
FLUJO DE CARBONO DE UN SISTEMA LÓTICO TROPICAL MEXICANO.

CASO DE ESTUDIO: CUENCA DEL RÍO USUMACINTA

Ing. Ismael Fabián Soria Reinoso MSc.

TUTOR PRINCIPAL: Dr. Javier Alcocer

Comité tutor: Dr. Felipe García-Oliva, Dr. Luis Oseguera, Dr. Alfonso Lugo, Dr. Enrique Cantoral

Asesor externo: Dr. Salvador Sánchez Carrillo

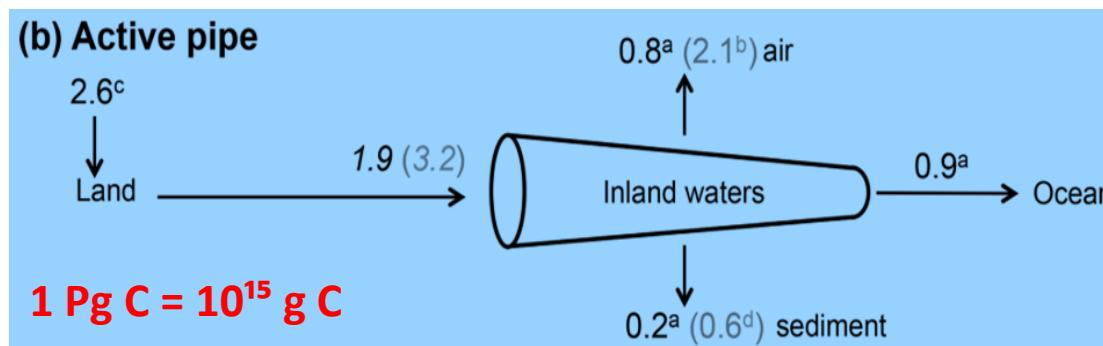
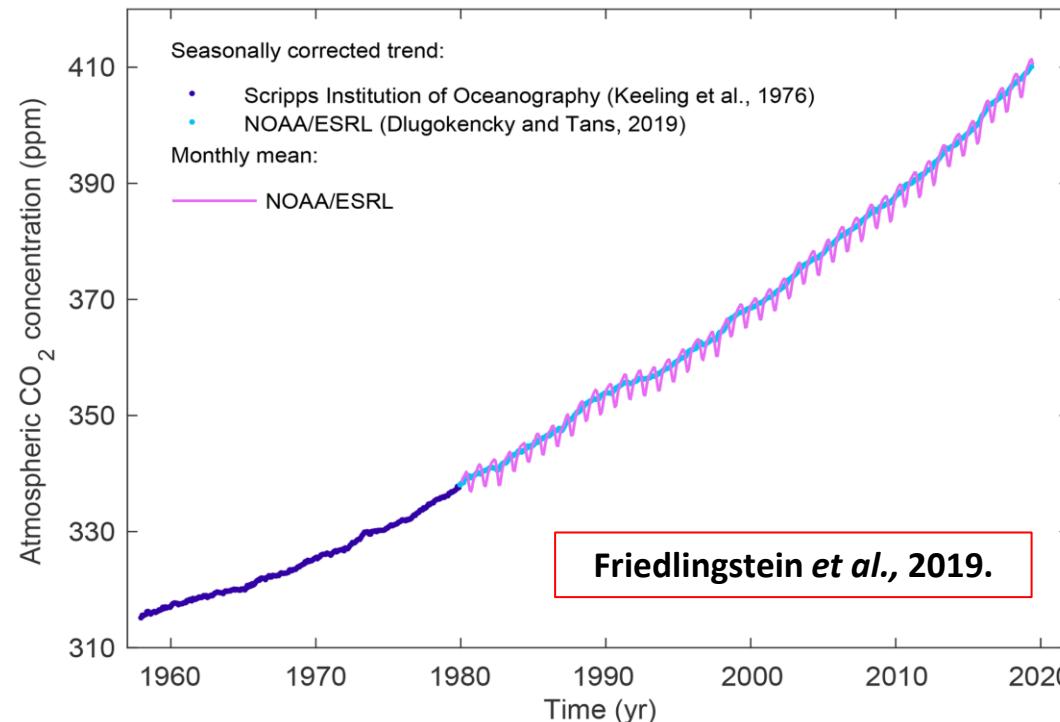
Diciembre, 2020

CONTENIDO

- 1. INTRODUCCIÓN**
- 2. OBJETIVOS**
- 3. ÁREA DE ESTUDIO Y
METODOLOGÍA**
- 4. RESULTADOS –
DISCUSIÓN**
- 5. CONCLUSIONES**

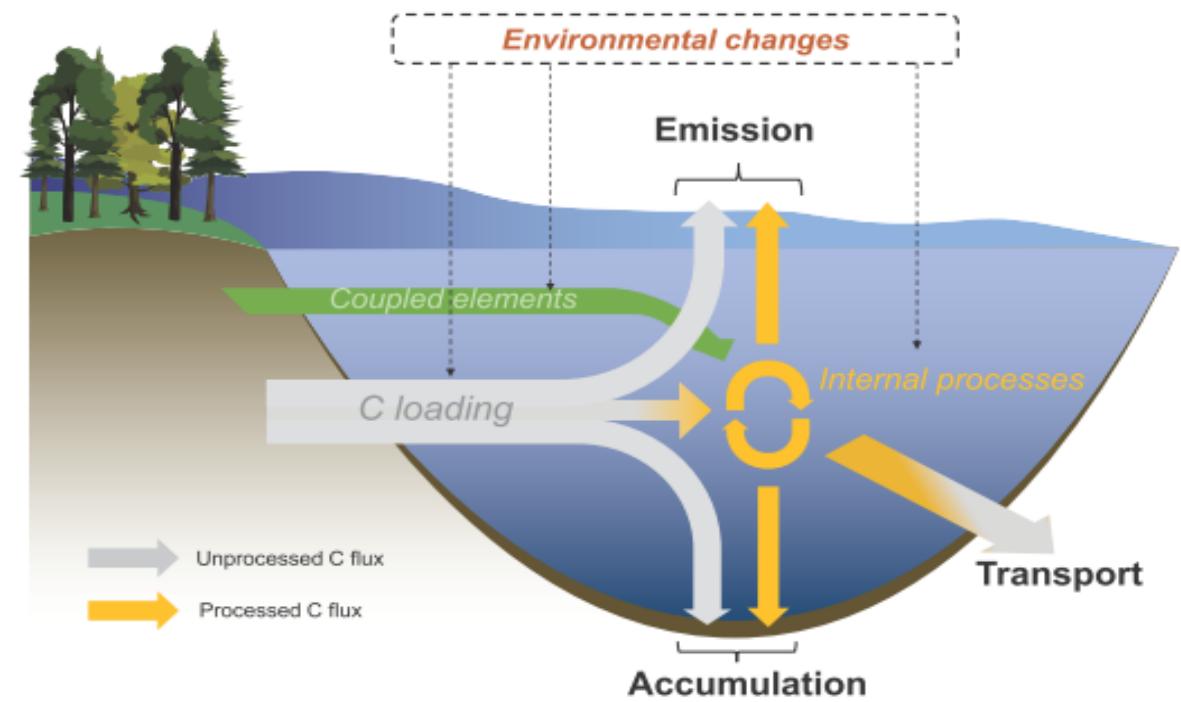


INTRODUCCIÓN: Contexto e Importancia



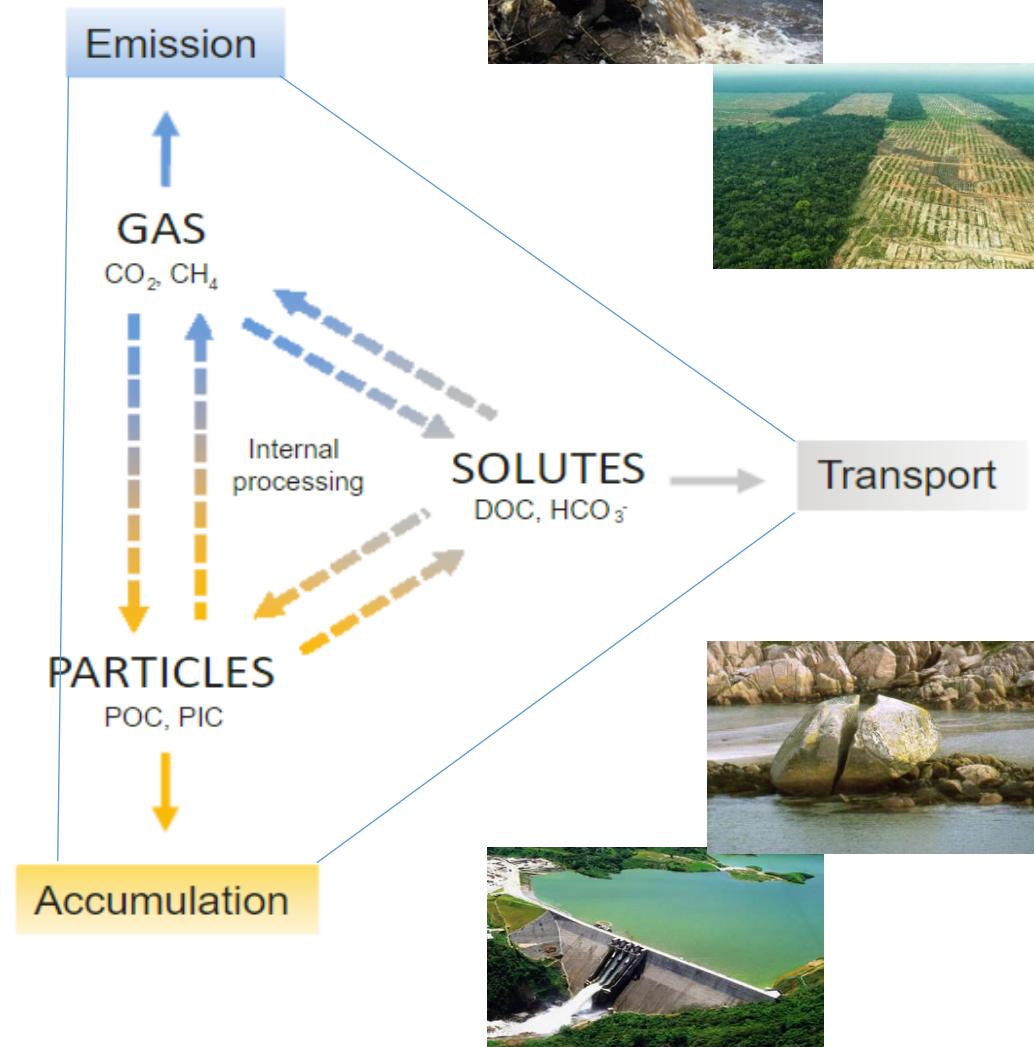
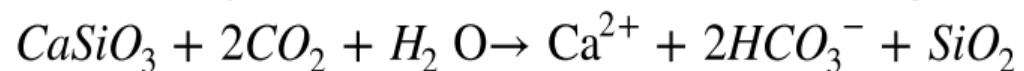
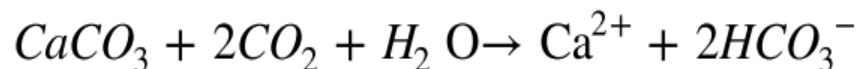
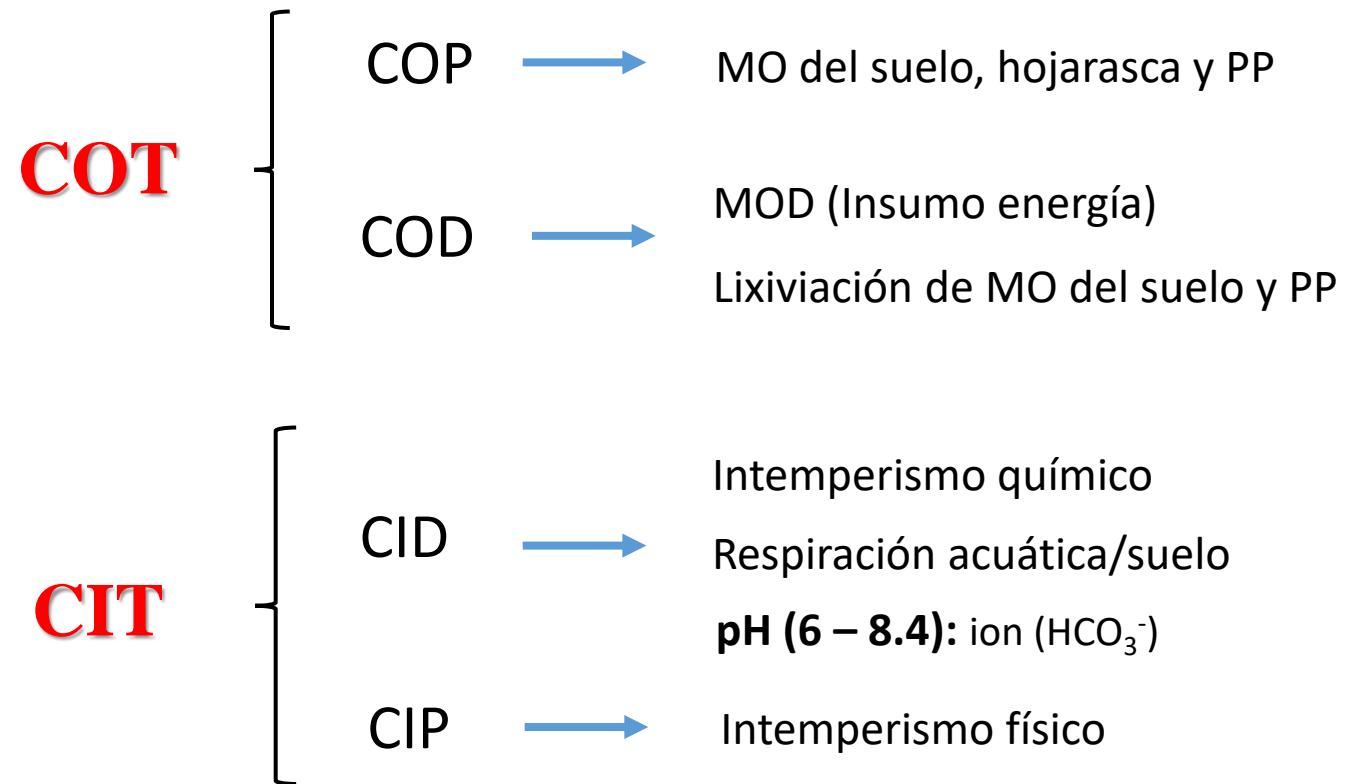
Cole *et al.*, 2007. Ecosystems
Abril y Borges, 2019. Biogeoscience

SISTEMAS ACUÁTICOS EPICONTINENTALES Y CICLO GLOBAL DEL CARBONO



Vachon *et al.*, 2020. Glob. Chang. Biol.

INTRODUCCIÓN: Carbono Fluvial



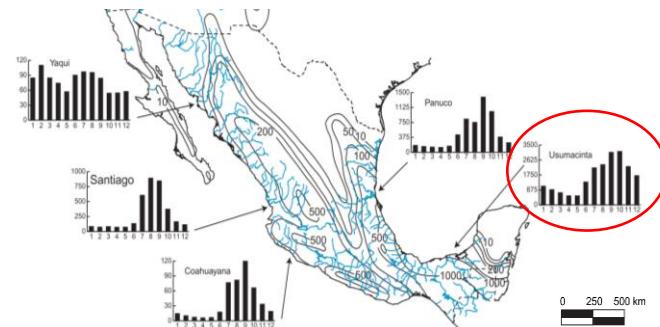
Flujo C: f (Geomorfología, hidrodinámica, clima y act. antrópicas)

Vachon et al., 2020. Glob. Chang. Biol.
<https://doi.org/10.1111/gcb.15448>

ANTECEDENTES: C en Sistemas Tropicales - México

Fracciones de C en ríos tropicales escasamente caracterizado

¿Flujos de C en México?



Second State of the Carbon Cycle Report (SOCCR2) (Butman et al., 2018).

Table 14.1. U.S., North American, and Global Annual Carbon Fluxes from Inland Waters^{a–k}

Source	United States ^a	Canada	Mexico	Great Lakes	North America	Globe (Pg C per Year)
	(Tg C per Year)					
Rivers and Streams						
Lateral Fluxes	59.8***	18.2 (TOC) ^b	ND	ND	105****	0.6–0.7 ^c
Gas Emissions	85.9**	ND	ND	ND	124.5**	0.7–1.8 ^d (2.9) ^e
Lakes and Reservoirs						
Burial	22.5**	ND	ND	2.7 ^h	155**	0.2–0.6 ^f
Gas Emissions	24.2***	ND	ND	ND	122**	0.6 ^g
Inland Aquatic Systems						
Total Carbon Flux	193***	ND	ND	2.3–36 ^{*i}	507**	2.1–3.7 (4.9)
Net Carbon Yield (g C per m ² per year)	20.6***	ND	ND	ND	23.2**	16–17 (33)



Available online at www.sciencedirect.com

SciVerse ScienceDirect

Current Opinion in
Environmental
Sustainability

Fluvial carbon fluxes in tropical rivers

Ting-Hsuan Huang, Yu-Han Fu, Pei-Yi Pan and Chen-Tung Arthur Chen

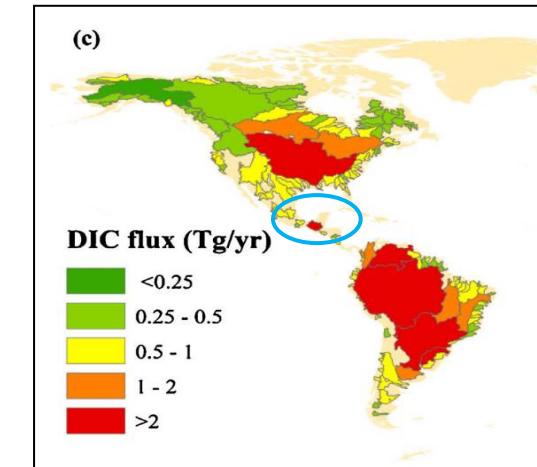
- **Hidrología, geomorfología, biodiversidad y ecología** de los ríos de México pobremente estudiada (**Hudson et al., 2005**).
- **Desconocimiento casi total** del papel de los sistemas epicontinentales mexicanos en el ciclo y presupuesto del C (**Butman et al., 2018**).
- **Trabajos puntuales** de almacenes y flujos de C en sistemas léticos (Alchichica, Valle de Bravo; **Alcocer et al., 2019**).

Gran incertidumbre a escala nacional.
Falta de información (espacial y temporal).
Desconocimiento de procesos de C.

PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN - HIPÓTESIS

1. ¿Cuál es la **concentración** de las distintas fracciones de carbono (**COP, COD, CIP y CID**) y cómo varían las **proporciones** COD/COP, CID/COD de manera **temporal y espacial** a lo largo del río Usumacinta?

- **CID mayor fracción**, litología kárstica (*Li et al., 2017*).
- **COD/COP > 1** (*Huang et al., 2012*).
- **CID/COD > 1**, diferencia temporal y espacial (*Atkins et al., 2017*).



2. ¿Cuáles son los **aportes de carbono disuelto y particulado** del río Usumacinta al Golfo de México en comparación con otros sistemas lóticos tropicales o templados y cómo varía estacionalmente?

- **Aporte** elevado de C (*Li et al., 2017*).
- Mayor flujo de C en época de **lluvias** (*Muñoz-Salinas et al., 2016*).
- **Variación C** en el gradiente altitudinal.



OBJETIVOS

Evaluar las **concentraciones** de C y sus **flujos** de exportación fluvial en el cauce principal y afluentes del río Usumacinta en su porción mexicana, analizando las **variaciones temporales y espaciales** de las diferentes especies químicas del C (**COD, CID, COP, CIP**) y sus proporciones, con el fin de establecer el funcionamiento base de los sistemas lóticos tropicales de México.

Determinar

Concentraciones y flujos de C

Variabilidad espacial y temporal

Caracterizar

Variabilidad del caudal (hidrodinámica)

Parámetros FQ SST, Clor-a

Determinar

Relaciones del C

Procesos hidrológicos, biogeoquímicos y uso de suelo

Comparar

Flujos de C

Sistemas lóticos tropicales similares



ÁREA DE ESTUDIO

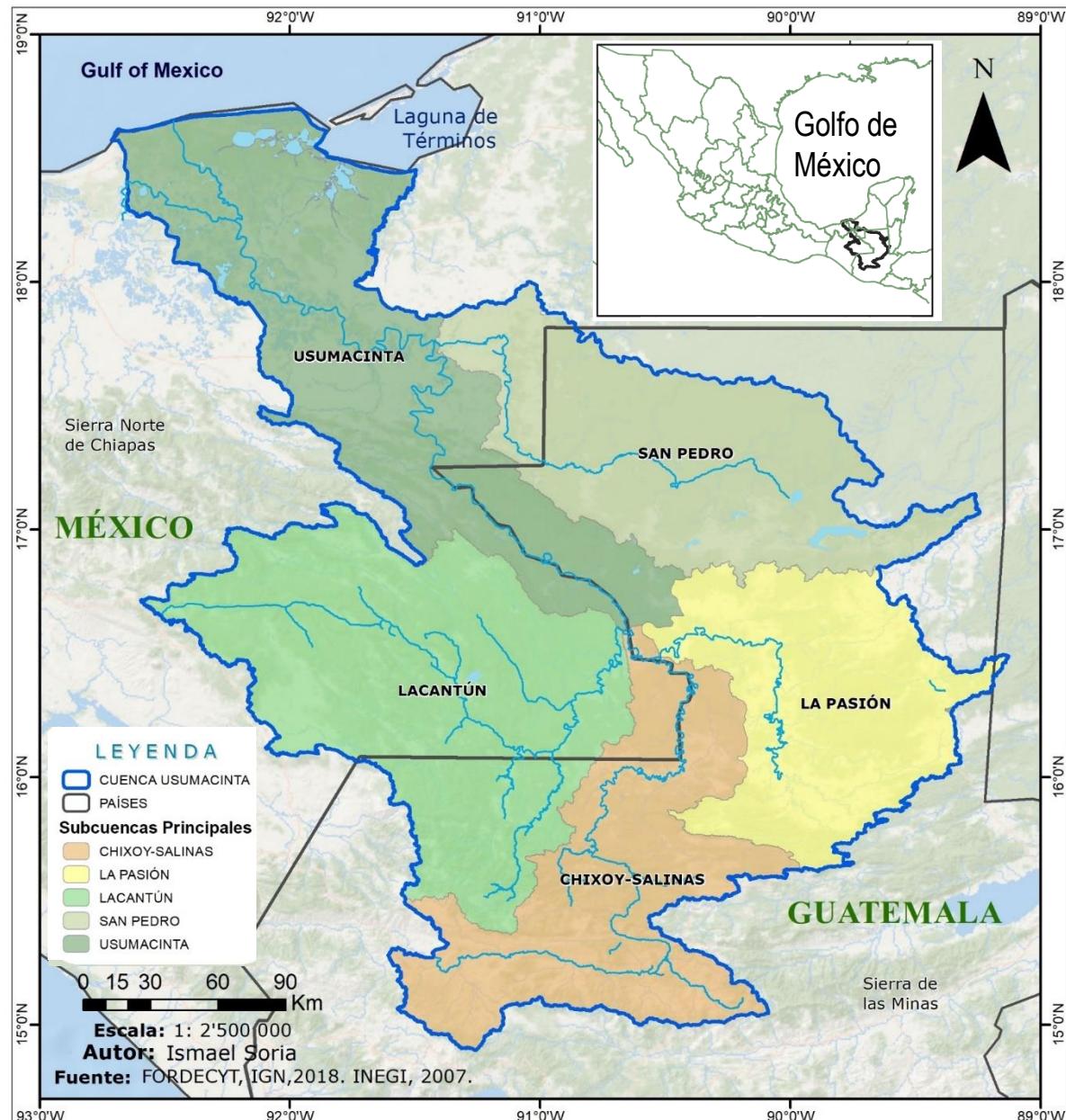
Cuenca del Río Usumacinta



Área: 77,743 km² (~42% en México)
Caudal: ~1,857 m³ s⁻¹ (67 km³ año⁻¹)
Temp: 23 °C – 26 °C (Húmedo tropical)
Precipitación media: 1,500 a 2,000 mm año⁻¹
Altitud: 3,800 m s.n.m

Soares y García (2017), Benke y Cushing (2009).

**RH-30
(Grijalva-Usumacinta)**
~ 112,550 km²
~ 2,678 m³ s⁻¹
~ 1,100 km



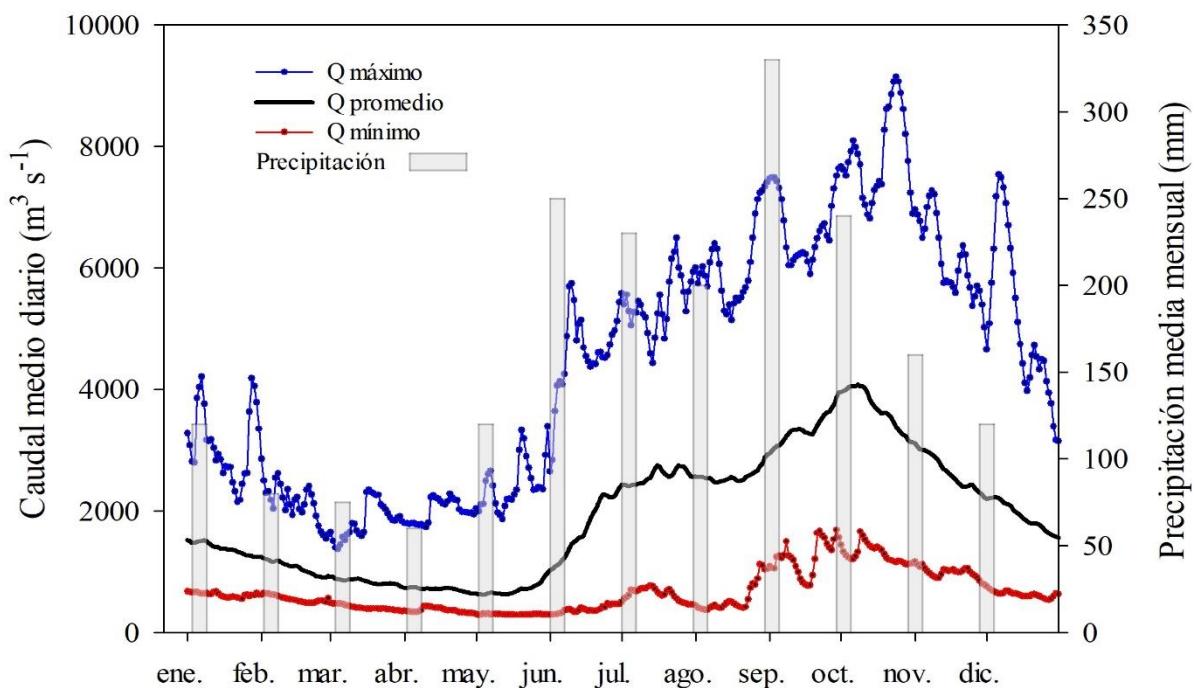
ÁREA DE ESTUDIO

Geomorfología

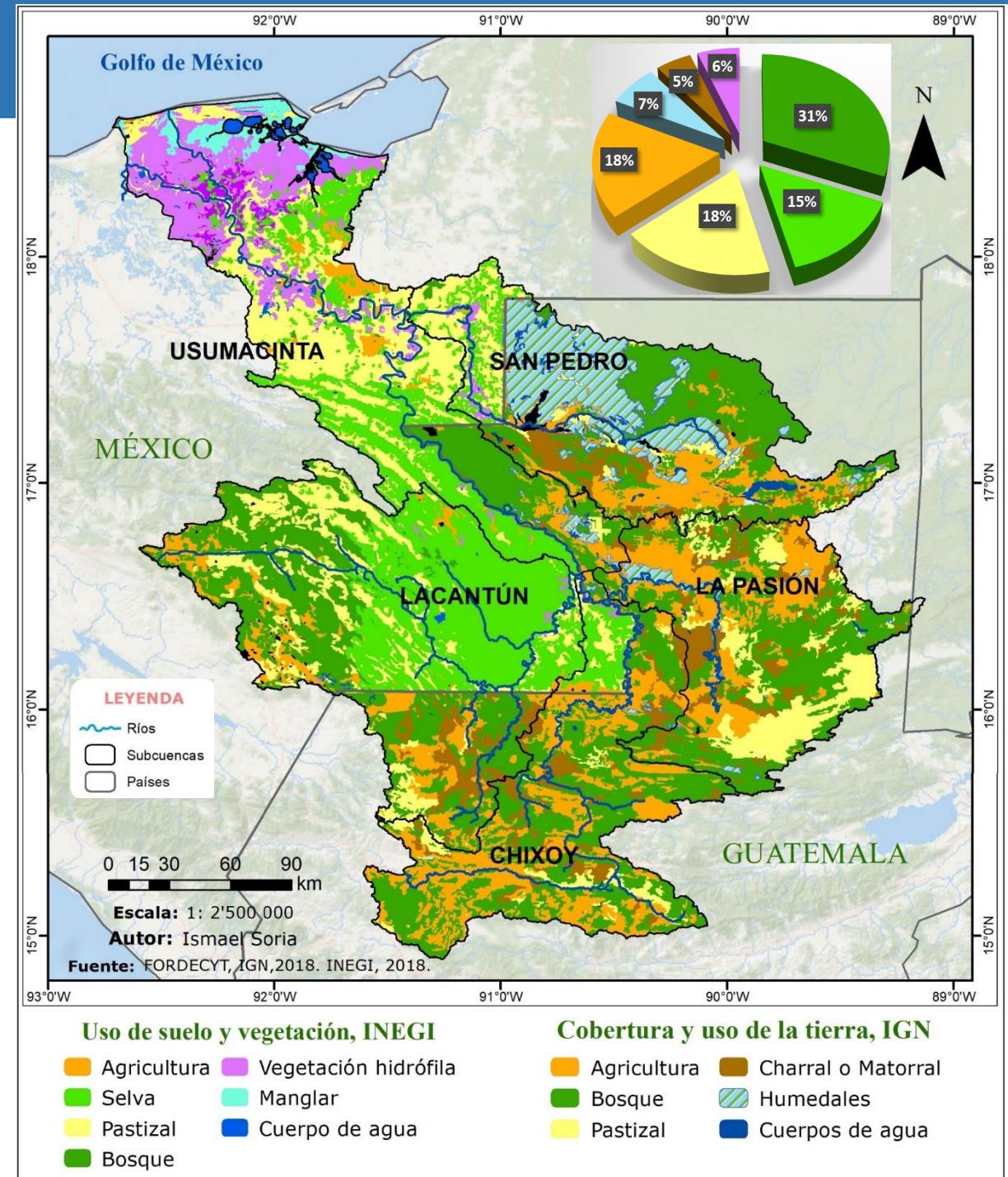
Zona Montañosa: caliza y carbonatos
Llanura costera: rocas sedimentarias

Zona de Convergencia Intertropical
(ITCZ)

Vientos Alisios - Verano
80% precipitación



Caudal diario (Boca del Cerro) del río Usumacinta (1948-2014) y precipitación media mensual CONAGUA (2019).

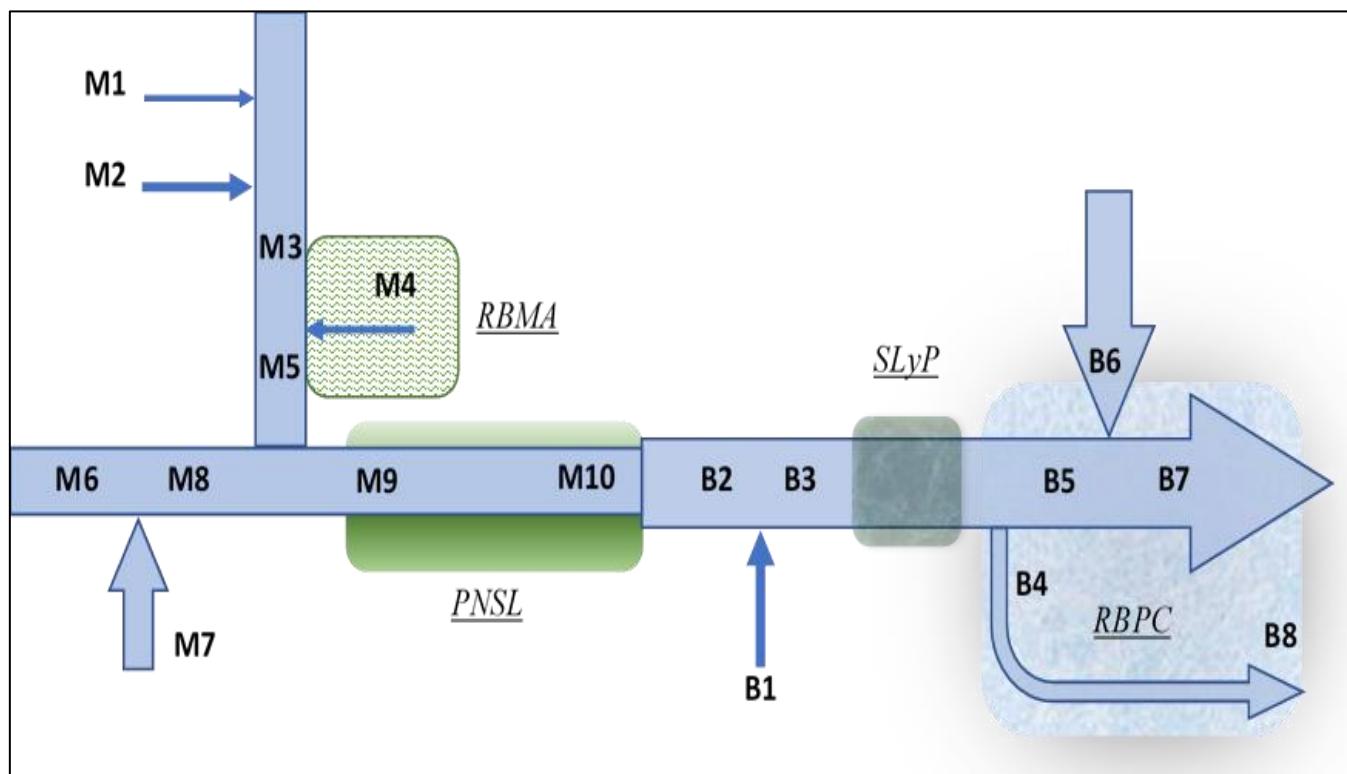


Estaciones de muestreo

Trabajo de campo

2 Campañas de muestreo
(Octubre 2017 y Abril 2018)

18 estaciones
(cauce principal + afluentes)



RBMA: Reserva de la Biosfera Montes Azules
PNSL: Parque Nacional Sierra del Lacandón

SLyP: Sistema lagunar y pantanos
RBPC: Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla



METODOLOGÍA: Trabajo de campo

Perfil batimétrico de la sección transversal

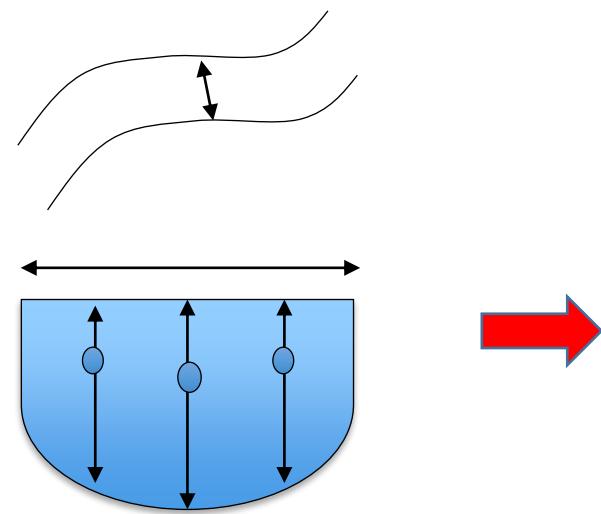


Ecosonda
(GPSMap 526S)

Medición de velocidad media
Flujómetro



Tres perfiles verticales



Variables fisicoquímicas *in situ*
Hidrolab DS5



Recolección de muestras
Botella tipo Van Dorn



METODOLOGÍA: Trabajo de Laboratorio

COP/CTP

- Filtración GF/F - 0.7 µm calcinados (550°C, 4 h)
- HCl 10%
- Filtros secados (48 h, 60°C) y almacenados
- Analizador Elemental Carlo Erba® modelo NC2100

$C \text{ (mg L}^{-1}\text{)}$



$$\text{CIP} = \text{CTP} - \text{COP}$$

COD

- Filtración (GF/F)
- Frascos ámbar (60 ml)
- H₃PO₄ (40%)
- Analizador TOC Shimadzu TOC-L



Combustión de compuestos de C_{Org} no purgables

$C \text{ (mg L}^{-1}\text{)}$



METODOLOGÍA: Trabajo de Laboratorio

SST

- Peso inicial
- Filtración GF/F - 0.7 µm calcinados (550°C, 4 h)
- Filtros secados (48 h, 60°C) y almacenados
- Peso final



Clor-a

- Método 445.0-EPA (Arar y Collins, 1997)
- Filtración GF/F - 0.7 µm
- Extracción con 10 mL de acetona al 90%
- Fluorómetro Turner Designs



$$SST \text{ (mg L}^{-1}\text{)} = \frac{(P2 - P1) - Blanco}{Volumen}$$

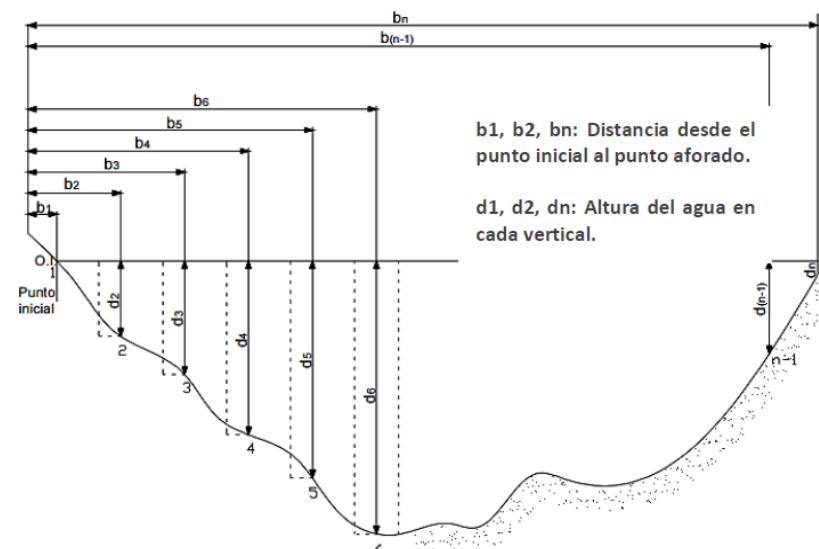
$$\text{Clor-a} \text{ (\mu g L}^{-1}\text{)} = \frac{(C * V * f)}{Volumen}$$

METODOLOGÍA: Procesamiento de datos



$$Q_{total} = \sum_{i=1}^n a_i * v_i = \sum Q_i \quad [m^3 s^{-1}]$$

$$\text{Flujo C} = C * Q_m \quad [t C \text{ d}ia^{-1}]$$



Elosegi y Sergi, (2011).

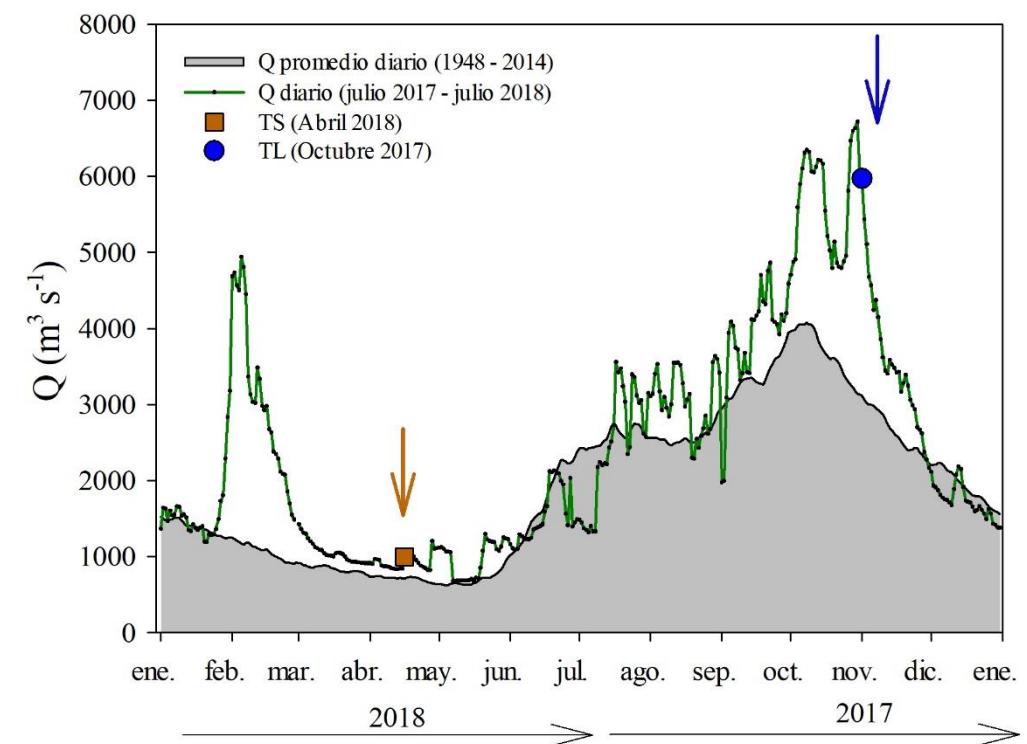
Distribución espacial
Test de Normalidad
(Shapiro-Wilks)
t-student (p<0.05)
Mann-Whitney
Correlación de Spearman
ACP + Dendrograma
(Normalización logarítmica)
Análisis discriminante

Sigma Plot 14.0 y Past 3.0

Estimación del flujo anual

Mbaye et al. (2016)
[t C año⁻¹]

Boca del Cerro (M10)
Balance desembocaduras

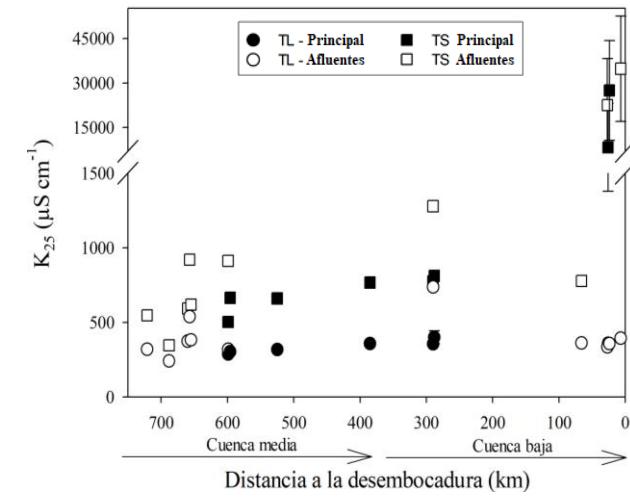
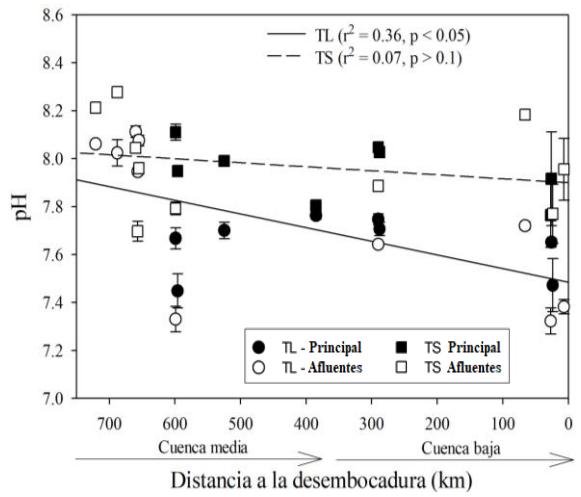
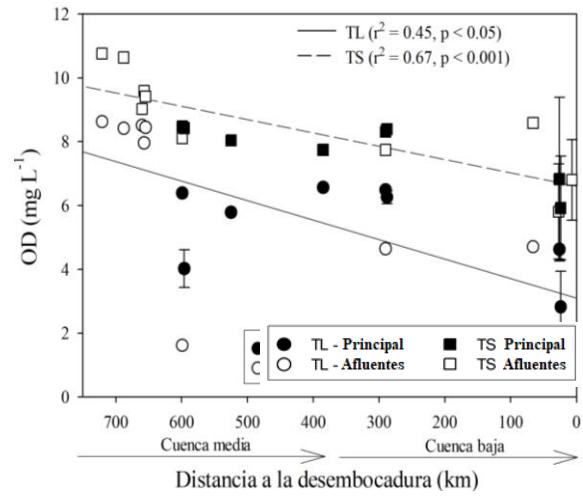
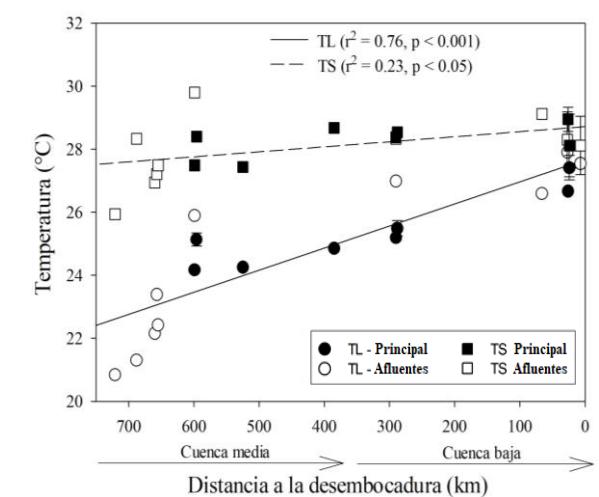
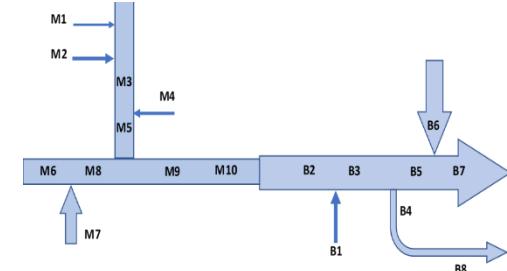


RESULTADOS: Variables ambientales

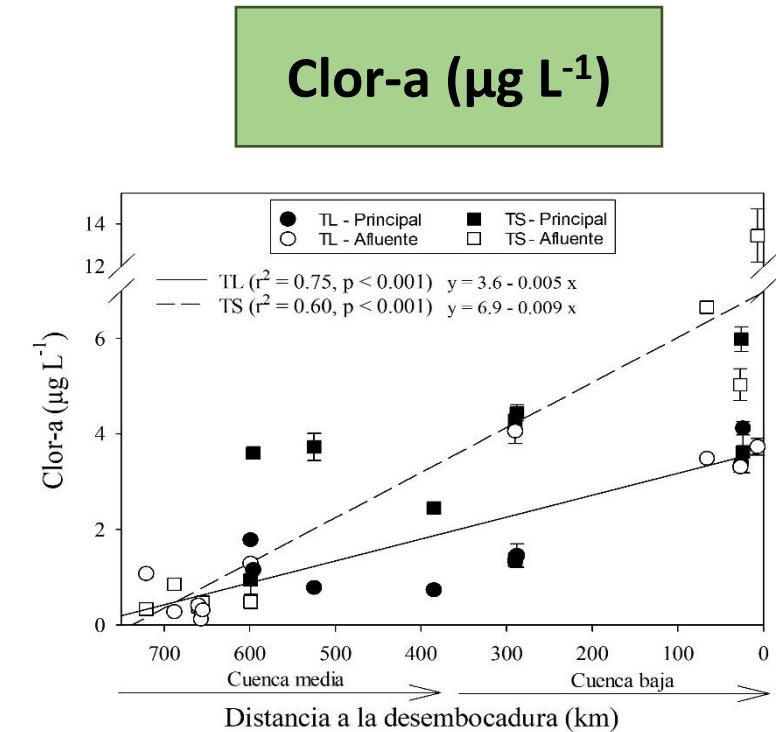
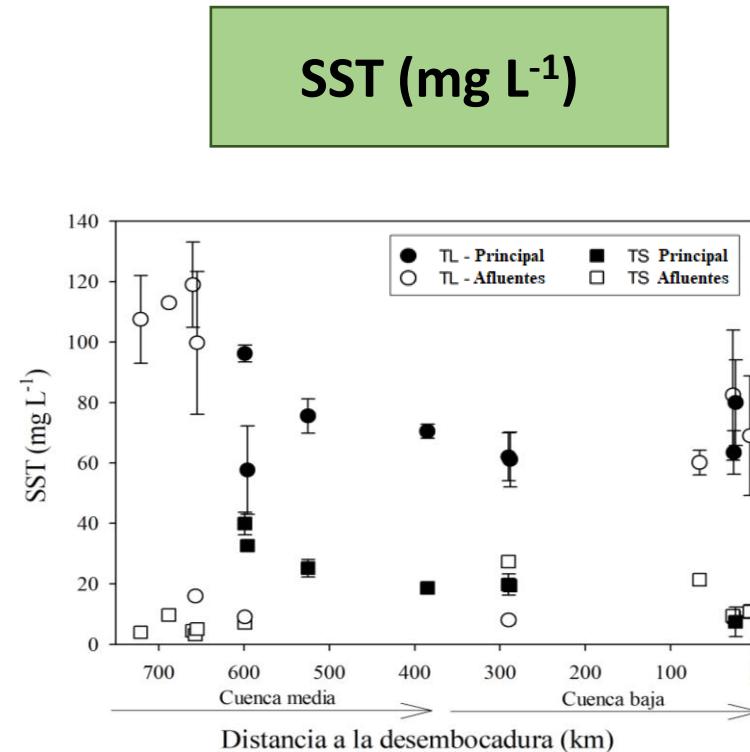
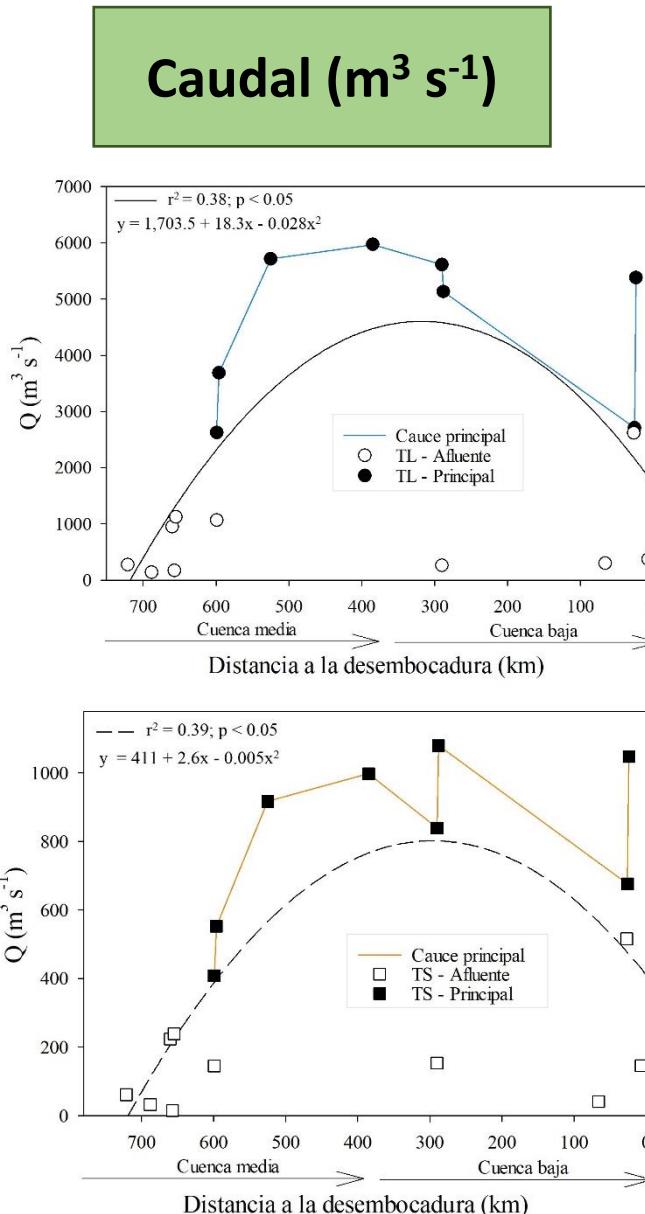
		Temp (°C)		OD (mg L ⁻¹)		pH		K ₂₅ (μS cm ⁻¹)		S (PSU)	
		TL	TS	TL	TS	TL	TS	TL	TS	TL	TS
Media	Prom	23.4	27.8	6.6	9.0	7.8	8.0	344	653	0.1	0.3
	d.e.	1.7	1.1	2.3	1.1	0.3	0.2	80	178	0.04	0.1
Baja	Prom	26.8	28.6	3.5	6.8	7.5	7.9	410	14 773	0.2	8.3
	d.e.	0.9	0.5	2.1	1.5	0.2	0.2	117	13 639	0.06	7.9
Global	Prom	25.1	28.2	5.1	7.9	7.7	7.9	377	7713	0.2	4.3
	d.e.	2.2	0.9	2.7	1.7	0.3	0.2	103	11 857	0.05	6.8
	Mín.	20.8	25.9	0.9	4.4	7.3	7.5	241	346	0.1	0.1
	Máx.	27.9	29.8	8.6	10.8	8.1	8.3	737	34 846	0.3	20.5

Temp, OD, pH, K₂₅ mayor en secas ($p<0.001$)

Cuña salina en la TS

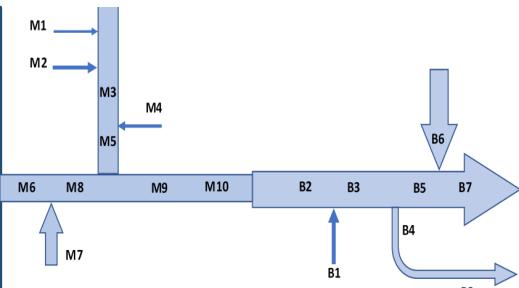


RESULTADOS: Caudal, SST y Clor-a



Caudal 5 a 6 veces > lluvias ($p<0.05$), \downarrow cuenca baja.
Aporte del río Grijalva 50% TL y 35% TS

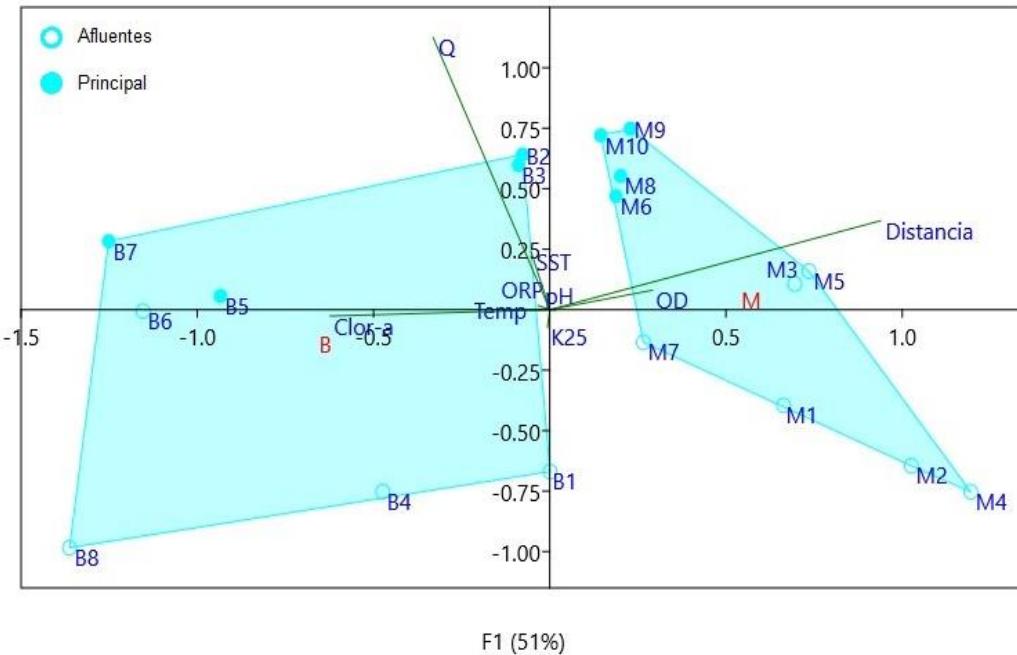
SST > TL ($p<0.05$): flujos hiper-concentrados y turbios
Clor-a > TS e incremento río abajo ($p<0.05$)



ACP: Temporada de Lluvias y Secas

Lluvias

“variación hidrológica”

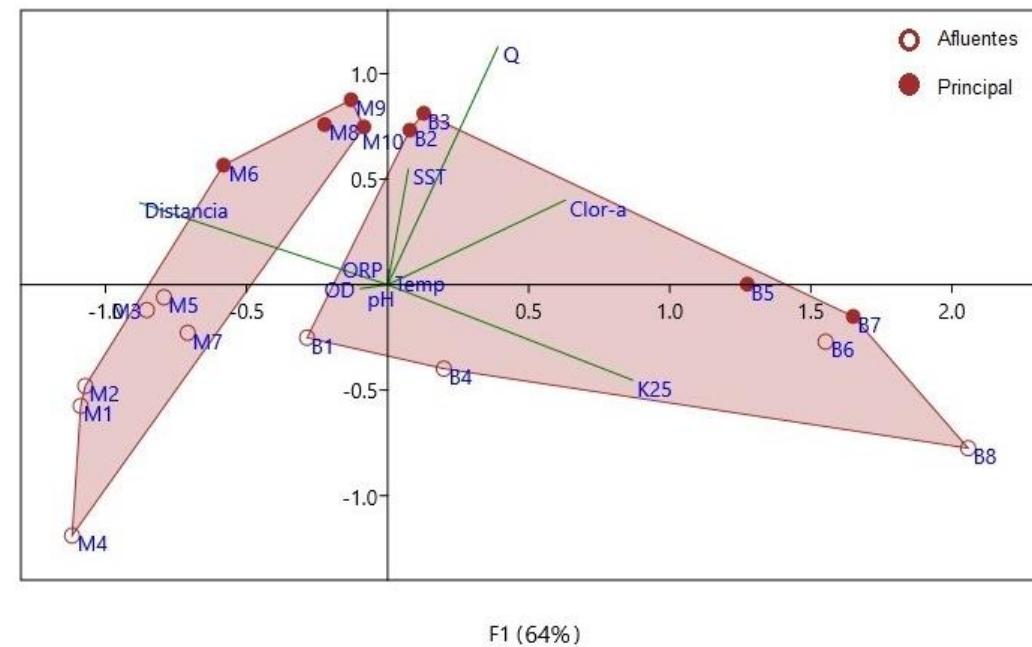


“variación longitudinal”

TL: Distancia, Caudal, Clor-a y SST

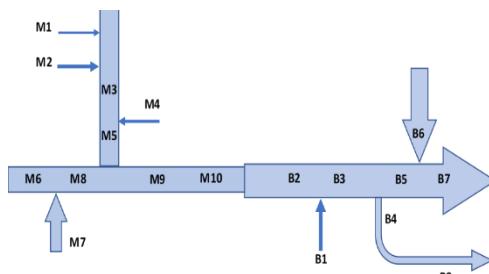
Secas

“variación hidrológica”



“variación longitudinal”

TS: Distancia, Caudal, K₂₅, Clor-a y SST



Análisis Discriminante TL y TS

Diferencia significativa (prueba t, >95%)

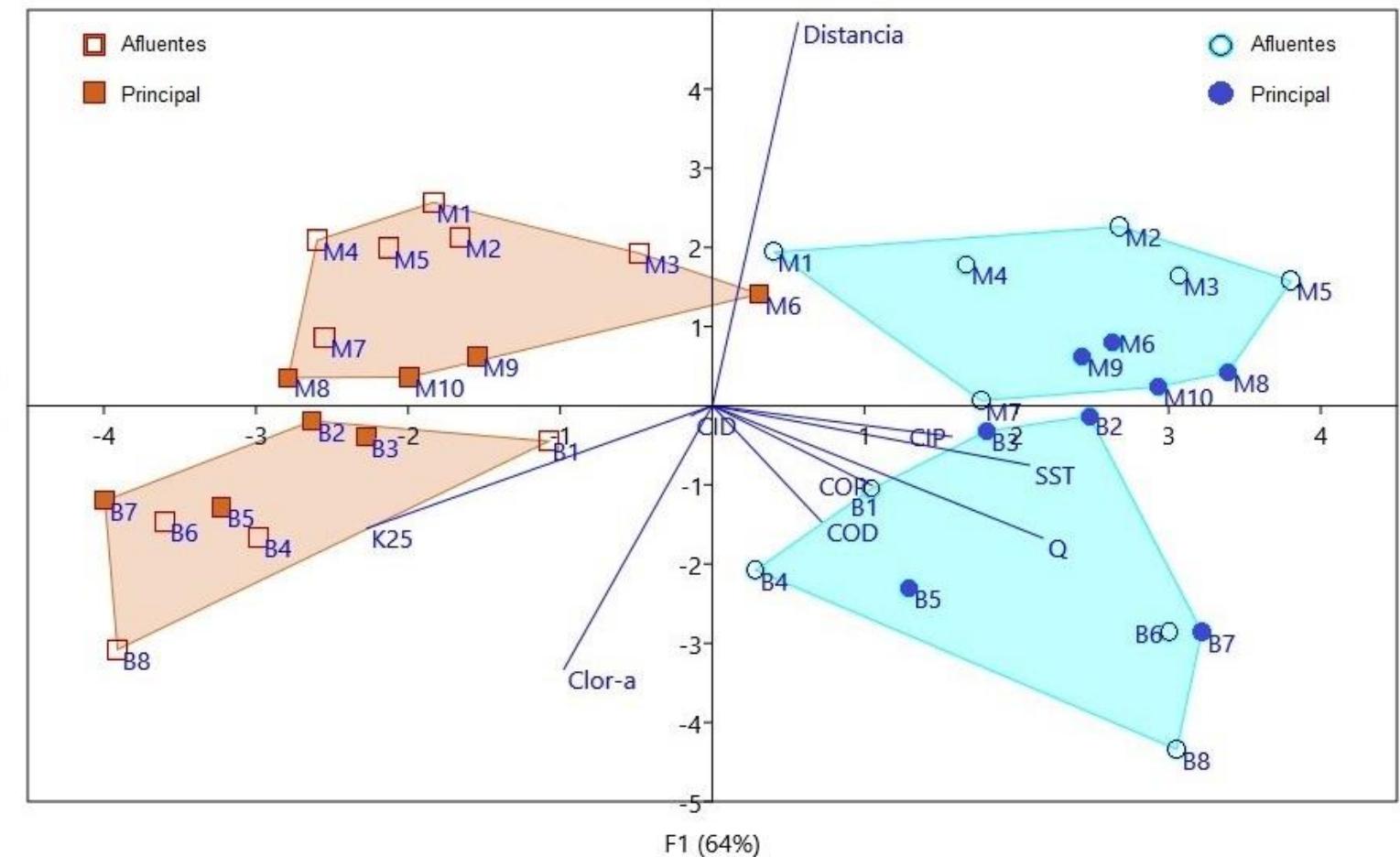
Q, Temp, OD, pH, K₂₅, ORP, Clor-a, SST

COD, COP, COT, CID, CIP

Distancia (km), Q, K₂₅, SST y Clor-a

TL Y TS
Cuenca media y baja

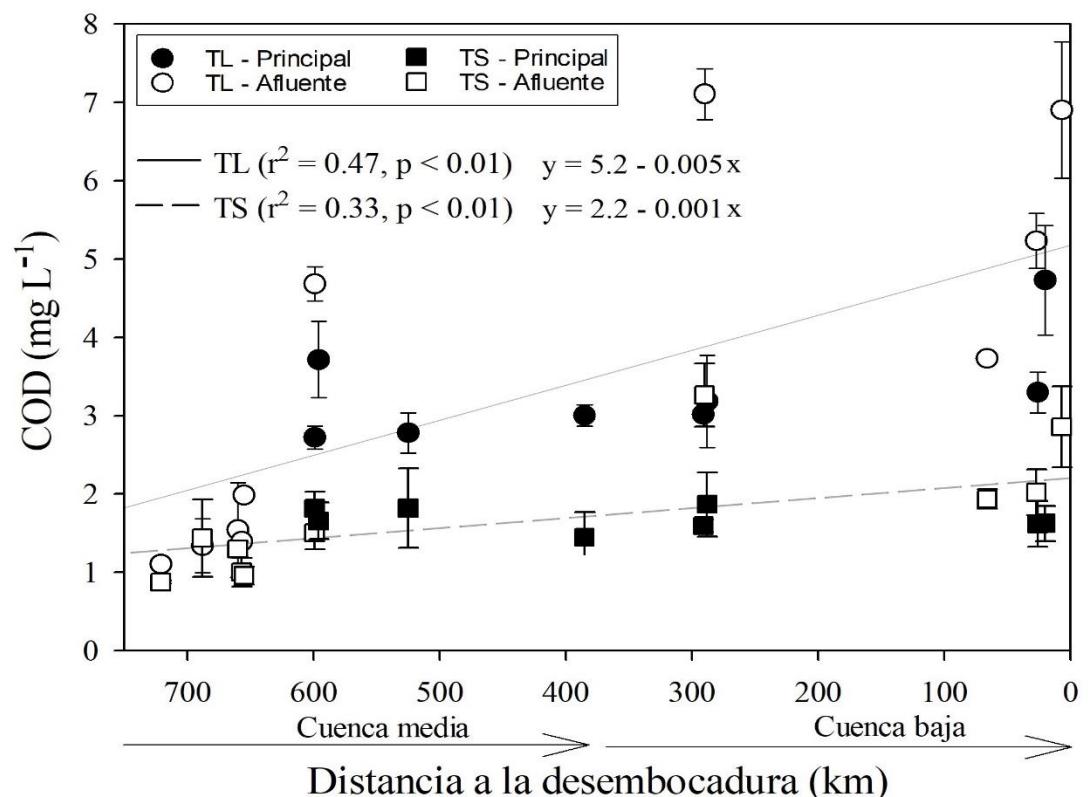
“variación longitudinal”



“variación hidrológica”

RESULTADOS: COD

H1: >TL

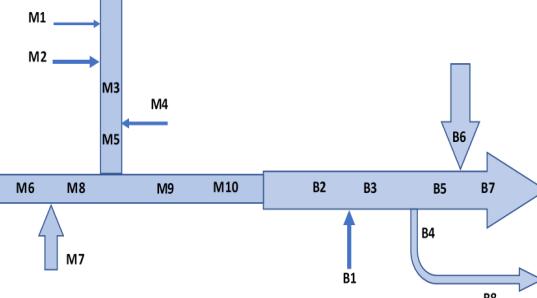


$$\bar{X} = 3.42 \pm 1.76 \text{ mg L}^{-1} (\text{TL})$$

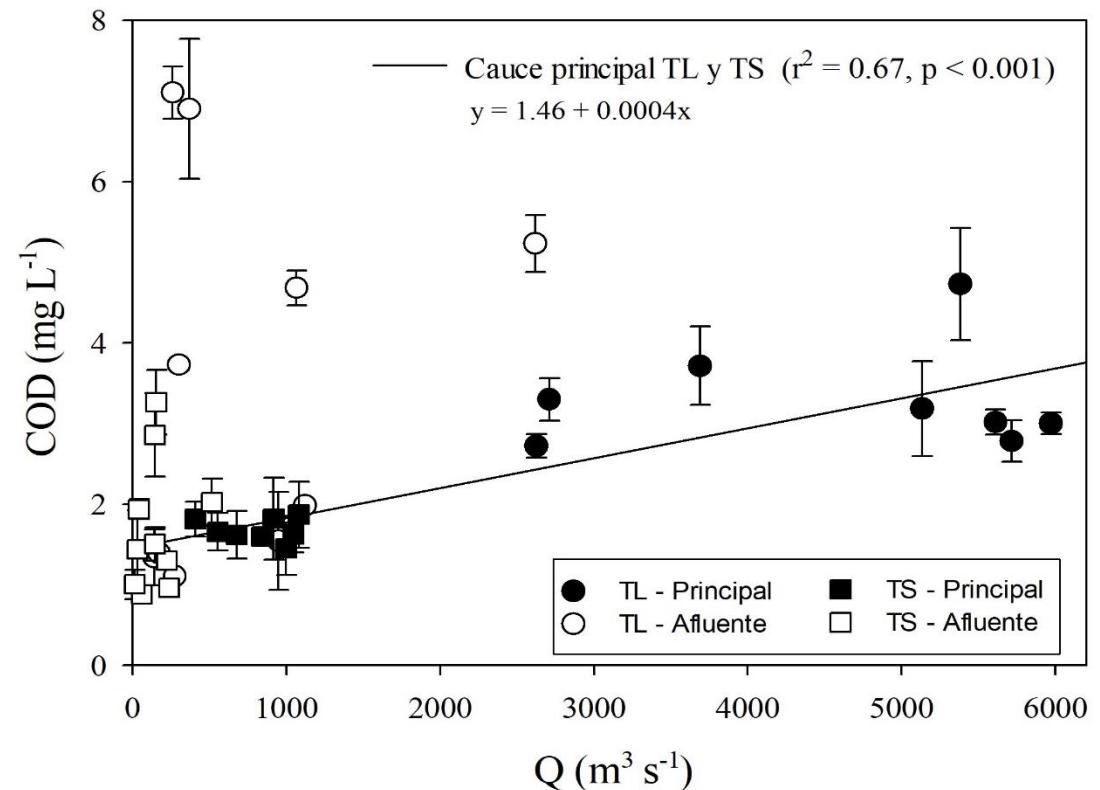
$$\bar{X} = 1.7 \pm 0.59 \text{ mg L}^{-1} (\text{TS})$$

$$\text{máx} = 7.11 \text{ mg L}^{-1} \quad \text{B1}$$

$$\text{mín} = 0.88 \text{ mg L}^{-1} \quad \text{M1}$$



“Flushing effect” COD alóctono



$\bar{X} = 3.42 \pm 1.76 \text{ mg L}^{-1} (\text{TL})$
 $\bar{X} = 1.7 \pm 0.59 \text{ mg L}^{-1} (\text{TS})$
 máx = 7.11 mg L⁻¹ B1
 mín = 0.88 mg L⁻¹ M1

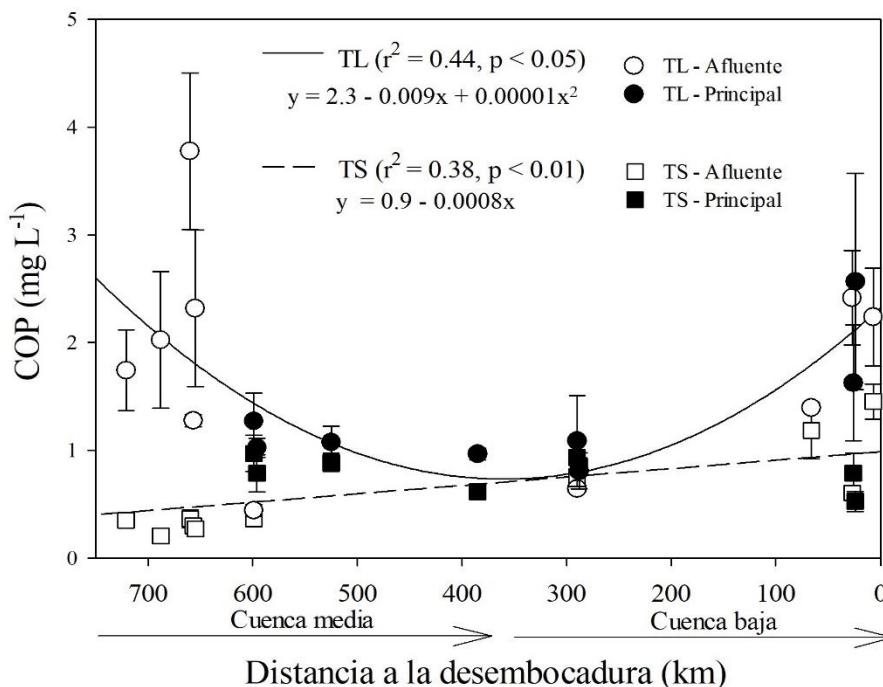
Global: ~5.75 mg L⁻¹
Sistemas kársticos: ~1 mg L⁻¹
 (Meybeck, 1982; 2006)

3.2 veces más COD en humedales
 (Harrison et al., 2005)

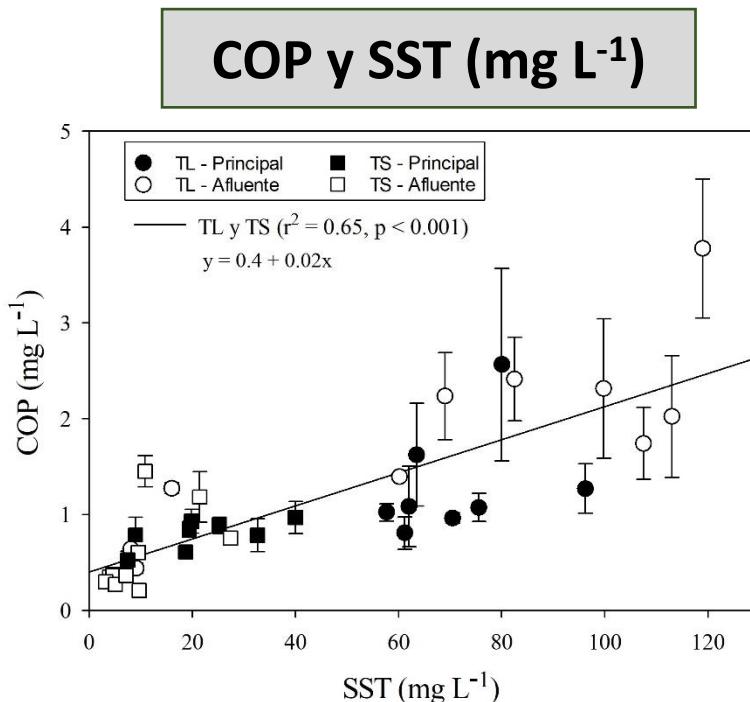
50% más COD en humedales
 (Tian et al., 2015)

RESULTADOS: COP

H1: >TL

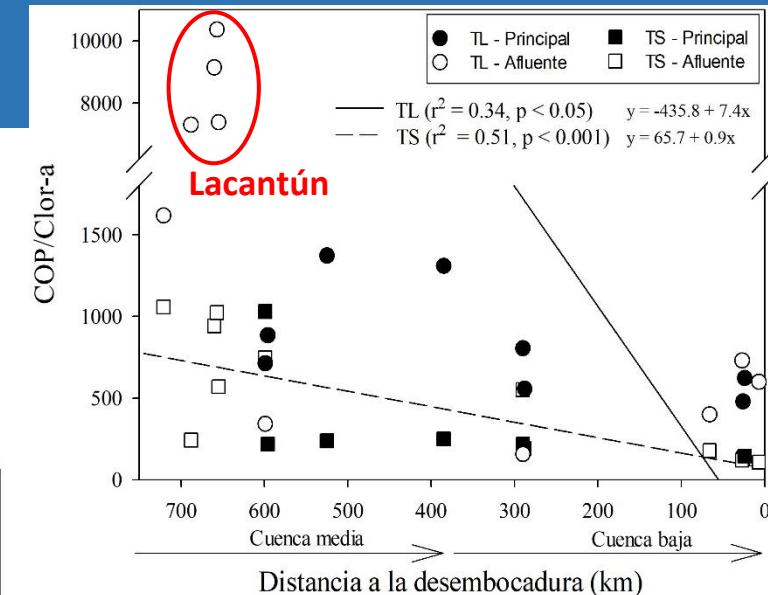


$\bar{X} = 1.59 \pm 0.85 \text{ mg L}^{-1}$ (TL)
 $\bar{X} = 0.68 \pm 0.34 \text{ mg L}^{-1}$ (TS)
 máx = 3.78 mg L^{-1} M5
 mín = 0.21 mg L^{-1} M2



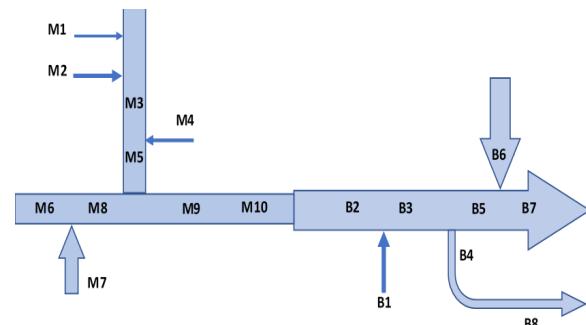
>Q >SST >COP (mg L^{-1})

(Meybeck, 2006)



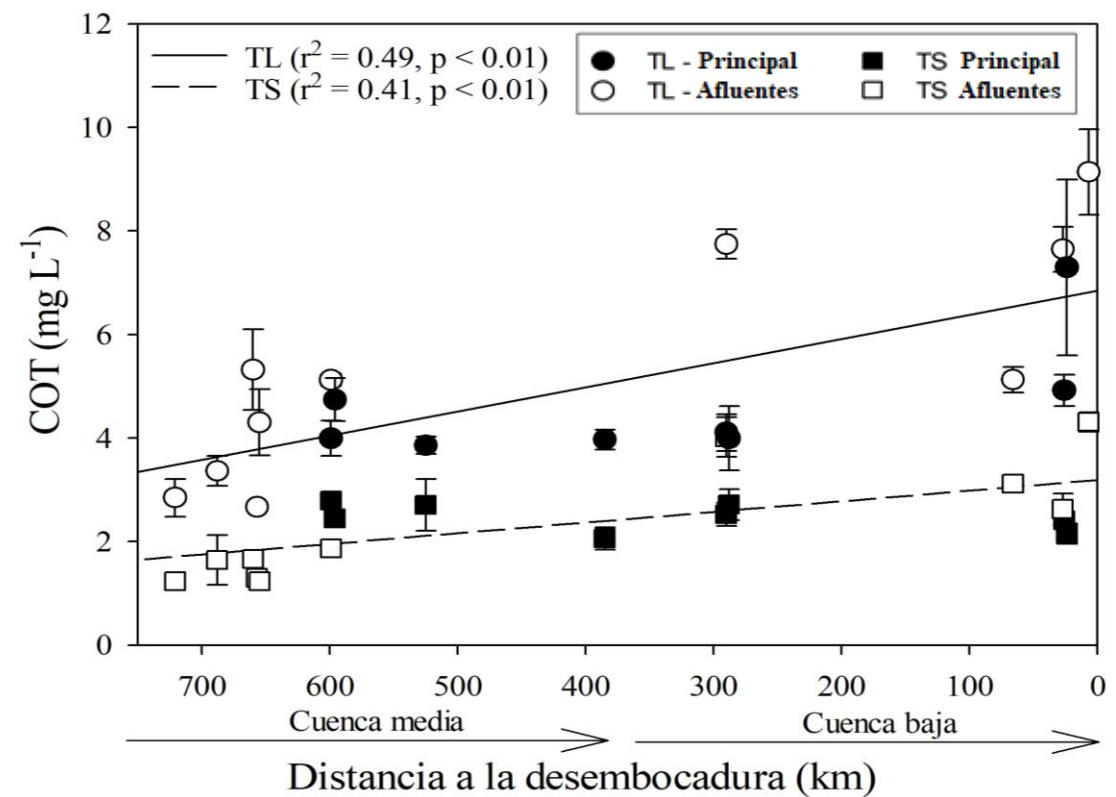
COP/Clor-a

COP/Clor-a (PP) ~50 (30-100)
 (Bouillon et al., 2009)



RESULTADOS: COT

H1: COD/COP>1

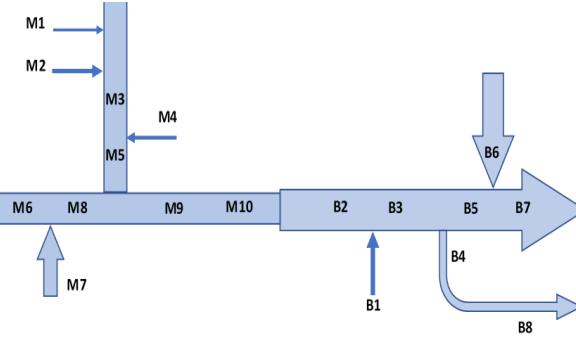


$$\bar{X} = 5.01 \pm 1.4 \text{ mg L}^{-1} (\text{TL})$$

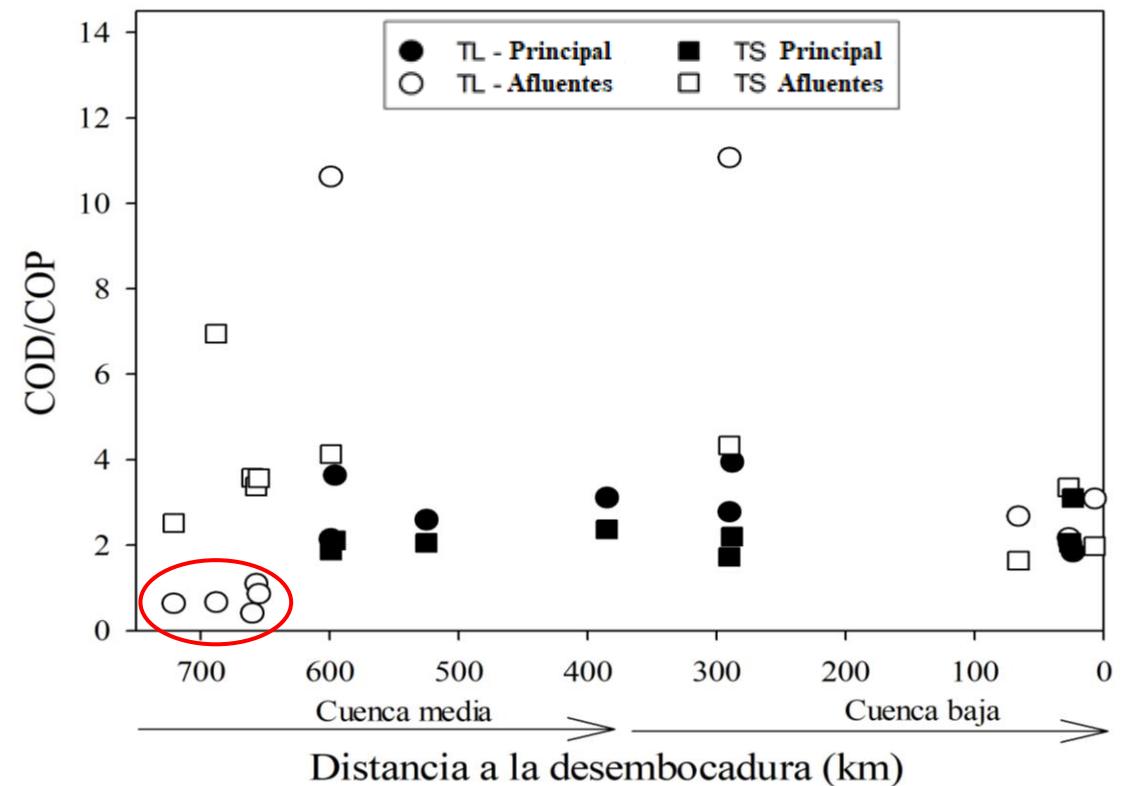
$$\bar{X} = 2.38 \pm 0.86 \text{ mg L}^{-1} (\text{TS})$$

$$\text{máx} = 9.14 \text{ mg L}^{-1} \quad \text{B8}$$

$$\text{mín} = 1.23 \text{ mg L}^{-1} \quad \text{M1}$$



COD/COP (mg L⁻¹)



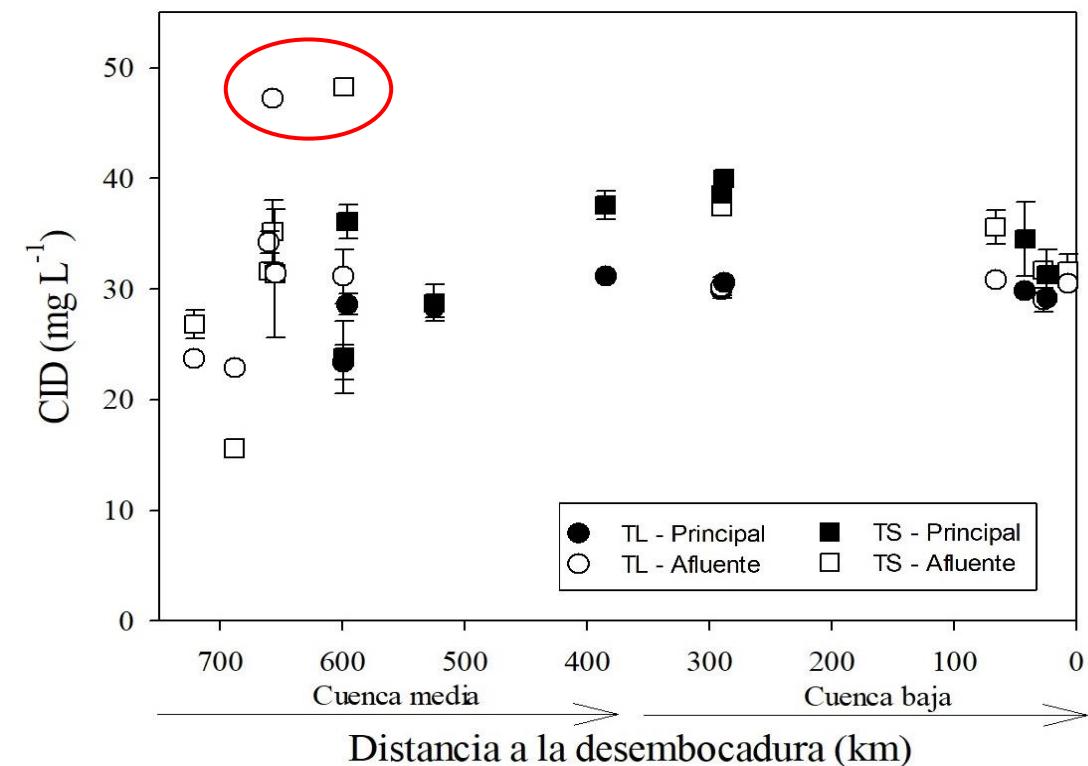
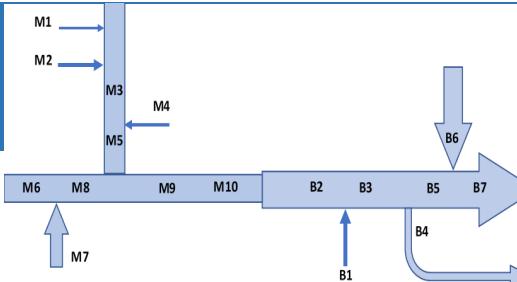
$$\bar{X} = 2.38 \pm 0.86 \text{ mg L}^{-1} (\text{TS})$$

máx = 9.14 mg L⁻¹ B8
 mín = 1.23 mg L⁻¹ M1

COD/COT < 50%
COD/COP < 1

M1, M2, M3,
M4, M5

RESULTADOS: CID



$\bar{X} = 30.1 \pm 5.2 \text{ mg L}^{-1}$ (TL)
 $\bar{X} = 33.1 \pm 7.0 \text{ mg L}^{-1}$ (TS)
 máx = 48.3 mg L⁻¹ M7
 mín = 15.6 mg L⁻¹ M2

Cuenca kárstica
 Efecto dilución
 P vs ET
 Agua subterránea

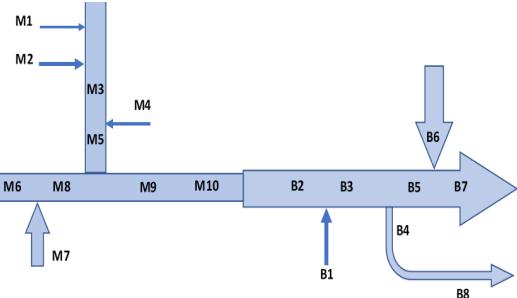
GEMS-GLORI (Meybeck y Ragu, 2012)

Usumacinta ~27.7 mg L⁻¹
Grijalva ~ 25.4 mg L⁻¹

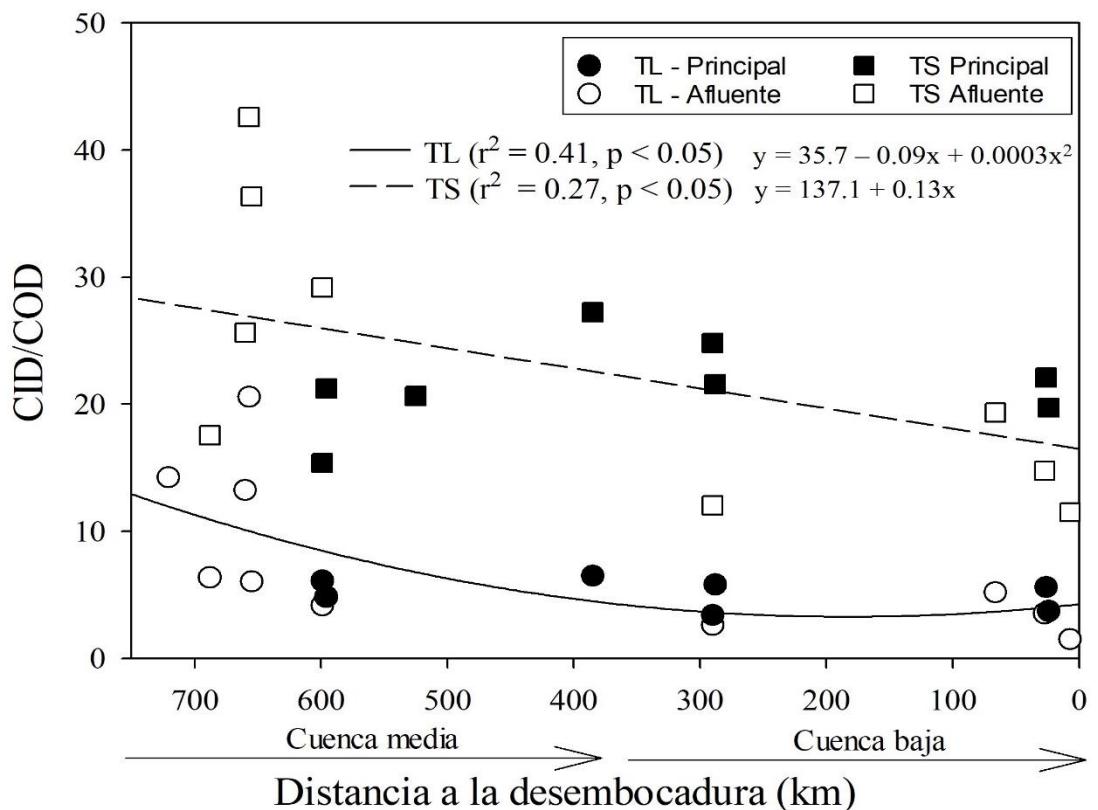
RÍO	CID (mg L ⁻¹)	Referencia
Danubio	37.4	Cai et al. (2008)
Huang He	31.1 (9.9 – 55.1)	Cai et al. (2008)
Mississippi	29.05 ± 5.76	Cai et al. (2015)
Usumacinta	31.6 ± 6.3	Este estudio
Godavari	25.87	Cai et al. (2008)
Amazonas	8 – 10	Moreira-Turcq et al. (2003)
América tropical	12.76	Huang et al. (2012)
Global	9.55	Meybeck, (2005)

CID Global: ~9.55 mg L⁻¹
CID Sistemas kársticos >25 mg L⁻¹
 (Meybeck, 1982; 2006)

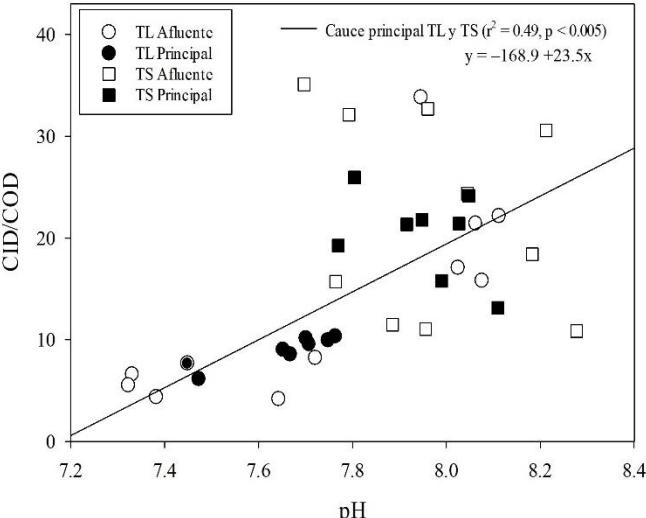
Proporción CID/COD



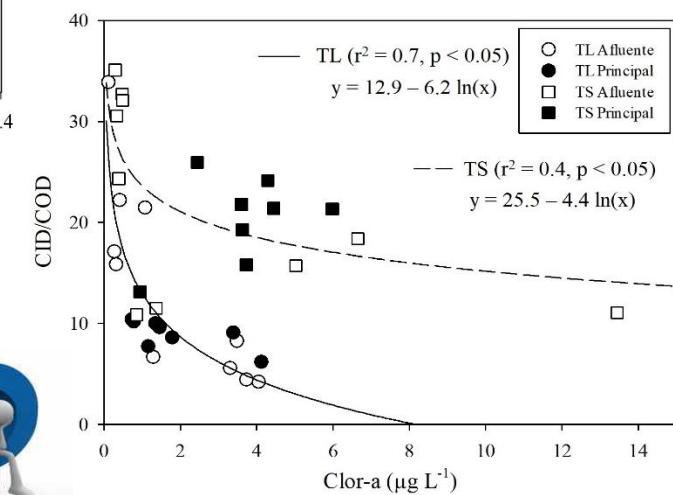
H1: CID/COD > TL
Cuenca media < CID/COD



>COD desembocadura
TL < CID



**IMPORTANCIA
CUENCA
CARBONATADAS**

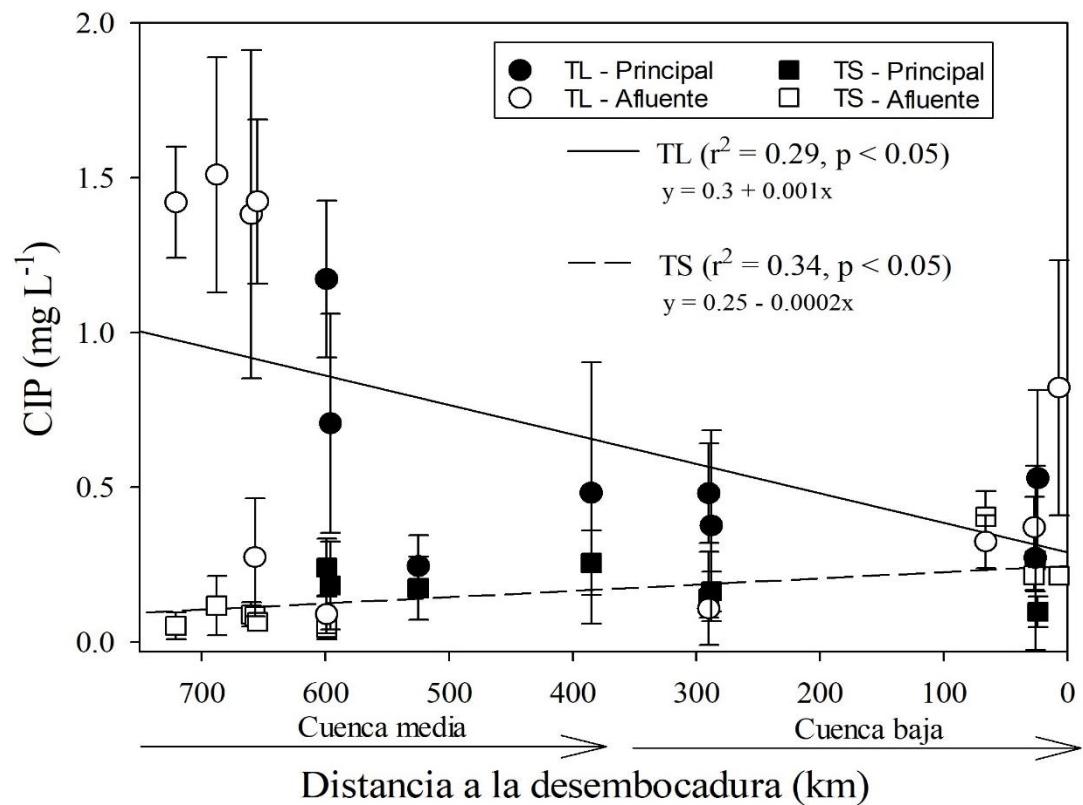
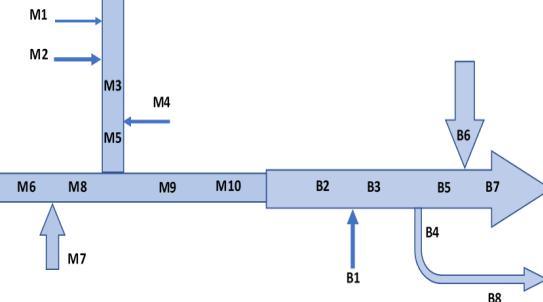


PP (Clor-a) > TS

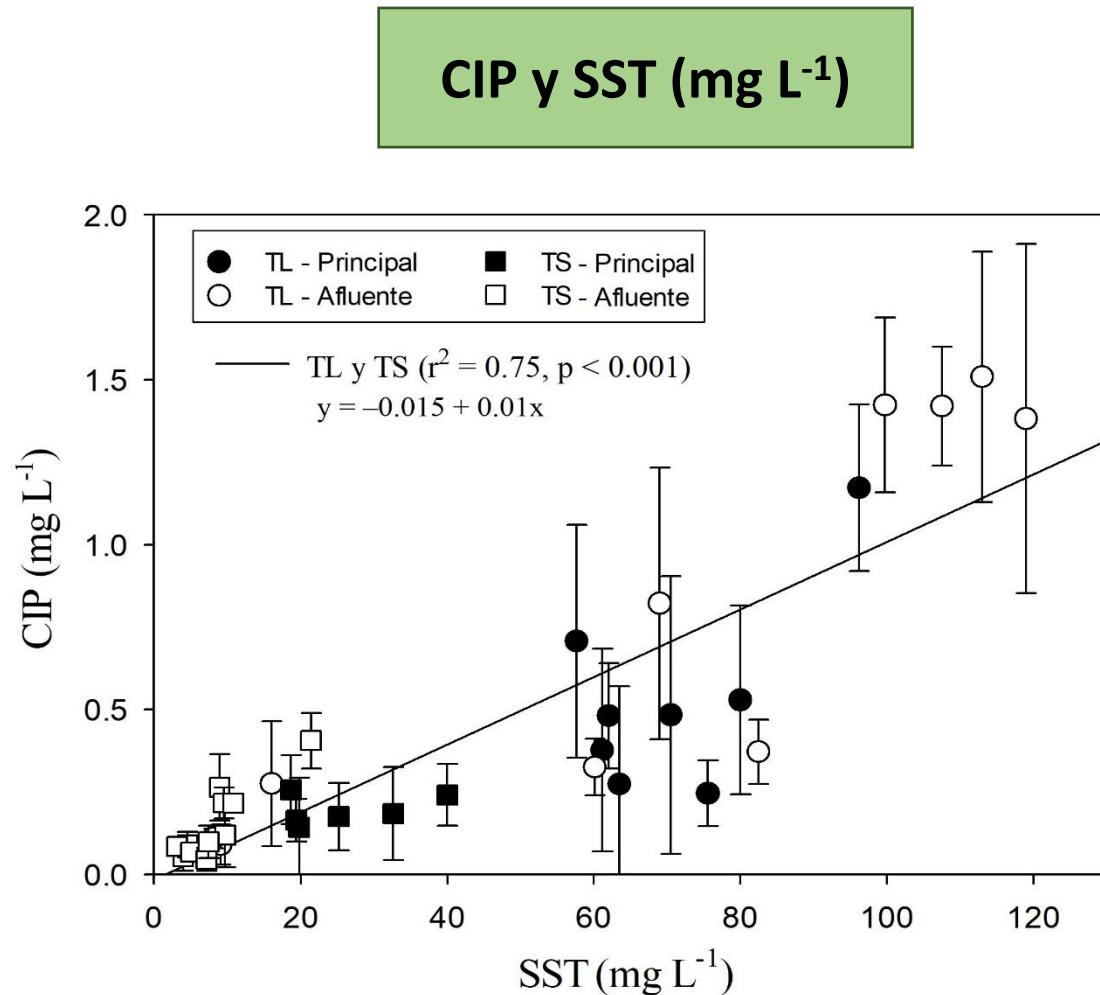


RESULTADOS: CIP

$$CIP = CTP - COP$$



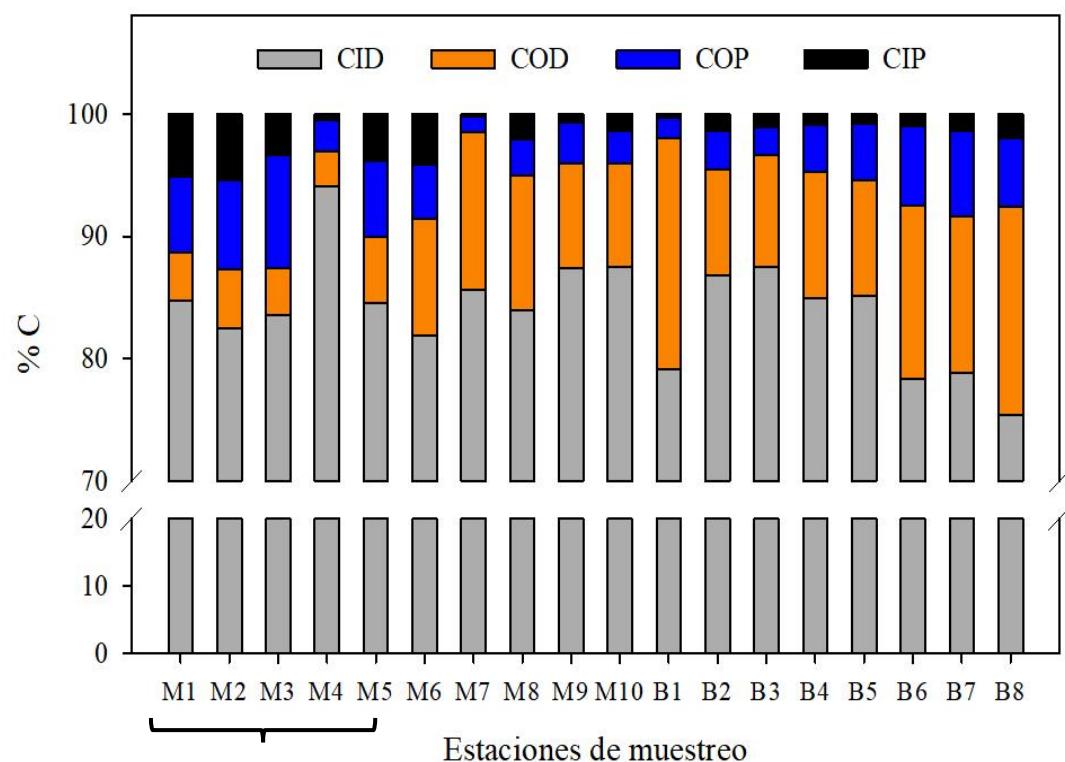
TL: $0.67 \pm 0.49 \text{ mg L}^{-1}$
 TS: $0.17 \pm 0.09 \text{ mg L}^{-1}$



RESULTADOS: CT

LLUVIAS

$35.8 \pm 5.2 \text{ mg L}^{-1}$



M1, M2, M3, M5

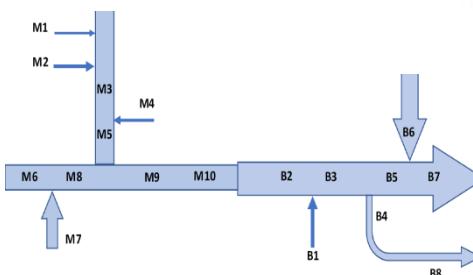
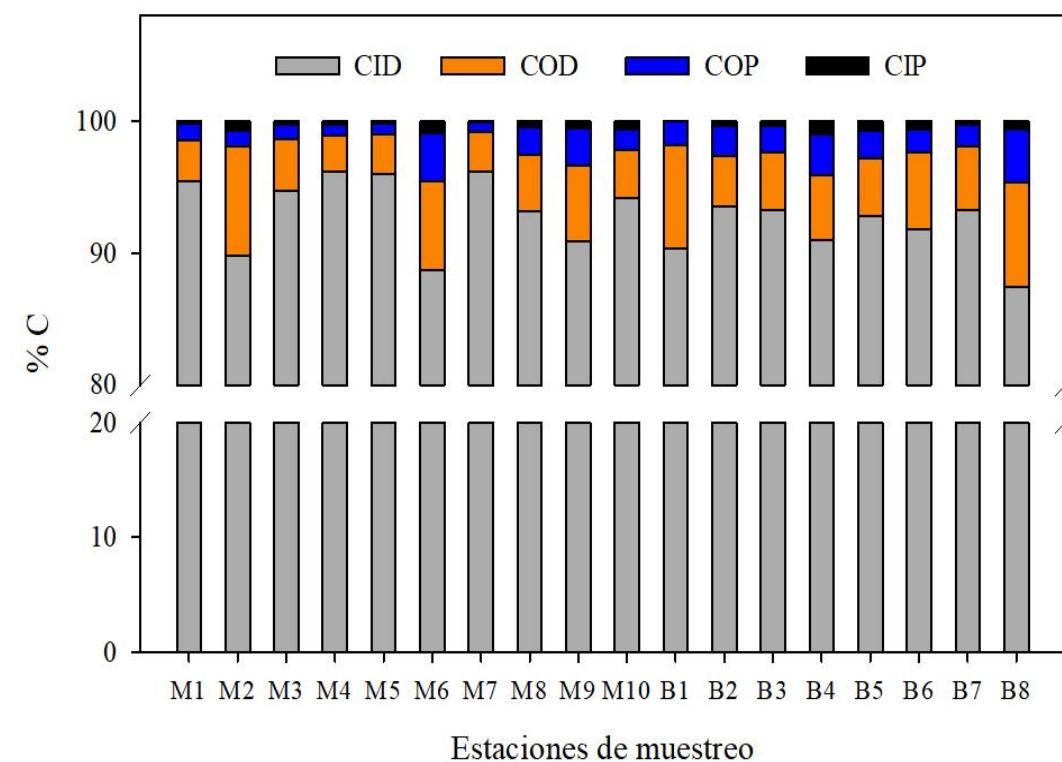
CID > COP > CIP > COD

CID > COD > COP > CIP

M4 ↑CID
B8 ↑COD

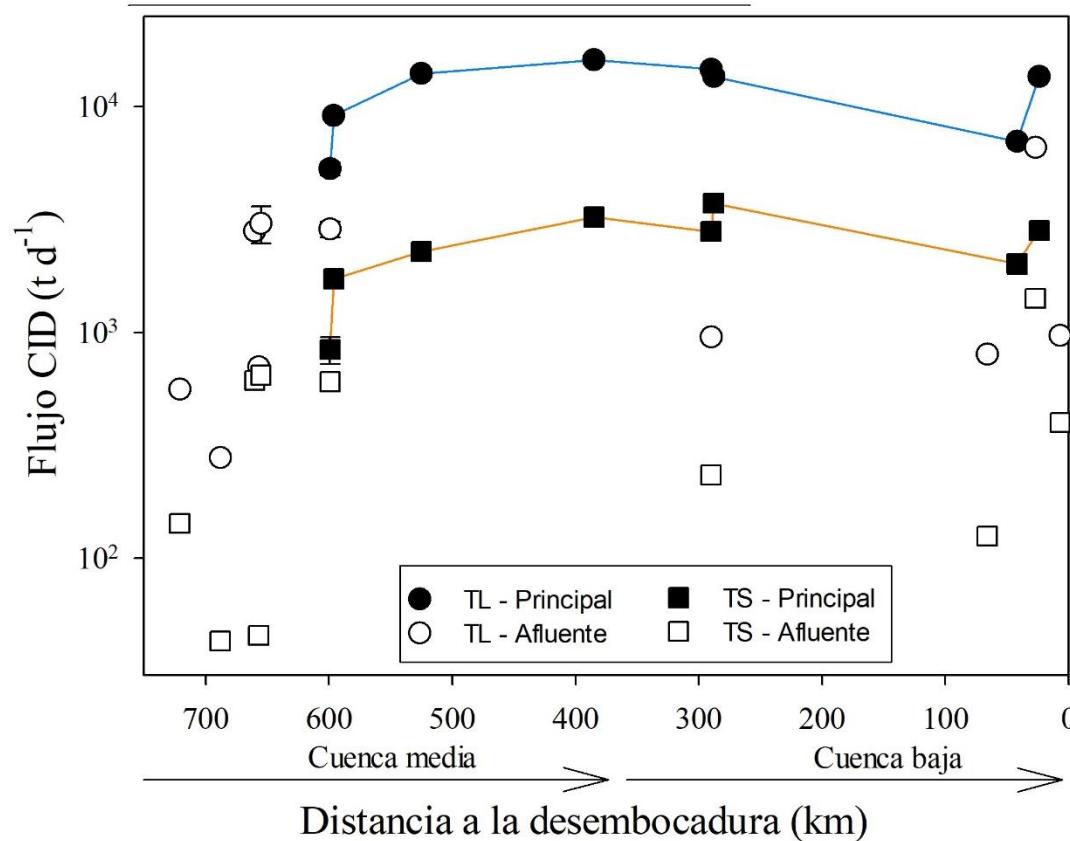
SECAS

$35.6 \pm 7.2 \text{ mg L}^{-1}$



RESULTADOS: FLUJO COT

H2: Transporte de C



Descarga final COT

B7 + B8
TL: $\sim 3,683 \pm 804 t\ d^{-1}$
TS: $\sim 248.7 \pm 19.8 t\ d^{-1}$



2.12. Concentración y flujo de carbono orgánico a lo largo del río Usumacinta, México

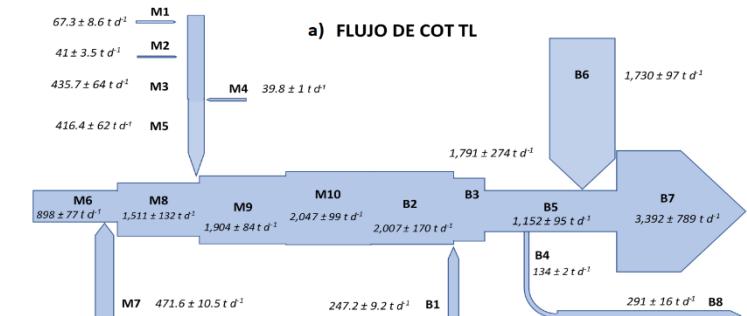
Soria-Reinoso Ismael¹; Alcocer Javier²; Oseguera Luis A.²; Cuevas-Lara Daniel¹ y Cortés Daniela¹

SUMIDERO de COT

M10 vs B5
TL: - 44%
TS: - 20%



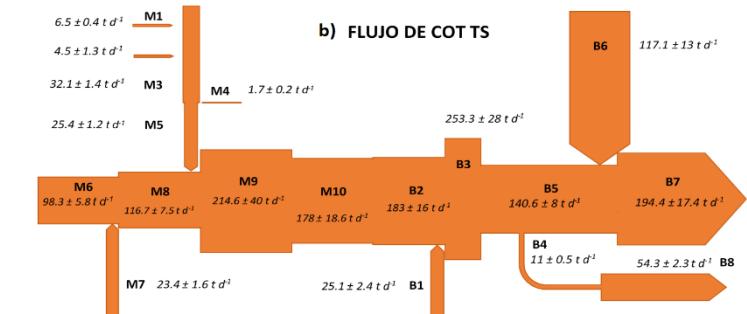
Sistema de Humedales: La Libertad, Catazajá y Pantanos de Centla



Aporte Grijalva

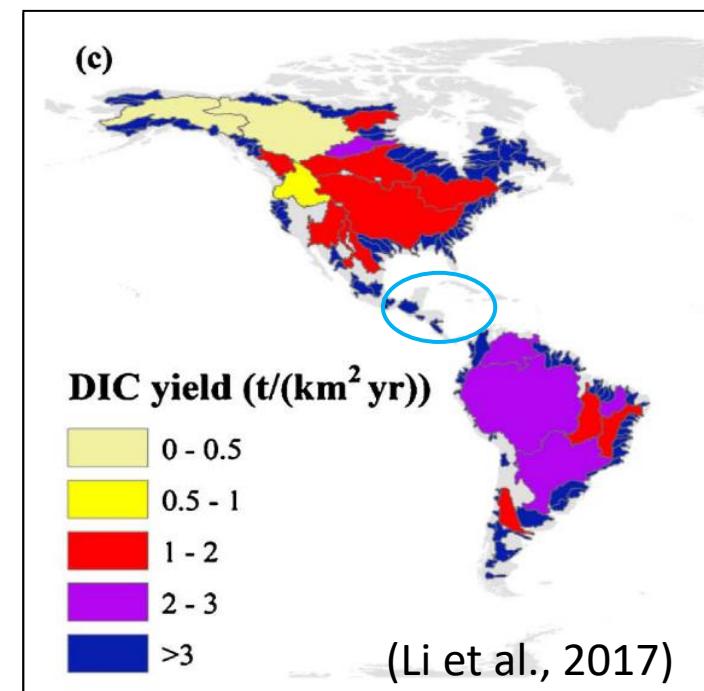
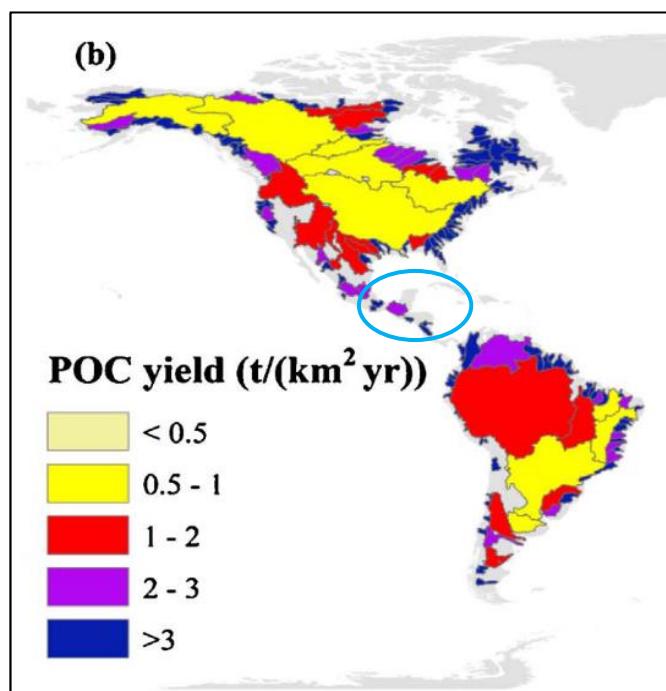
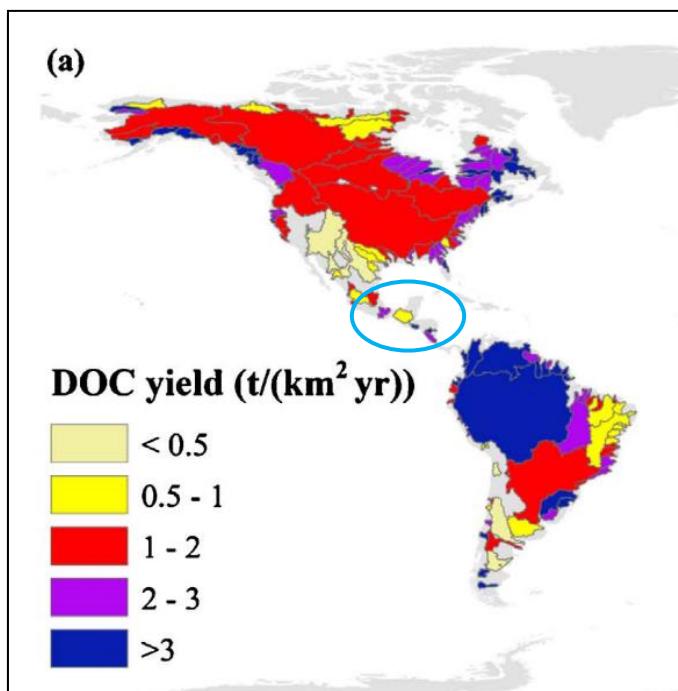
B6 vs B7
TL: + 66%
TS: + 27%

Mínimo COP en TS



RESULTADOS: Estimación Flujo Canual

	FLUJO DIARIO ($t\ d^{-1}$)				ESTIMACIÓN ANUAL				Li et al. (2017)	
	M10		B7 + B8		M10		B7 + B8		Tg $año^{-1}$	$t\ km^2\ año^{-1}$
	TL	TS	TL	TS	Tg $año^{-1}$	$t\ km^2\ año^{-1}$	Tg $año^{-1}$	$t\ km^2\ año^{-1}$	Tg $año^{-1}$	$t\ km^2\ año^{-1}$
FCOD	1,549	125	2,419	183	0.19	4.07 ± 0.31	0.28	1.72 ± 0.13	< 0.25	0.5 a 1.0
FCOP	498	53	1,264	66	0.07	1.4 ± 0.07	0.08 a 0.17	0.58 ± 0.03	0.25 a 0.5	2 a 3
FCOT	2,047	178	3,683	249	0.26	5.45 ± 0.32	0.36 a 0.45	2.31 ± 0.13		
FCID	16,073	3,240	14,528	3,229	2.70	57.7 ± 1.6	2.69	24.5 ± 0.7	> 2	> 3



Comparación del flujo y rendimiento de C del Usumacinta

Río	Área	Caudal	Flujo (Tg C año ⁻¹)			C total	Yield (t C km ² año ⁻¹)		
	10 ⁶ (km ²)	(km ³ año ⁻¹)	FCOD	FCOP	FCID		FCOD	FCOP	FCID
Usumacinta-Grijalva	0.112	120–147	0.29	0.08 a 0.17	2.61	3.06	1.72 ± 0.13	0.58 ± 0.03	24.5 ± 0.7
a Amazonas	6.30	6,223	26.9	13.2	29.4	69.5	5.8	5.5	4.3
b, c Congo	3.80	1,300	12.4	2.0	3.5	17.9	3.5	0.6	1.0
d, e Orinoco	1.10	1,135	5.0	1.7	5.7	12.4	4.8	1.6	5.5
f, g, p Mississippi	3.30	570	3.95	2.3	12.25	18.5	1.4	2.3	4.2
s, t, p Amarillo	0.75	15 (43)	0.06	0.41	1.05	1.52	0.1	0.54	1.632
h Irrawaddy	0.43	380 (430)	0.9	2.3 a 4.3	-	3.2 a 5.2	2.2	5.5 a 10.4	-
e, j, k Danube	0.79	210.0	0.6	-	7.5	8.1	1.2	7.7 a 12.6	9.6
d, e, l Zambezi	1.31	109.0	0.6	0.5	-	1.1	0.1 a 0.2	0.1	0.7
t, p Níger	1.2	152	0.53	0.66	1.24	2.43	0.6	0.5	0.56
d, i Godavari	0.31	92 (120)	0.76	0.28	2.27	3.31	-	-	8.0
k Maroni	0.07	63.7	0.34	0.11	-	0.4	5.6	1.9	-
j, m Senegal	0.27	24.4	0.1	0.1	-	0.2	0.2	0.1	-

^a(Moreira-Turcq et al., 2003); ^b(Coynel et al., 2005); ^c(Seyler et al., 2006); ^d(Gaillardet et al., 1999); ^e(Ludwig y Probst, 1996); ^f(Cai et al., 2015); ^g(Raymond et al., 2008); ^h(Bird et al., 2008); ⁱ(Sarin et al., 2002); ^j(Meybeck y Ragu, 2012); ^k(Gallay et al., 2018); ^l(Lambert et al., 2016); ^m(Mbaye et al., 2016); ^o(Geeraert et al., 2017); ^p(Cai et al., 2008); ^r(Milliman y Farnsworth, 2011); ^s(Ran et al., 2013)

CONCLUSIONES

Variabilidad de C

- CID** ($15.6 - 48.3 \text{ mg L}^{-1}$) > **COD** ($0.88 - 7.11 \text{ mg L}^{-1}$) > **COP** ($0.21 - 3.78 \text{ mg L}^{-1}$) > **CIP** ($0.05 - 1.51 \text{ mg L}^{-1}$)
- **CID**: sin variación longitudinal; ↑ en TS (P vs. ET).
 - **COD**: ↑ río abajo – humedales; ↑ en TL “flushing effect”; **COD vs Caudal**.
 - **COP**: ↑ en TL; tendencia temporal diferente; **COP vs SST**.
 - **COD/COP>1** (excepto en el Lacantún en TL); COD dominante.

↑ CID en América Tropical

Estimación anual (2017-2018)

- **3.06 Tg año⁻¹**
- FCID (85%) = **2.61 Tg año⁻¹**
FCOD (10%) = **0.29 Tg año⁻¹**
FCOP (4%) = **0.13 Tg año⁻¹**

Li et al. (2017); M10 vs. B7 + B8

HUMEDALES – LLANURAS DE INUNDACIÓN



SUMIDERO DE C
EMISOR CO₂

Relevancia de la variabilidad hidrológica

- Temp, OD, pH, K₂₅ mayor en secas; cuña salina en la TS.
Caudal 5 a 6 veces > lluvias, ↓ cuenca baja.
Aporte del río Grijalva 50% TL y 35% TS.
SST > TL, flujos hiper-concentrados y turbios.
Clor-a > TS e incremento río abajo.



AGRADECIMIENTO FINAL

Proyecto FORDECYT-CONACYT 273646

“Fortalecimiento de las capacidades científicas y tecnológicas para la gestión territorial sustentable de la Cuenca del Río Usumacinta y su Zona Marina de Influencia (CRUZMI), así como su adaptación ante el cambio climático”



PAPIIT IN216818

“Flujos de carbono, nutrientes y sedimentos en un sistema lótico tropical”



**Fundación Natura y Ecosistemas
Mexicanos AC (Estación Biológica Chajul)**



Gracias



BIBLIOGRAFÍA

- Abril, G., & Borges, A. V. (2019). Ideas and perspectives: Carbon leaks from flooded land: do we need to replumb the inland water active pipe? *Biogeosciences*, 16(3), 769–784. <https://doi.org/10.5194/bg-16-769-2019>
- Benke, A. C., & Cushing, C. E. (2009). Rivers of North America. In *Encyclopedia of Inland Waters* (Ed. Elsevi, pp. 425–437).
- Butman, D., Striegl, R. G., Stackpoole, S. M., Del Giorgio, P. A., Prairie, Y. T., Pilcher, D., ... Alcocer, J. (2018). Inland Waters. In N. Cavallaro, G. Shrestha, R. Birdsey, M. Mayes, R. Najar, S. C. Reed, ... Z. Zhu (Eds.), *Second State of the Carbon Cycle Report (SOCCR2): A Sustained Assessment Report* (pp. 568–595). Washington, DC, USA,: U.S. Global Change Research Program. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/B978-012370626-3.00001-6>
- Cole, J. J., Prairie, Y. T., Caraco, N. F., McDowell, W. H., Tranvik, L. J., Striegl, R. G., ... Melack, J. (2007). Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. *Ecosystems*, 10, 171–184. <https://doi.org/10.1007/s10021-006-9013-8>
- Friedlingstein, P., Jones, M. W., O'Sullivan, M., Andrew, R. M., Hauck, J., Peters, G. P., ... Zaehle, S. (2019). Global carbon budget 2019. *Earth System Science Data*, 11(4), 1783–1838. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1783-2019>
- Huang, T.-H., Fu, Y.-H., & Pan, P.-Y. (2012). Fluvial carbon fluxes in tropical rivers. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4(2), 162–169. <https://doi.org/10.1016/J.COSUST.2012.02.004>
- Li, M., Peng, C., Wang, M., Xue, W., Zhang, K., Wang, K., ... Zhu, Q. (2017). The carbon flux of global rivers: A re-evaluation of amount and spatial patterns. *Ecological Indicators*, 80, 40–51. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.04.049>
- Mbaye, M. L., Gaye, A. T., Spitz, A., Dähnke, K., Afouda, A., & Gaye, B. (2016). Seasonal and spatial variation in suspended matter, organic carbon, nitrogen, and nutrient concentrations of the Senegal River in West Africa. *Limnologica*, 57, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2015.12.003>
- Meybeck, M. (1982). Carbon, nitrogen, and phosphorus transport by world rivers. *American Journal of Science*, 282(4), 401–450. <https://doi.org/10.2475/ajs.282.4.401>
- Meybeck, M. (2006). Origins and Behaviors of Carbon Species in World Rivers. In E. J. Roose, R. Lal, C. Feller, B. Barthes, & B. A. Stewart (Eds.), *Soil erosion and carbon dynamics* (pp. 209–235). New York: Taylor & Francis Group, LLC.
- Muñoz-Salinas, E., Castillo, M., Sanderson, D., Kinnaird, T., & Cruz-Zaragoza, E. (2016). Using three different approaches of OSL for the study of young fluvial sediments at the coastal plain of the Usumacinta – Grijalva River Basin , southern Mexico. *EARTH SURFACE PROCESSES AND LANDFORMS*, 834(January), 823–834. <https://doi.org/10.1002/esp.3880>
- Soares, D., & García, A. (2017). *La cuenca del río usumacinta desde la perspectiva del cambio climático*. (M. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Ed.) (Primera ed).
- Vachon, D., Sponseller, R., & Karlsson, J. (2020). Integrating carbon emission, accumulation, and transport in inland waters to understand their role in the global carbon cycle. *Global Change Biology*. <https://doi.org/10.1111/gcb.15448>