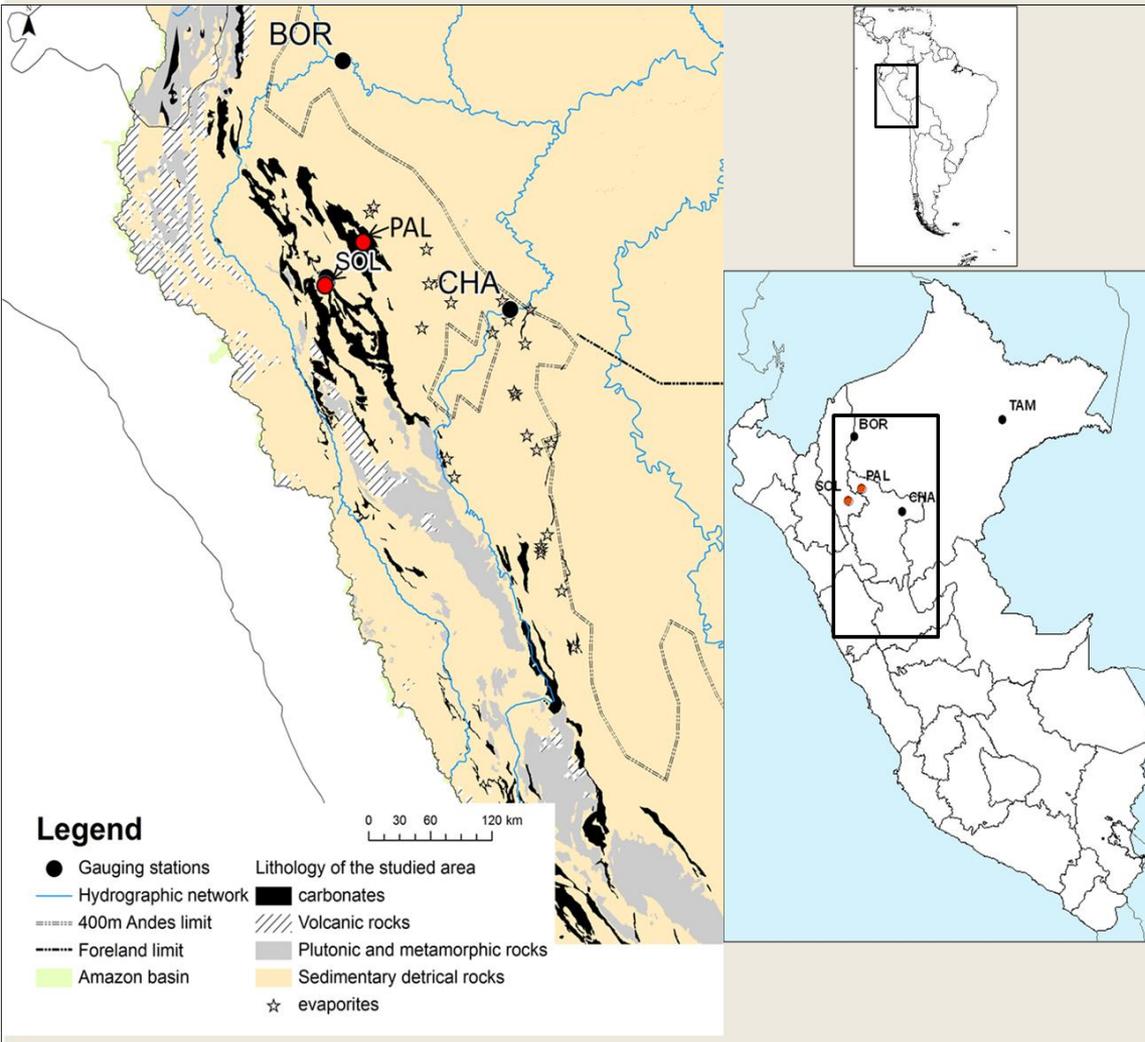
fabien.renou2@gmail.com

- **Pocos estudios de los acuíferos kársticos en zonas tropicales:**
 - Erosión kárstica: Jamaica, Belize (Miller, 1983) y Asia (Crowther, 1989, Han *et al.*, 2010, Li *et al.*, 2010, Liu *et al.*, 2013)
 - Hidrología y hidrogeoquímica de los karsts: Brasil, Bolivia y Mexico (Auler , 1994, Eraso *et al.*, 2001, Gondwe *et al.*, 2010, Steinich & Marín, 1997)
 - **Norte del Perú ⇒ 1er estudio de los acuíferos kársticos en la cuenca del Alto Marañón**
 - **desde 2003: misiones de los grupos de espeleología (GSBM, ECA, GPBE)**
 - **desde 2005: programa HYBAM y LMI PALEOTRACES (IRD)**

- **Cuenca del Alto Marañón :**
 - **Largos afloramientos calcáreos:**
 - ⇒ 5% de la superficie de la cuenca (Moquet, 2011) + Larga zona de recarga + lluvia abundante =
 - ⇒ **Reservas +++ de aguas subterráneas**
 - ⇒ **Soporte del estiaje de los ríos**
 - ⇒ **Fuente de elementos disueltos para los ríos**

- Presentar y comparar el comportamiento hidrológico e hidrogeoquímico de las dos resurgencias,
- Calcular los flujos de elementos disueltos exportados por los macizos kársticos andinos a los afluentes norte peruanos del Amazonas (Alto Marañón y Huallaga),
- Calcular la tasa de erosión kárstica de las dos cuencas

Presentación de las dos resurgencias estudiadas



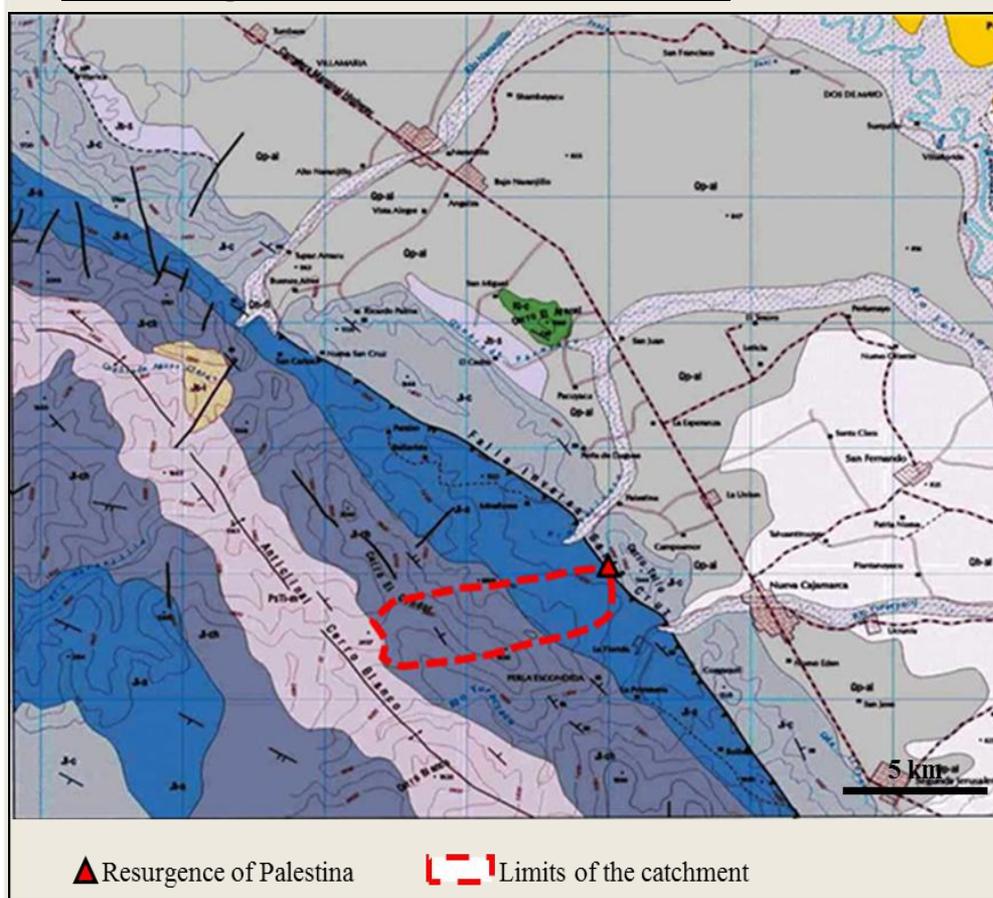
➤ **Palestina (PAL):**

- Provincia de Rioja
- Macizo del Alto Mayo: Piedemonte Amazónico (870 m)

➤ **Soloco (SOL):**

- Provincia de Chachapoyas
- Macizo de Soloco: Cordillera Oriental (2630 m)

➤ Resurgencia de Palestina:



ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	ROCAS INTRUSIVAS	
CENOZOICA	CUATERNARIO	HOLOCENA	Depósitos fluviales (Qh-fl)		
		PLEISTOCENA	Depósitos aluviales (Qh-al)		
	NEÓGENO	PLIOCENA	Depósitos aluviales (Qp-al)		
		PALEÓGENO	PLIOCENA	Formación Ipururo (N-i)	
			PALEOCENA	Formación Yahuarango (P-y)	
MESOZOICA	CRETÁCEO	SUPERIOR	Formación Cachiyacu-Huchpayacu (Ks-c,h)		
			Formación Vivian (Ks-v)		
			Formación Chonta (Ks-ch)		
		INFERIOR	Formación Agua Caliente (Ki-ac)		
			Formación Esperanza (Ki-e)		
			Formación Cushabatay (Ki-c)		
	JURÁSICO	SUPERIOR	Formación Sarayaquillo (Js-s)	Js-i	
		INFERIOR	Formación Condorsinga (Jl-c)		
	Formación Aramachay (Jl-a)				
	TRIÁSICO	INFERIOR	Formación Chambará (Jl-ch)		
Grupo Mitu (PsTr-m)					
PALEOZOICA	PÉRMICO	SUPERIOR			

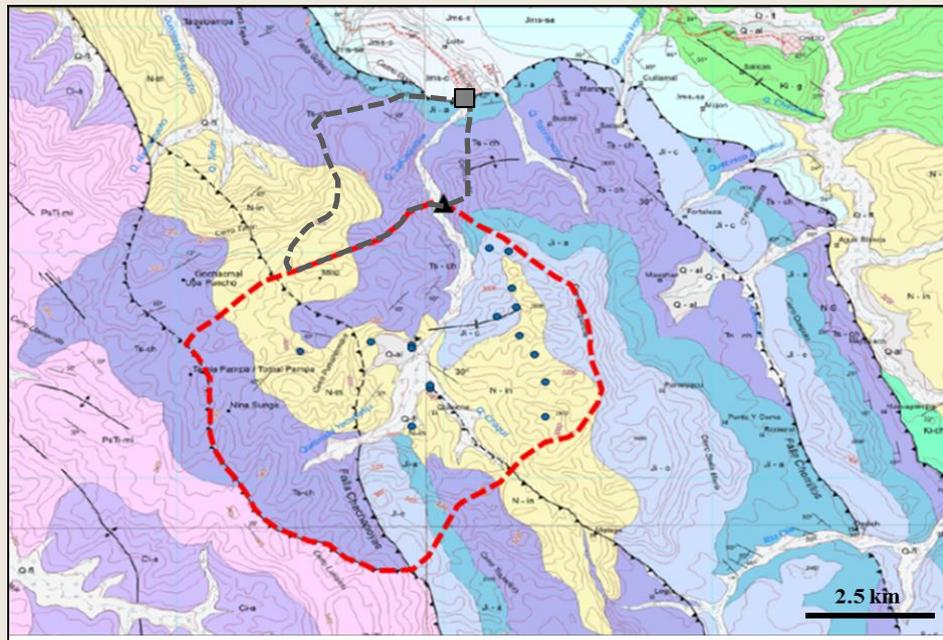
Fm. Chambará y Aramachay

• Cuenca:

→ 15 km²

→ Pendiente promedio: 25.4%

➤ Resurgencia de Soloco:



▲ Resurgence of Soloco Limits of the catchment ● Sinkholes ■ Staff gage

 Residual catchment

ERA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRAFICAS
CENOZOICO	CUATERNARIO	Holoceno	<p>Depósitos coluviales Clastos de diversos tamaños angulosos-subangulosos, englobados en una matriz limo-arenosa formados al pie de las laderas. Gran parte de estos depositos sirven como tierras de cultivo.</p> <p>Depósito fluvial Gravas con clastos redondeados, envueltos en una matriz arenosa con pequeños lentes de arena, que se encuentran a lo largo del río formando terrazas.</p> <p>Depósito aluvial Acumulaciones de gravas, arenas, limos con clastos redondeados-subredondeados de composición polimictica, ubicados en las quebradas y con cierta clasificación.</p> <p>Q-co Q-f Q-al</p>
		Plioceno	<p>Formación Ingulputa Conglomerados con clastos polimictica, intercalados con arenas semiconsolidados y con una matriz areno-limoso.</p> <p>N-in</p>
MESOZOICO	CRETÁCICO	Superior	<p>Formación Yahuarango Areniscas feldespáticas con intercalaciones de lutitas grises y rojizas.</p> <p>Ppe-ya</p>
		Inferior	<p>Formación Viván Areniscas cuarzosas blancas de grano fino a grueso en estratos de 10 a 80 cm, intercalado por capas muy delgadas de limoarcillas.</p> <p>Ki-v</p> <p>Formación Chonta Lutitas negras con intercalaciones de calizas y areniscas grises en la base.</p> <p>Ki-ch</p> <p>Grupo Oriente Areniscas cuarzosas blancas, con laminación oblicua y horizontal con algunas intercalaciones de lutitas negras.</p> <p>Ki-o</p>
	JURÁSICO	Superior	<p>Formación Coronatachaca Brechas sedimentarias conformadas por fragmentos angulosos y subredondeados de caliza, en una matriz fuertemente cementada de material calcareo. Intercalaciones de conglomerados y areniscas rojas.</p> <p>Jms-c</p>
		Inferior	<p>Formación Condorensiga Calizas de color gris a beige en estratos delgados entre 10 a 40 cm. Superficies de estratificación onduladas. Por intemperismo presenta coloraciones blanquecinas.</p> <p>Jl-c</p> <p>Formación Aramachay Calizas arcillosas gris oscuro a negro, bituminosa de colores gris y negro bien estratificadas y laminadas, intercaladas con arcillas calcáreas y lutitas bituminosas con amonites.</p> <p>Jl-a</p> <p>Formación Chambará Calizas recristalizadas grises, masivas, con coloraciones superficiales beige a marrón claro, plegadas, con fósiles y con algunos niveles de calizas diómiticas.</p> <p>Ts-ch</p>
	TRIÁSICO	Superior	<p>Formación Sarayaguillo Intercalación de areniscas y lutitas rojas con algun nivel ó brecha con clastos de calizas y algunos niveles de areniscas cuarzosas con coloraciones amarillentas.</p> <p>Jms-sa</p>
	PALEOZOICO	PÉRMICO	Superior
CARBÓNIFERO		Inferior	<p>Grupo Ambo Limoarcillas, limolitas micáceas de color gris oscuro a pardo verdoso con restos de plantas, areniscas amarillentas y hacia la parte superior, areniscas cuarzosas con algunos niveles de calizas.</p> <p>Ci-a</p>

- Fm. Chambará
- 1/3 de la cuenca → areniscas y conglomerados neogénicos

- **Cuenca:**
- 26 km²
- Pendiente promedio: 17.9%

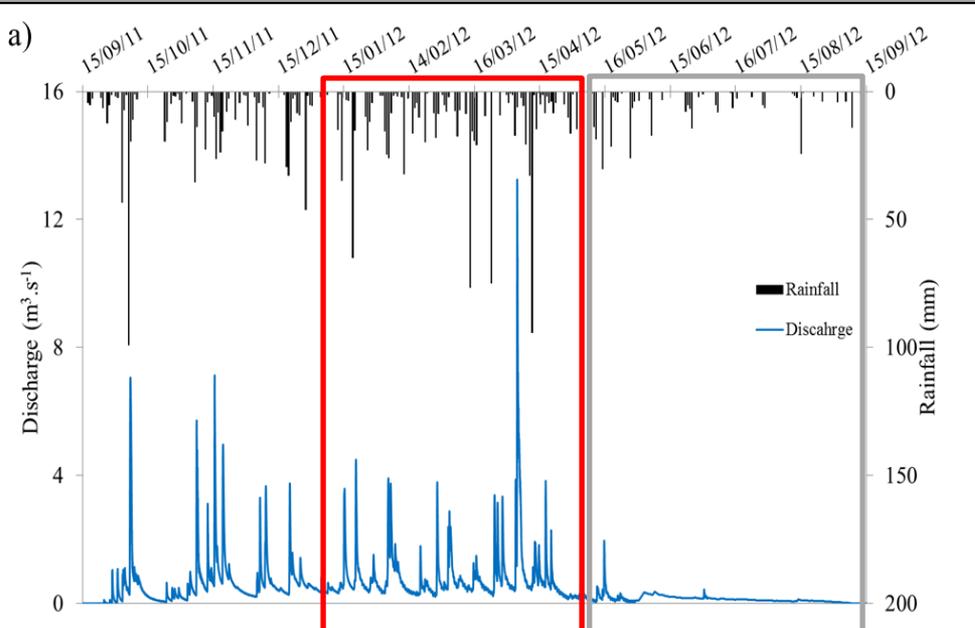
- **Monitoreo de alta frecuencia:**

- Niveles de agua adentro y afuera de la cueva
- Conductividad eléctrica del agua
- Temperatura del agua adentro de la cueva
- Presión atmosférica
- Temperatura del aire adentro de la cueva

- **Monitoreo ocasional:**

- Caudal (aforos)

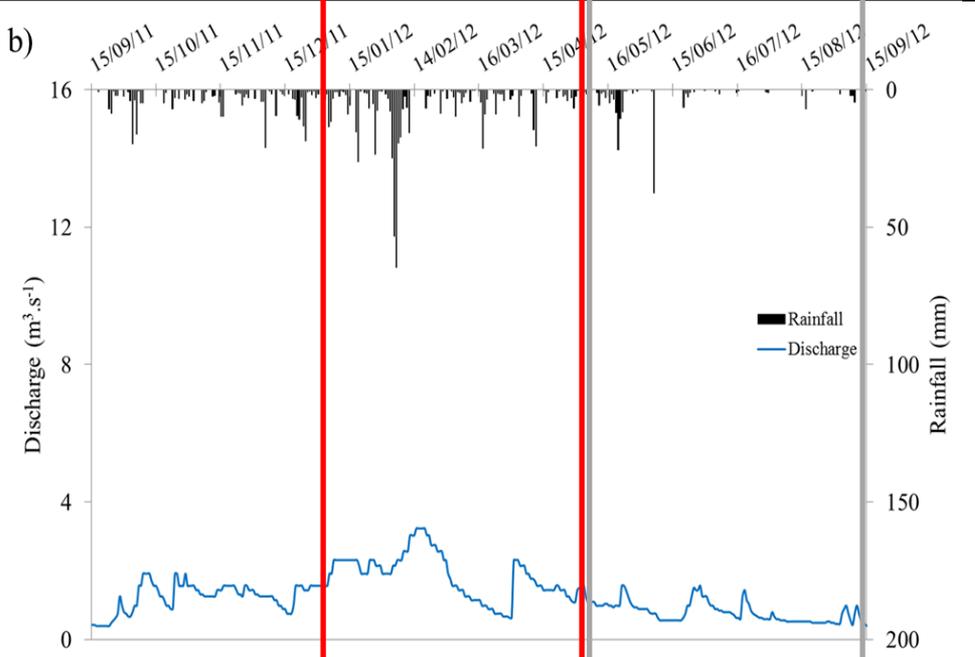
Estudio del régimen hidrológico de las dos resurgencias



Palestina

➤ Época de lluvias (Ene-Abr) : numerosos picos de crecida estrechos → duración: 1-2 días

➤ Estiaje (May-Set): no hay picos de crecida. Lenta ↓ del caudal

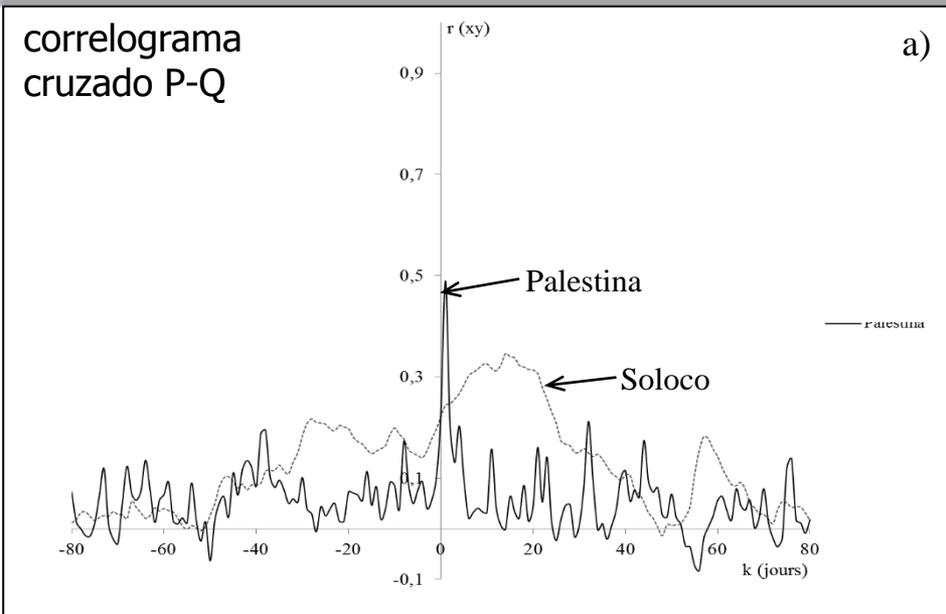


Soloco

➤ Época de lluvia: picos de crecida menos frecuentes y más largos → duración: > 5 días

➤ Estiaje: unos picos de crecida más débiles.

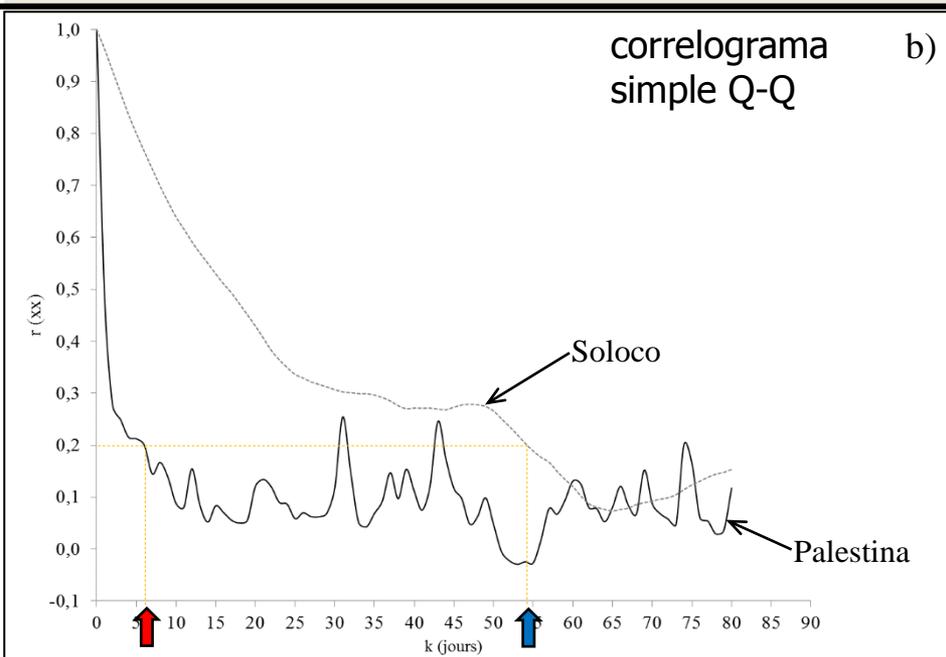
➤ Caudal más débil → máx.: 3.5 m³/s



Soloco: correlograma cruzado P-Q "redondeado" \Rightarrow señal de lluvia más filtrado

\rightarrow **Comportamiento más amortiguado del sistema kárstico**

\Rightarrow **Papel de la cobertura Neogénica**



•Palestina: rápida \downarrow

\rightarrow Eventos independientes

\Rightarrow **red kárstica desarrollada**

\Rightarrow **bajas reservas en agua subterránea**

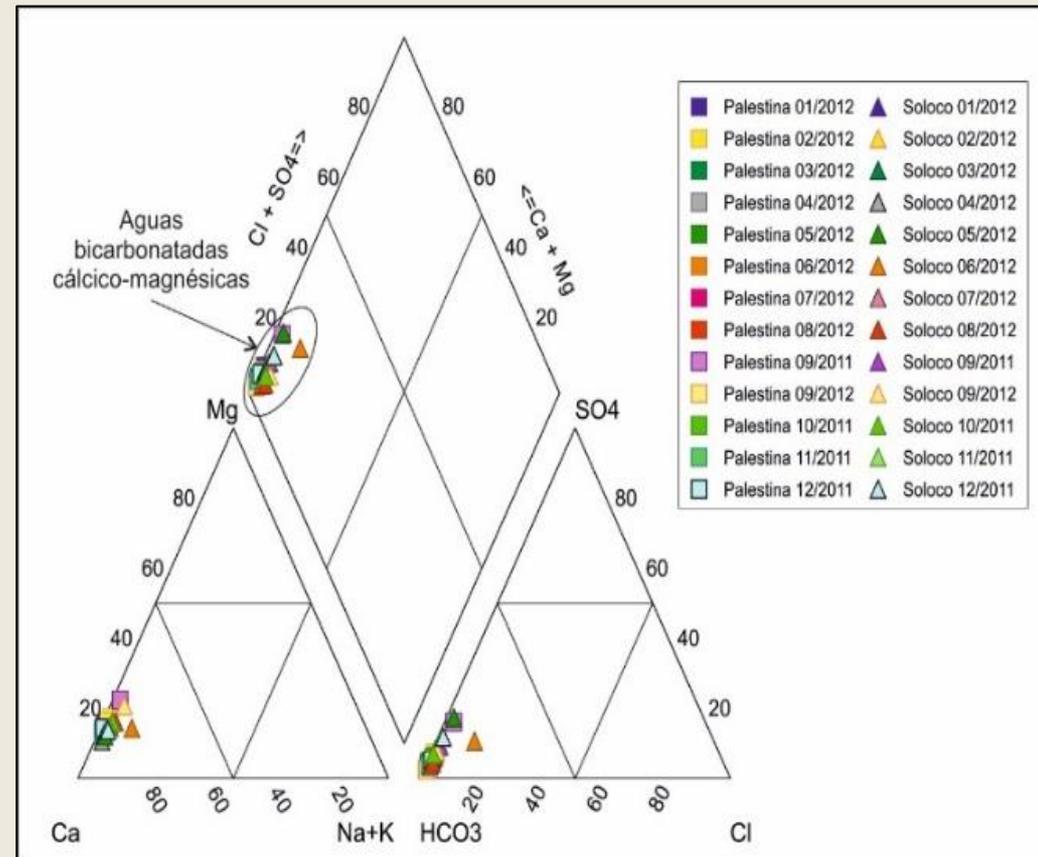
•Soloco: \downarrow más lenta

\Rightarrow **Antiguo karst obstruido**

Caracterización de la hidrogeoquímica de las dos resurgencias

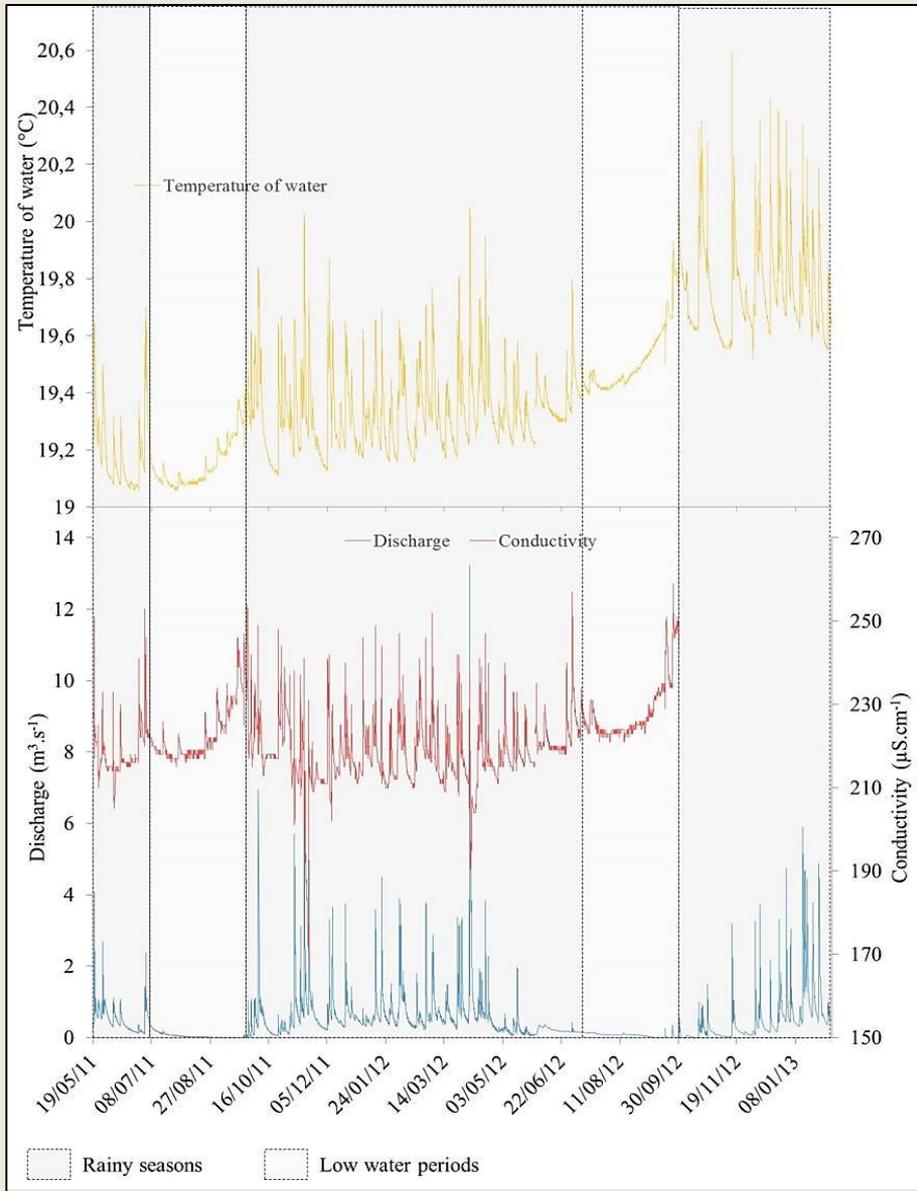
- Muestreo regular: 1 y 16 de cada mes:

- pH y Conductividad Eléctrica (CE)
- Cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+)
- Aniones (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-)



Resurgencia	CE $\mu\text{S.cm}^{-1}$	Temperatura $^{\circ}\text{C}$	pH	Mineralización total mg.L^{-1}
Soloco	188	12.2	7.11	116
Palestina	254	19.4	6.97	223

Resurgencia de Palestina

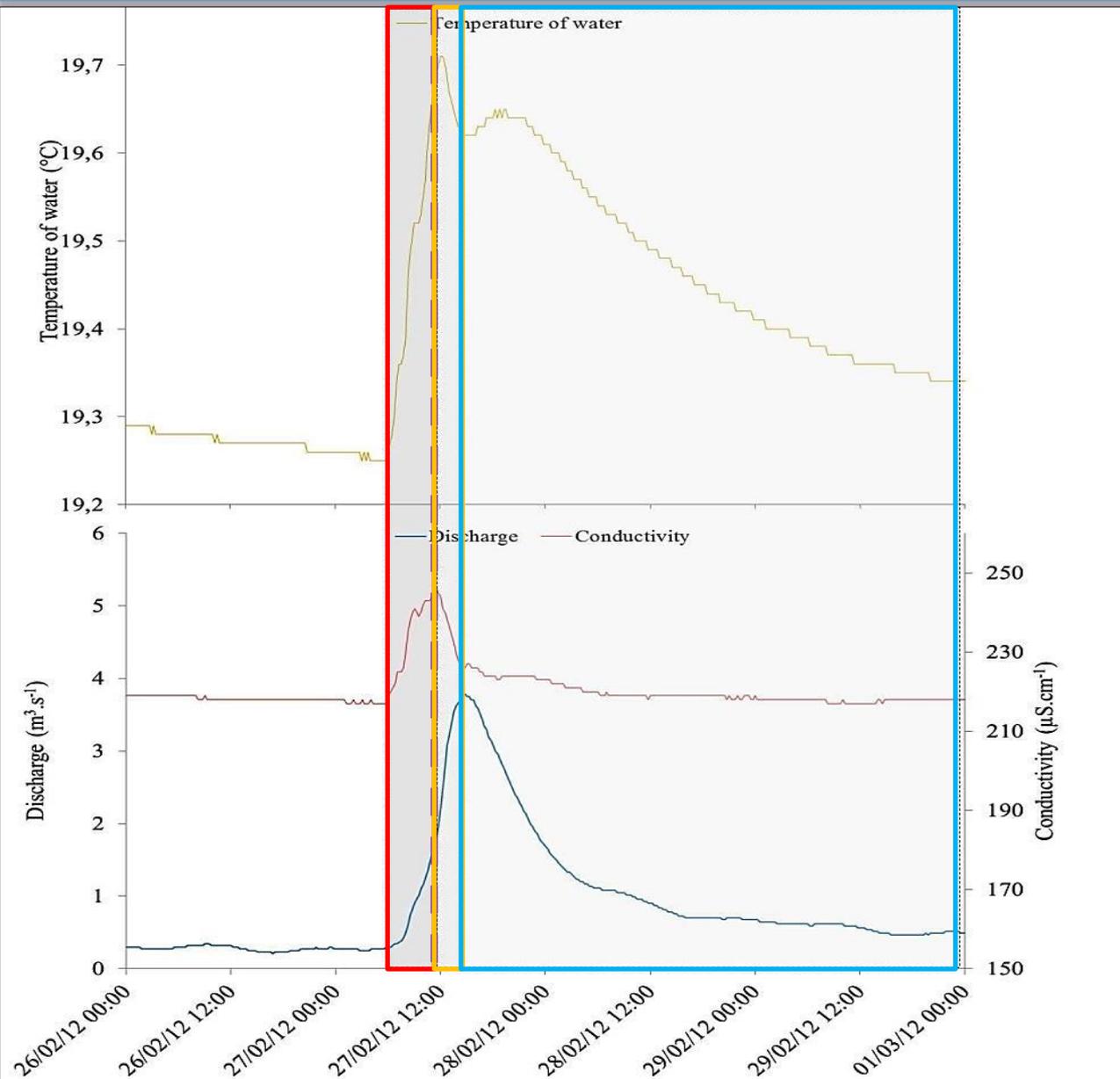


➤ Época de lluvias:

- Variaciones de CE y T +++

➤ Estiaje:

- Inicio: CE y T estables
- Fin: ↗ de CE y T



➤ **Inicio del periodo de crecida:**
 ↑ de CE y T mientras Q ↑

⇒ **Max de CE y T alcanzados antes del fin del pico de crecida**

➤ **Fin del periodo de crecida:**
 ↓ marcada de CE y T mientras Q ↑

➤ **Recesión y estiaje:**
 Lenta ↓ de CE y T mientras Q ↓

Beginning of rising period
 End of rising period
 Recession and low water periods

⇒ "FLUJO PISTÓN"



a- 1^{ra} fase → flujo de aguas más calientes y mas mineralizadas.

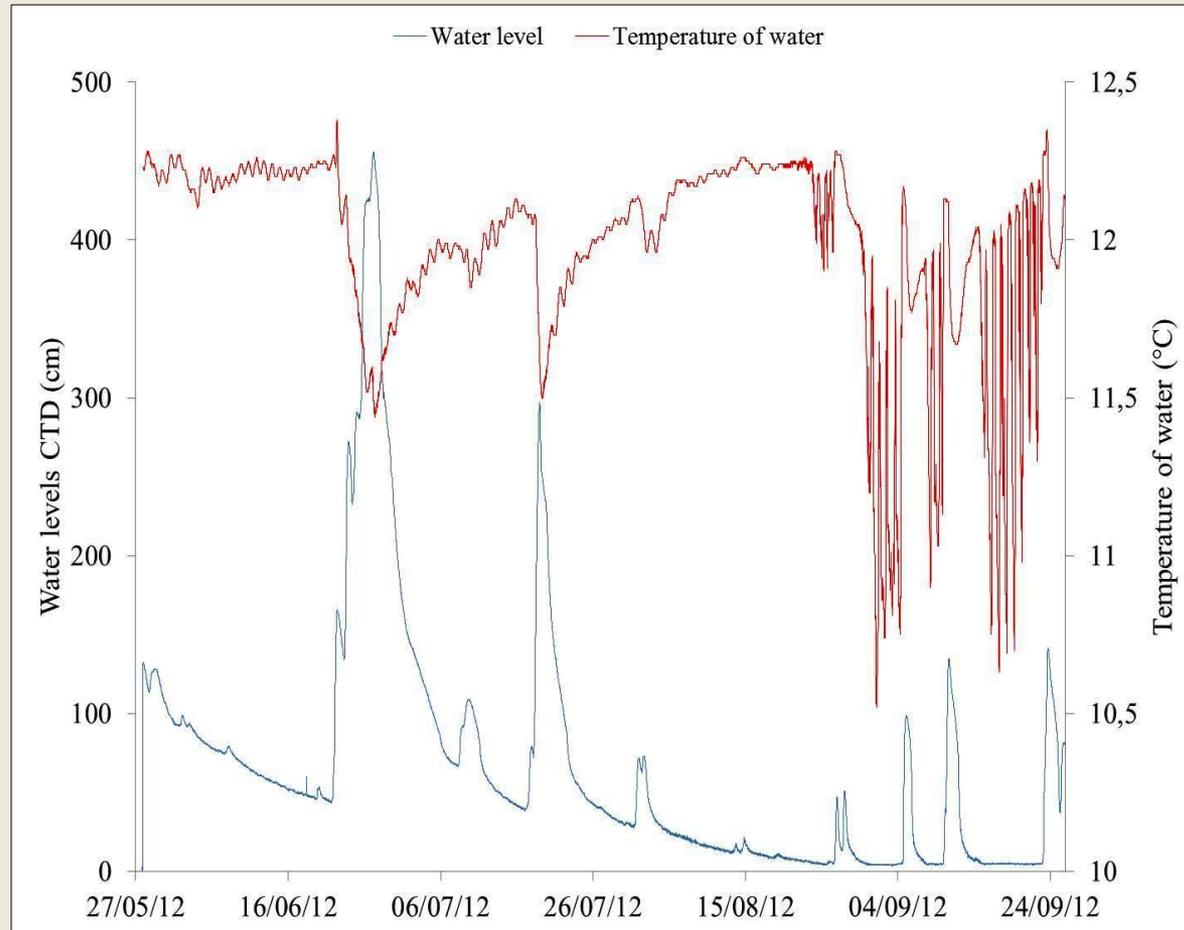


b- 2^{nda} fase → flujo de una mezcla → aguas calientes y mineralizadas + aguas más frías y menos mineralizadas



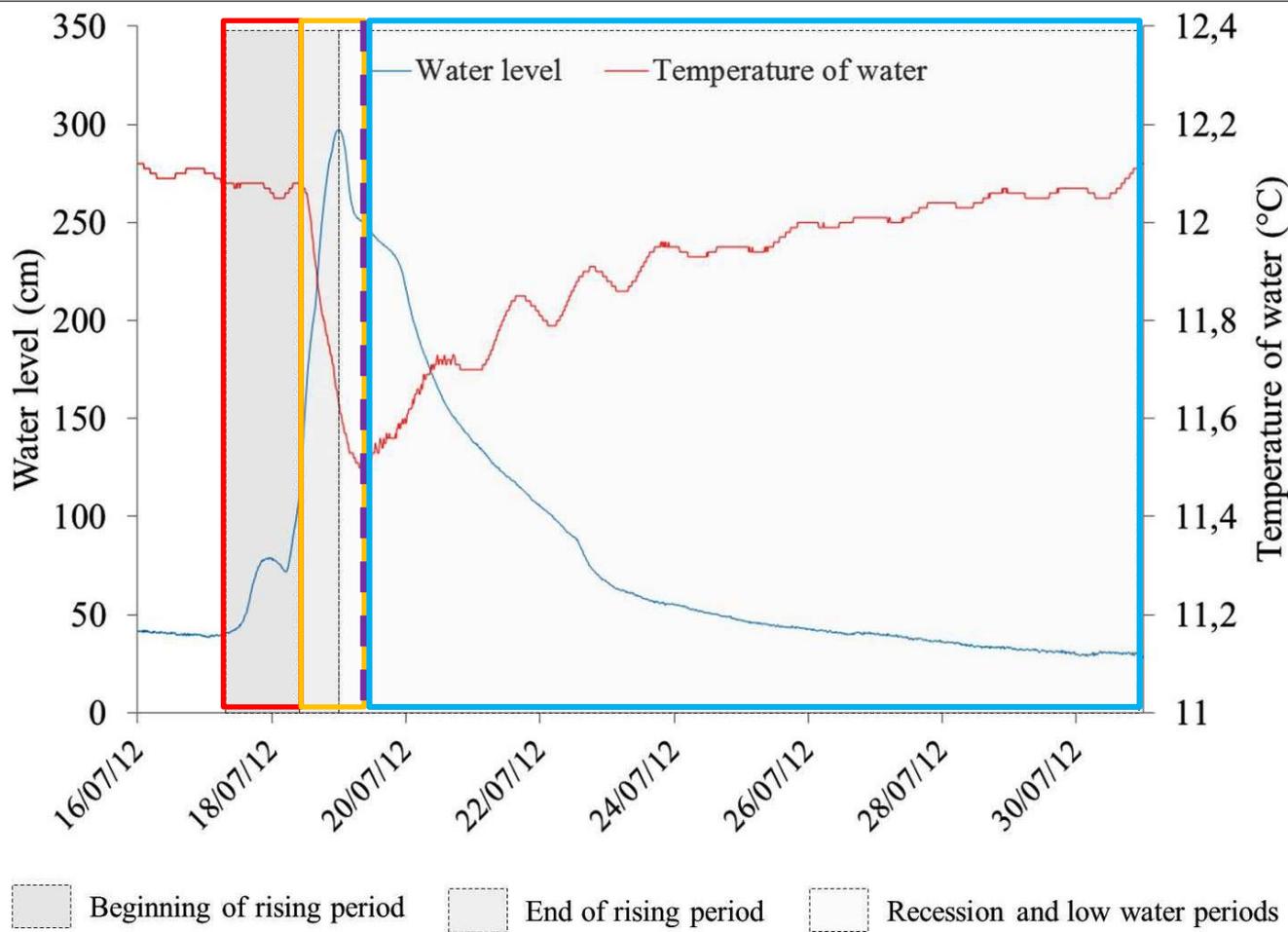
c- 3^{ra} fase → alimentación de la resurgencia por aguas más frías y menos mineralizadas

Resurgencia de Soloco



➤ Datos de CE inutilizables

⇒ Solo datos de T →  : periodo corto (3 ½ meses)



➤ **Inicio del periodo de crecida: $T \approx \text{cste}$**

➤ **Fin del periodo de crecida y inicio de la recesión: \downarrow marcada de T mientras $Q \uparrow$**

⇒ **Min de T alcanzado después del pico de crecida**

➤ **Fin de la recesión y estiaje: \uparrow de T mientras $Q \downarrow$**

⇒ "EFECTO DE DILUCIÓN"



a- 1^{ra} fase → flujo de aguas frías → mezcla de aguas de infiltración (T -) + aguas de la ZS (T +)



b- 2^{nda} fase → flujo de aguas calientes de la ZS

Balance de los elementos disueltos exportados y cálculo de la tasa de erosión kárstica

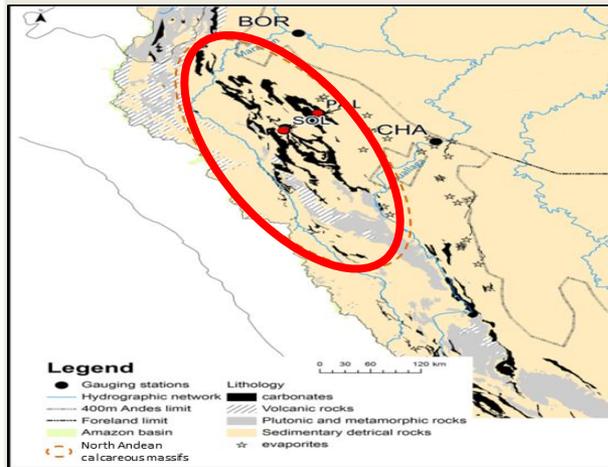


Cuenca	Est.	Per.	n	A _{cuenc.} km ²	Q m ³ .s ⁻¹	Método de calculo	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	SiO ₂	HCO ₃ ⁻	TDS _{tot}	
							10 ³ t.yr ⁻¹									
Soloco	SOL	2006-2012	48	26	1.07	HYBAM	0.07	0.21	0.05	3.35	0.14	0.03	0.13	4.12	7.60	
						M1C	0.07	0.20	0.05	3.26	0.13	0.03	0.12	4.07	7.59	
Palestina	PAL	2011-2012	12	15	0.5	HYBAM	0.02	0.11	0.006	1.91	0.08	0.01	0.04	2.56	4.74	
						M1C	0.02	0.11	0.006	1.91	0.08	0.01	0.04	2.57	4.74	
High Marañon*	BOR	2003-2010	-	114.10 ³	5032 ±1138	M1C	818 ±555	1805 ±770	836 ±279	3921 ±1564	412 ±139	178 ±56	2018 ±831	12906 ±4694	23.10³ ±8.10³	
Huallaga*	CHA	2005-2010	-	69.10 ³	3014 ±628	M1C	2642 ±1479	1366 ±363	1955 ±1025	2966 ±728	250 ±50	119 ±30	1022 ±253	9450 ±1875	19.10³ ±5.10³	
Peruvian Amazon*	TAM	2003-2008	-	722.10³	28787	M1C										131.10³ ±26.10³
Total Amazon*	OBI	2003-2008	-	4669.10³	174901	M1C										204.10³ ±38.10³

*Fuente: Moquet, 2011

➤ Métodos HYBAM y M1C → resultados similares

➤ Flujos específicos del grupo Pucará ≈ **292 to 316 t.km⁻².año⁻¹**



➤ Área macizos kársticos= **24546 km²**

➤ Flujos Específicos: **292 to 316 t.km⁻².año⁻¹**

⇒ TDS tot. = 7.5.10⁶ t.año⁻¹

Balance

Contribución
relativa al Alto
Marañón (%)

Contribución
relativa al
Huallaga (%)

Contribución relativa
a todo el Amazonas
(%)

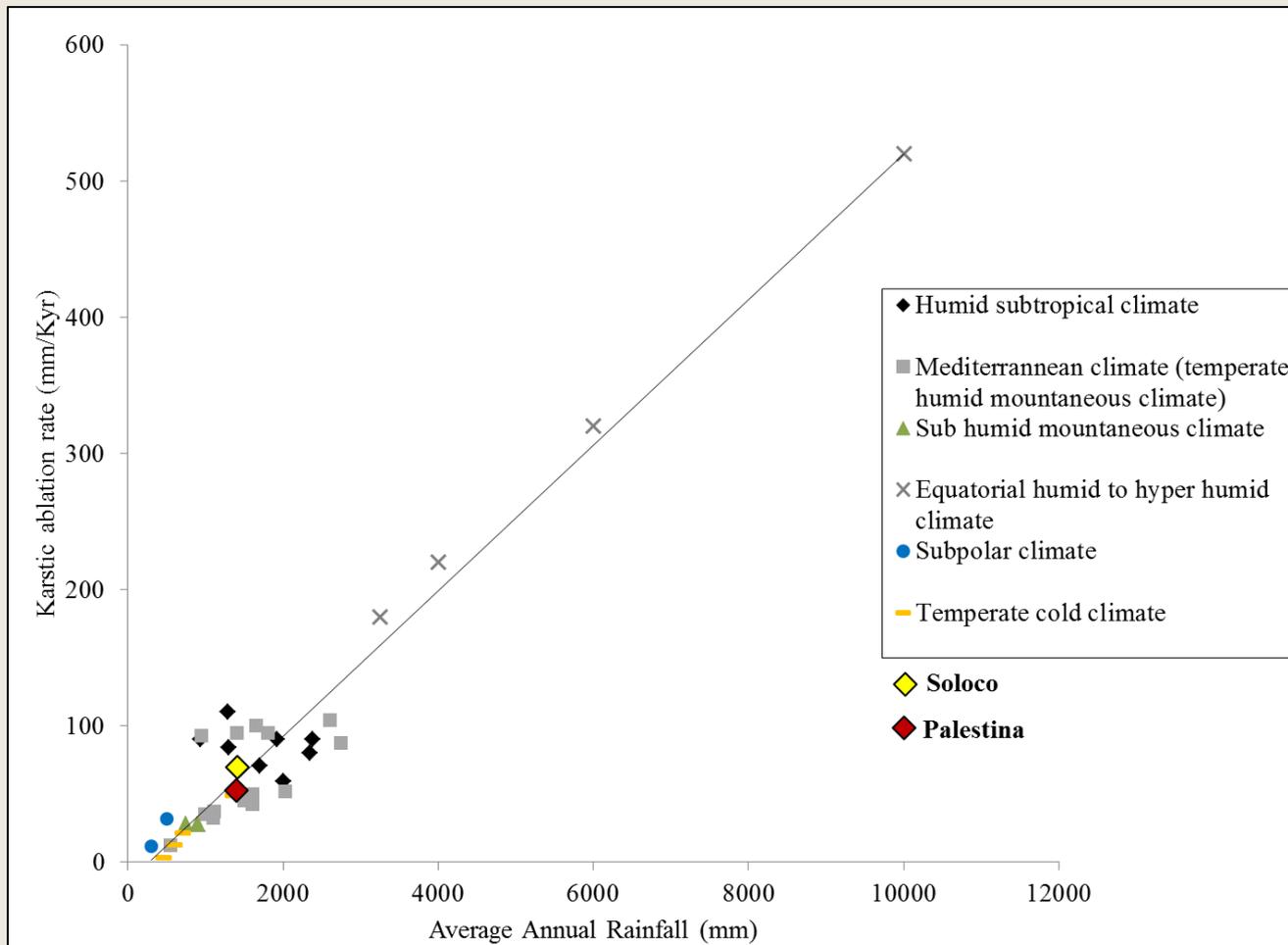
Contribución
relativa al Amazonas
Peruano (%)

	TDS _{tot} (10 ³ t.año ⁻¹)	A _{lim} (km ²)	Q (m ³ .s ⁻¹)	TDS _{tot}	Q						
Soloco	7.6	18	1.07	0.033	0.021	–	–	0.004	0.001	0.006	0.004
Palestina	4.7	15	0.5	–	–	0.024	0.017	0.002	0.005	0.004	0.004
Macizos kársticos	7500	24546	–	32.8	–	37.9	–	3.7	–	5.7	–

- **Método:**

- 1) Determinación de los flujos de Calcio exportados por la resurgencia (en t.año^{-1}). Hipótesis: todo el Ca viene del $\text{CaCO}_3 \Rightarrow 1 \text{ mol.año}^{-1}$ de $\text{Ca}^{2+} = 1 \text{ mol.año}^{-1}$ de CaCO_3 (o $100,086 \text{ g.año}^{-1}$ de CaCO_3);
- 1) Área A cubierta por las calizas (en km^2) \rightarrow flujo unitario de Ca exportado (en $\text{t.km}^{-2}.\text{año}^{-1}$);
- 2) Densidad D de 2.7 t.m^{-3} y porosidad de 6% para las calizas \rightarrow espesor teórico de calizas (en mm) erosionada/milenario

	Ca^{2+} 10^3 t.año^{-1}	V_{CaCO_3} $\text{m}^3.\text{año}^{-1}$	$A_{\text{cal.}}$ km^2	Tasa de erosión kárstica mm.mil^{-1}
Soloco	3.14	1164	18	70
Palestina	1.91	709	15	53



➤ **Primer estudio de los macizos kársticos del Norte del Perú:**

⇒ **Hidrología:**

- Palestina: karst bien desarrollado con bueno drenaje, bajas reservas de aguas subterráneas
- Soloco: señal de lluvia filtrado ++, antiguo karst obstruido

⇒ **Química:**

- Composición de las aguas: disolución de las calizas
- Palestina: Comportamiento de tipo "Flujo Pistón"
- Soloco: "Efecto de dilución"

⇒ Química:

- Macizos kársticos: TDS $\approx 7.5 \cdot 10^6 \text{ t.año}^{-1}$
 - $\approx 71\%$ del flujo exportado por los afluentes andinos del Amazonas (Alto Marañón+Huallaga)
 - Amazonas Peruano $\approx 6\%$
 - Amazonas entero $\approx 4\%$
- Tasa de erosión kárstica:
 - Soloco $\approx 70 \text{ mm.mil}^{-1}$
 - Palestina $\approx 53 \text{ mm.mil}^{-1}$



**¡Gracias por
su atención!**