

Ciencia e Ingeniería

Revista Interdisciplinaria de Estudios en Ciencias

Básicas e Ingenierías

ISSN 2389-9484

Año 2026, enero-junio, Vol. 13, N.º 1, e17773047

Facultades de Ciencias Básicas y Aplicadas e Ingeniería.

Universidad de La Guajira

La Guajira, Riohacha, Colombia

<http://revistas.uniguajira.edu.co/index.php/cei>

Este documento fue depositado en Zenodo. DOI:

<https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17773047>ARK: <https://n2t.net/ark:/60540/17773047>**Aristide Márquez***<https://orcid.org/0000-0003-1426-5264>

aristd@gmail.com

Universidad de Oriente, Cumaná, Venezuela

Joselyn Acosta Núñez<https://orcid.org/0009-0002-5358-2940>

joselynmilagros22@gmail.com

Universidad de Oriente, Cumaná, Venezuela

FUENTES Y SUMIDEROS DE FÓSFORO EN EL SISTEMA FLUVIAL RÍO ORINOCO-LAGUNA DE CASTILLERO, VENEZUELA

Phosphorus sources and sinks in the Orinoco River system- Castellero lagoon, Venezuela

RESUMEN

Se investigó la geoquímica del fósforo (P) y la capacidad de los sedimentos del río Orinoco y de la laguna de Castellero (Venezuela) para actuar como fuentes o sumideros de P. Se midieron propiedades fisicoquímicas del agua y se caracterizó la especiación del P en sedimentos mediante un esquema de extracción secuencial SEDEX. En los sedimentos del río Orinoco las fracciones promedio ($\mu\text{g g}^{-1}$) fueron: fósforo detrítico 79,11; fósforo orgánico 17,27; P adsorbido a óxidos de Fe 4,78; P autigénico 3,19. En la laguna de Castellero las mismas fracciones mostraron mayores concentraciones: fósforo detrítico 154,25; fósforo orgánico 70,82; P autigénico 5,78; P adsorbido a óxidos de Fe 4,81. Los sedimentos del Orinoco están dominados por fracciones inorgánicas poco móviles, lo que se relaciona con baja biodisponibilidad (PBD = $22,05 \mu\text{g g}^{-1}$) y relación N:P elevada (16,22). En la laguna de Castellero, la mayor proporción de fracciones lábiles y materia orgánica resultó en mayor biodisponibilidad (PBD = $75,63 \mu\text{g g}^{-1}$) y relación N:P baja (5,46), sugiriendo un mayor potencial de eutrofización. Se concluye que el Orinoco funciona como sumidero geoquímico, mientras que Castellero representa un reservorio con capacidad de liberar P bajo condiciones favorables.

Palabras clave: fósforo, especiación, sedimentos, fuentes y sumideros.

ABSTRACT

This study examined the geochemistry of phosphorus (P) and the capacity of sediments from the Orinoco River and the Castellero Lagoon (Venezuela) to act as sources or sinks of P. Physicochemical properties of the water column were measured, and sedimentary P speciation was characterized using a SEDEX-type sequential extraction. In Orinoco River sediments, mean concentrations ($\mu\text{g g}^{-1}$) were: detrital P 79.11, organic P 17.27, Fe-bound P 4.78, and authigenic P 3.19. Castellero Lagoon sediments showed higher values for the same fractions: detrital P 154.25, organic P 70.82, authigenic P 5.78, and Fe-bound P 4.81. Orinoco sediments were dominated by low-reactivity inorganic fractions, resulting in low bioavailable phosphorus (PBD = $22.05 \mu\text{g g}^{-1}$) and a high N:P molar ratio (16.22). In contrast, Castellero Lagoon exhibited higher proportions of labile fractions and organic matter, leading to greater P bioavailability (PBD = $75.63 \mu\text{g g}^{-1}$) and a lower N:P ratio (5.46), suggesting increased eutrophication potential. Overall, the Orinoco River functions primarily as a geochemical sink for phosphorus, whereas the Castellero Lagoon acts as a reservoir capable of releasing P to the water column under favorable environmental conditions.

Keywords: phosphorus, speciation, sediments, sources and sinks.

Recibido: 07-09-2025

Aceptado: 01-12-2025

Publicado: 02-01-2026



INTRODUCCIÓN

El fósforo (P) es un nutriente esencial que en ecosistemas acuáticos controla la producción primaria y la estructura trófica, especialmente en regiones tropicales donde la disponibilidad de nutrientes puede modular de forma crítica los flujos biogeoquímicos (Liu et al., 2025). En sistemas lóticos y lénticos su comportamiento depende de procesos físico-químicos y biológicos que regulan su transferencia entre la columna de agua y los sedimentos, incluyendo adsorción, mineralización, precipitación, complejación con metales y degradación de materia orgánica (Cavalcante et al., 2018; Matula y Wojtkowska, 2025; Moura et al., 2020, Oh y Choi, 2023; Sutula et al., 2004). Pequeñas variaciones en la disponibilidad de P pueden desencadenar transiciones hacia estados eutróficos, particularmente en ambientes con alta carga orgánica y limitada renovación del agua (Oh y Choi, 2023).

Desde el punto de vista geoquímico, la especiación del fósforo en sedimentos es un indicador clave para evaluar su movilidad potencial y su capacidad para actuar como fuente o sumidero. El método secuencial SEDEX desarrollado por Ruttenberg (1992) y modificado posteriormente por Anderson y Delaney (2000) permite separar fracciones operacionales detrítica, adsorbida a óxidos de Fe, autigénica y orgánica proporcionando información esencial sobre la estabilidad relativa de cada una bajo condiciones ambientales variables. Estudios posteriores destacan que la interacción entre P y óxidos de Fe es particularmente relevante en ambientes con fluctuaciones redox, donde la reducción del Fe (III) puede conducir a la liberación de P anteriormente inmovilizado (Bhattacharya et al., 2022; Moura et al., 2020; Xu et al., 2023, Yang et al., 2024a).

En ambientes tropicales, donde coexisten sistemas altamente dinámicos como ríos de gran caudal y cuerpos lagunares con elevada retención hidráulica, las diferencias en hidrodinámica, granulometría y contenido de materia orgánica pueden generar patrones muy contrastantes en la distribución y movilidad del P (Falk et al., 2023; Li et al., 2023, Lin et al., 2021). En cuencas tropicales de Sudamérica las investigaciones muestran que los ríos con fuerte influencia terrígena tienden a estar dominados por fracciones inorgánicas poco reactivas, mientras que las lagunas conectadas actúan como zonas de acumulación y transformación del fósforo, favoreciendo la presencia de fracciones más lábiles y biogeoquímicamente activas (Lewis et al., 2000; Mora et al., 2017; Shen et al., 2023; Wetzel, 2001).

No obstante, para el sistema fluvial río Orinoco–laguna de Castillero existe escasa información publicada sobre la especiación del P en sedimentos y sobre la capacidad relativa de ambos sistemas para actuar como sumideros o fuentes. Esta ausencia limita la comprensión del funcionamiento biogeoquímico regional, particularmente en relación con procesos de regeneración interna, retención geoquímica y riesgo de eutrofización en cuerpos de agua tropicales interconectados. El objetivo de esta investigación fue evaluar, mediante análisis físicoquímicos del agua y la especiación del fósforo en sedimentos (SEDEX), la capacidad del río Orinoco y de la laguna de Castillero para comportarse como fuentes o sumideros de P. La hipótesis se sustenta en que las diferencias hidrodinámicas entre un sistema lótico de gran descarga y un sistema léntico de alta retención hidráulica generan patrones contrastantes de especiación y biodisponibilidad del fósforo: predominio de fracciones inorgánicas poco móviles en el río y mayor proporción de fracciones lábiles en la laguna.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en dos ambientes contrastantes de la cuenca del medio Orinoco (Figura 1). El río Orinoco, un sistema lótico de gran tamaño y longitud característico de Sudamérica, presenta un régimen hidrológico fuertemente influenciado por pulsos estacionales de inundación. En contraste, la laguna de Castillero es un sistema léntico que se llena y drena principalmente por inundaciones de origen pluvial. Aunque ambos comparten ciertos procesos, difieren notablemente en su escala espacial y temporal (Márquez y Lemus, 2020; Milliman y Meade, 1983; Vásquez y Wilberth, 1992). La laguna de Castillero, por otra parte, ocupa una planicie de cota inferior a los 60 msnm y un área estimada de 140 ha, está localizada ($66^{\circ} 08'17''$ W y $7^{\circ}38'15''$ N) cerca de Caicara del Orinoco (Estado Bolívar), y presenta baja energía hidráulica y alta retención de sedimentos finos (Márquez et al., 2008).

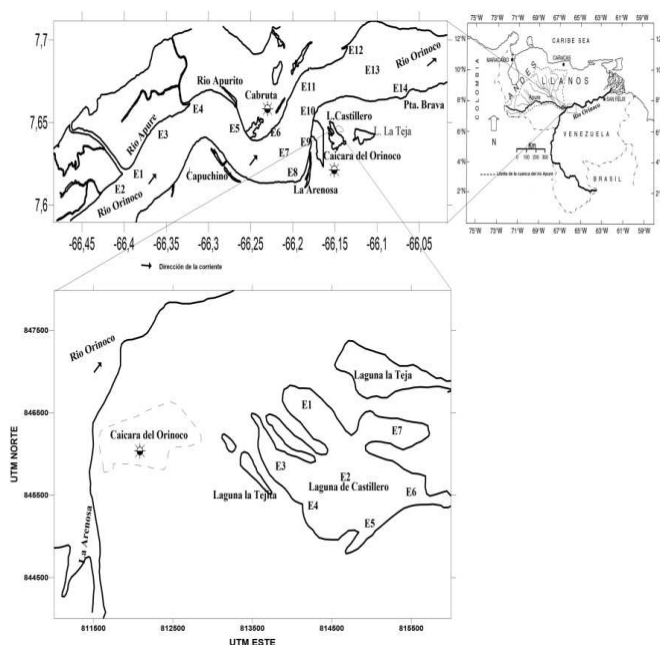


Figura 1. Área de estudio mostrando los sitios de muestreos en el Río Orinoco y la laguna de Castillero.

Diseño de muestreo y recolección

Se seleccionaron 14 estaciones en el río Orinoco y 7 en la laguna de Castillero durante la temporada de aguas bajas (febrero 2017). En cada estación se recolectaron muestras de agua superficial (1 L) y sedimento superficial (0-5 cm) mediante draga de acero inoxidable tipo Diez Laffont (área: 0,02 m²). Las muestras fueron transportadas en condiciones refrigeradas para su posterior análisis en laboratorio.

Análisis fisicoquímico del agua

En campo se midieron el pH y el oxígeno disuelto (O₂) con una sonda multiparamétrica Hidrolab modelo Data Sonde 4, confirmandose después O₂ por el Método de Winkler (Aminot y Chaussepied, 1983). Los sólidos suspendidos (SS) se determinaron por método gravimétrico, los nitritos por Bendschneider y Robinson (1952) a 543 nm, nitrato (NO₃⁻) por Treguer y Le Corre (1975), y amonio (NH₄⁺) por Koroleff (1976) a una longitud de onda de 640 nm. Estas técnicas se detallan en Strickland y Parsons (1972) y

APHA (1995). La determinación de NT y PT se realizó por Valderrama (1981) y Murphy y Riley (1962). La cuantificación de los nutrientes se hizo en autoanalizador Technicon II AC.

Análisis del sedimento

Se determinaron granulometría por tamizado e hidrómetro (Folk 1974; Primo y Carrasco 1973; Roa y Berthois 1975), materia orgánica total (MOT) por ignición a 550 °C (González y Ramírez, 1995), carbono orgánico total (COT) por el método de Walkley y Black (1934), carbonatos por titulación ácido-base (Vogel, 1960), nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT) por Valderrama (1981) y Murphy y Riley (1962). Las concentraciones se cuantificaron por autoanalizador Technicon II. El hierro (Fe) se hizo por extracción con ácido acético al 25 % y cuantificación por espectrofotometría de absorción atómica con llama de aire acetileno y corrector de fondo de deuterio en un equipo Perkin Elmer 3110 (Lewis y Landing, 1992). La especiación del fósforo se realizó mediante el método SEDEX (Ruttenberg, 1992) modificado por Anderson y Delaney (2000), extrayendo las fracciones: fósforo adsorbido a Fe (P-Ad+Fe), fósforo autigénico o ligado Ca (P-Ca) o, fósforo detrítico (P-D) y fósforo orgánico (P-O). El fósforo inorgánico (PI) expresado por la sumatoria de las fracciones inorgánicas y el biodisponible como fósforo adsorbido a hierro (P-Ad+Fe) + P-O (fósforo orgánico).

Evaluación del riesgo de liberación del fósforo

Se calculó el índice de enriquecimiento de fósforo (IEP) con la Ec.1 (Barik et al., 2019; Wang et al., 2013).

$$IEP = \frac{C_i}{C_s} \quad (\text{Ec.1})$$

Donde, C_i representa la concentración de PT de la muestra i ($\mu\text{g g}^{-1}$), y C_s es la concentración estándar de PT ($\mu\text{g g}^{-1}$) que potencialmente podría causar un riesgo ecológico, establecida en $600 \mu\text{g g}^{-1}$ (Barik et al., 2019; Zhang et al., 2016), considerando los criterios de evaluación de calidad de sedimentos del Departamento de Medio Ambiente y Energía (DOEE), Canadá (Mudroch y Azcue 1995). El criterio utilizado fue; cuando $PEI > 1$ hay riesgo de liberación de P desde los sedimentos.

Análisis estadístico

Los datos se estandarizaron (z-score) y se aplicaron análisis multivariados: análisis de componentes principales (ACP) para identificar asociaciones entre los parámetros y gradientes estructurales espaciales para la clasificación de las zonas críticas de acumulación, movilización o estabilidad del fósforo (Jolliffe y Cadima, 2016); MDS (escalamiento multidimensional) y ANOSIM (análisis de similitudes) que empleó 9999 permutaciones para evaluar disimilitud entre ecosistemas y SIMPER (análisis de porcentajes de similitud) para determinar variables que más contribuyen a la diferenciación (Clarke y Warwick, 2001). Se utilizó XLStat acoplado a Excel y PAST 4.17.

Clasificación funcional

Esta clasificación se sustentó en la asignación de las estaciones al plano factorial ($F1 \times F2$) de los ACP y principios de especiación geoquímica del fósforo, su reactividad frente a condiciones ambientales (pH, oxígeno disuelto, redox) y su integración con los procesos tamaño del grano, mineralización orgánica o precipitación cálcica (Kleeberg y Kozerski, 1997; Søndergaard et al., 2001 y 2003).

RESULTADOS

Las variables fisicoquímicas de la columna de agua mostraron contrastes marcados entre ambos sistemas. El río Orinoco presentó mayores concentraciones de sólidos suspendidos y mayor variabilidad espacial asociada al transporte particulado, mientras que la laguna de Castillero exhibió condiciones más homogéneas y menor variabilidad interna. El oxígeno disuelto fue ligeramente superior en el río que en la laguna, y las formas oxidadas de nitrógeno (NOx) predominaron sobre el amonio (NH_4^+) en ambos sistemas, con concentraciones más altas y variables en el río. Aunque el fósforo total (PT) en agua fue más alto en el río, presentó una alta variación ligada al transporte particulado ($r > 0,90$). La relación molar N/P promedio fue similar en ambos sistemas (~ 19), sugiriendo una posible co-limitación por N y P (Tabla 1).

Tabla.1 Valores de O_2 (mg L^{-1}), pH, SS (mg L^{-1}), NOx, NT; PO_4^{3-} , PT ($\mu\text{mol L}^{-1}$) y relación N/P en el río y la laguna de Castillero

	E	SS	O_2	pH	Nox	NH_4^+	NT	PO_4^{3-}	PT	N/P
R. Orinoco	1	203,5	6,46	7,46	18,69	0,04	46,69	1,75	3,18	14,68
	2	51,16	7,41	7,41	18	0,08	43,56	1,43	2,12	20,55
	3	202,67	7,03	7,03	19,01	0,11	45,32	1,38	1,58	28,68
	4	46	8,21	7,76	18,23	0,08	40,18	1,37	2,57	15,63
	5	35,5	7,32	7,39	17,21	0,07	32,26	1,32	1,91	16,89
	6	48,33	7,24	7,25	17,23	0,06	30,03	1,68	1,98	15,17
	7	42,33	7,23	7,13	17,26	0,05	21,12	1,38	1,36	15,53
	8	32,17	7,34	7,15	17,26	0,05	23,62	1,18	0,99	23,86
	9	37,16	7,1	7,24	16,14	0,05	19,26	1,1	0,96	20,06
	10	33,34	7,22	7,24	17,32	0,05	26,42	0,56	1,01	26,16
	11	30,84	8,18	7,08	14,21	0,03	26,34	0,37	0,95	27,73
	12	35,33	8,34	7,01	12,36	0,05	20,03	0,56	1,55	12,92
	13	36,5	8,16	7,01	13,26	0,05	18,19	0,87	1,39	13,09
	14	39,5	8,22	7,07	14,65	0,04	23,36	0,36	1,54	15,17
Min		30,84	6,46	7,01	12,36	0,03	18,19	0,36	0,95	12,92
Max		203,5	8,34	7,76	19,01	0,11	46,69	1,75	3,18	28,68
$\bar{x}$		62,45	7,53	7,23	16,49	0,06	29,74	1,09	1,65	19,01
DS		59,89	0,58	0,21	2,07	0,02	10,19	0,47	0,65	5,52
L. Castillero	1	37,16	6,98	6,46	14,11	0,1	18,69	0,56	0,84	22,25
	2	33,26	6,93	7,41	14,26	0,11	18	0,55	0,8	22,50
	3	35,2	7,2	7,03	14,13	0,09	19,01	0,5	2,14	8,88
	4	34,13	7,1	8,21	14,38	0,09	18,23	0,48	1,24	14,70
	5	35	7,12	7,32	14,26	0,08	17,21	0,6	0,9	19,12
	6	36,2	7,13	7,24	14,11	0,09	17,23	0,53	0,62	27,79
	7	34	6,97	7,23	14,56	0,1	17,26	0,51	0,78	22,13
Min		33,26	6,93	6,46	14,11	0,08	17,21	0,48	0,62	8,88
Max		37,16	7,2	8,21	14,56	0,11	19,01	0,6	2,14	27,79
$\bar{x}$		34,99	7,06	7,27	14,26	0,09	17,95	0,53	1,05	19,63
DS		1,35	0,10	0,52	0,17	0,01	0,74	0,04	0,52	6,16

El análisis de sedimentos reveló diferencias definidas en la distribución de las fracciones de P. En el Orinoco predominó el fósforo detrítico, acompañado por valores reducidos de fósforo orgánico, P adsorbido a óxidos de Fe y fósforo autigénico. Esto se reflejó en valores bajos de P biodisponible (PBD), lo cual es coherente con sus características texturales dominadas por arenas y bajo contenido de materia orgánica. En contraste, Castellero presentó concentraciones elevadas de P orgánico y mayores valores de PBD, lo que coincide con su mayor contenido de materia orgánica terrestre de origen vascular (cocientes COT/P-O y C/N altos), textura fina y condiciones propias de ecosistemas con mayor tiempo de residencia del agua. Si bien los valores de IEP<1 no indican riesgo de liberación del fósforo bajo condiciones normales, la relación N:P baja (5,46) en la laguna en comparación con el Orinoco (16,22), sugiere un mayor potencial para procesos de eutrofización (Tabla 2 y 3).

Tabla 2. Valores de granulometría (%), MOT (%), COT (%), CaCO₃ (%), NT (μg g⁻¹); fracciones (μg g⁻¹) de fósforo (P-Ad+P-Fe, P-Ca, P-D, P-O, PI, PBD) y relaciones C/N, COT/P-O, N/P, e índice IEP en sedimentos del río Orinoco.

E	AF	AM	Lodos	MOT	COT	CaCO ₃ ²⁻	NT	Fe	P-Ad-Fe	P-Ca	P-D	P-O	PT	PI	PBD	C/N	COT / P-O	N/P	IEP
1	0	1	99	1,05	0,61	2,09	275,30	1074	4,87	3,51	69,60	8,94	86,91	77,98	13,81	25,85	1762,58	7,01	0,14
2	51	46	3	1,24	0,72	2,13	457,20	1078	3,95	1,96	50,10	10,10	66,10	56,01	14,05	18,37	1842,32	15,32	0,11
3	4	0	96	0,33	0,19	2,58	545,90	731	4,17	2,90	27,72	6,87	41,67	34,79	11,04	4,06	713,98	29,01	0,07
4	0	0	100	3,97	2,3	6,16	683,40	472	6,27	4,39	228,73	27,66	267,05	239,39	33,93	39,26	2147,85	5,67	0,45
5	72	26	2	3,84	2,23	7,14	592,90	751	9,02	5,41	152,89	16,58	183,90	167,32	25,60	43,88	3474,62	7,14	0,31
6	70	24	4	2,28	1,32	5,69	237,40	1159	7,49	3,75	115,77	26,48	153,48	127,00	33,97	64,87	1287,74	3,42	0,26
7	82	16	2	0,555	0,32	1,85	289,00	865	3,95	2,79	53,72	19,11	79,58	60,46	23,06	12,92	432,55	8,04	0,13
8	24	58	18	0,575	0,34	1,45	558,80	701	2,43	1,77	12,82	23,30	40,32	17,02	25,73	7,10	376,99	30,69	0,07
9	48	30	22	4,05	2,35	5,45	572,70	1055	5,55	3,31	132,81	28,30	169,98	141,67	33,85	47,87	2144,83	7,46	0,28
10	27	36	37	2,57	1,49	5,77	1154,40	1212	4,50	2,95	78,85	19,05	105,35	86,29	23,55	15,06	2020,31	24,26	0,18
11	34	24	42	5,205	3,02	8,11	474,60	604	3,81	2,88	136,38	23,05	166,11	143,07	26,86	74,24	3385,25	6,33	0,28
12	82	17	1	0,69	0,4	1,58	488,10	677	3,91	2,76	16,26	6,64	29,58	22,93	10,55	9,56	1555,11	36,54	0,05
13	68	32	1	0,68	0,39	1,28	455,30	860	3,88	2,50	16,84	15,08	38,30	23,22	18,96	9,99	668,18	26,32	0,06
14	74	25	1	0,51	0,29	1,38	293,40	111	3,08	3,86	15,02	10,63	32,59	21,96	13,71	11,53	704,97	19,93	0,05
Min	0	0	1	0,33	0,19	1,28	237,40	111	2,43	1,77	12,82	6,64	29,58	17,02	10,55	4,06	704,97	3,42	0,05
Max	82	58	100	5,205	3,02	8,11	1154,40	1212	9,02	5,41	228,73	28,30	267,05	239,39	33,97	74,24	376,99	36,54	0,45
$\bar{x}$	45,43	23,93	30,57	1,97	1,14	3,76	505,60	811	4,78	3,19	79,11	17,27	104,35	87,08	22,05	27,47	3474,62	16,22	0,17
DS	30,54	16,83	39,13	1,67	0,97	2,47	230,75	301	1,77	0,95	65,56	7,76	72,77	67,47	8,50	22,71	1608,38	11,27	0,12

E= estaciones, Min= mínimo, Max= máximo, $\bar{x}$ = promedio, DS= desviación estándar

Tabla 3. Valores de granulometría (%), MOT (%), COT (%), CaCO₃ (%), NT (μg g⁻¹); fracciones (μg g⁻¹) de fósforo (P-Ad+P-Fe, P-Ca, P-D, P-O, PI, PBD) y relaciones C/N, COT/P-O, N/P e índice IEP en sedimentos de la laguna de Castellero.

E	AF	AM	Lodos	MOT	COT	CaCO ₃ ²⁻	NT	Fe	P-AdFe	P-Ca	P-D	P-O	PT	PI	PBD	C/N	COT/P-O	N/P	IEP
1	25	40	35	6,23	1,48	7,37	608,80	35	6,68	2,51	107,20	46,66	163,05	116,39	53,34	28,40	820,47	8,27	0,27
2	16	22	62	3,29	1,33	3,79	622,70	37	9,91	3,74	253,24	86,24	353,12	266,88	96,14	24,84	397,22	3,90	0,59
3	10	25	65	5,99	1,61	8,05	604,40	38	6,33	5,67	211,61	86,49	310,10	223,61	92,82	31,06	480,57	4,32	0,52
4	12	32	56	5,20	1,50	5,49	524,60	38	2,75	7,60	169,98	86,75	267,07	180,33	89,50	33,40	447,29	4,35	0,45
5	11	37	52	2,69	1,02	0,84	538,10	35	1,74	8,94	76,49	55,99	143,16	87,18	57,73	22,18	472,03	8,32	0,24
6	25	43	32	3,63	1,06	1,79	505,30	35	3,26	4,45	139,68	65,25	212,65	147,39	68,51	24,43	418,87	5,26	0,35
7	34	36	30	3,50	1,05	0,93	343,40	18	3,02	7,52	121,56	68,37	200,47	132,10	71,39	35,81	398,25	3,79	0,33
Min	10	22	30	2,69	1,02	0,84	343,40	18	1,74	2,51	76,49	46,66	143,16	87,18	53,34	22,18	397,22	3,79	0,05
Max	34	43	65	6,23	1,61	8,05	622,70	38	9,91	8,94	253,24	86,75	353,12	266,88	96,14	35,81	820,47	8,32	0,59
$\bar{x}$	19	34	47	4,36	1,29	4,04	535,33	34	4,81	5,78	154,25	70,82	235,66	164,84	75,63	28,59	490,67	5,46	0,32
DS	9	8	15	1,42	0,25	3,01	96,32	7	2,92	2,35	61,75	16,22	77,37	63,06	17,29	5,06	149,18	1,99	0,17

E= estaciones, Min= mínimo, Max= máximo, $\bar{x}$ = promedio, DS= desviación estándar

El análisis multivariado ACP indicó que las fracciones orgánica y adsorbida a óxidos de Fe explicaron la mayor variabilidad espacial en Castillero, mientras que en el Orinoco la variabilidad estuvo asociada principalmente a las fracciones minerales (detriticas) y a la granulometría. Estos patrones señalan la influencia del régimen hidrodinámico en la especiación y partición del fósforo (Figuras 2 y 3).

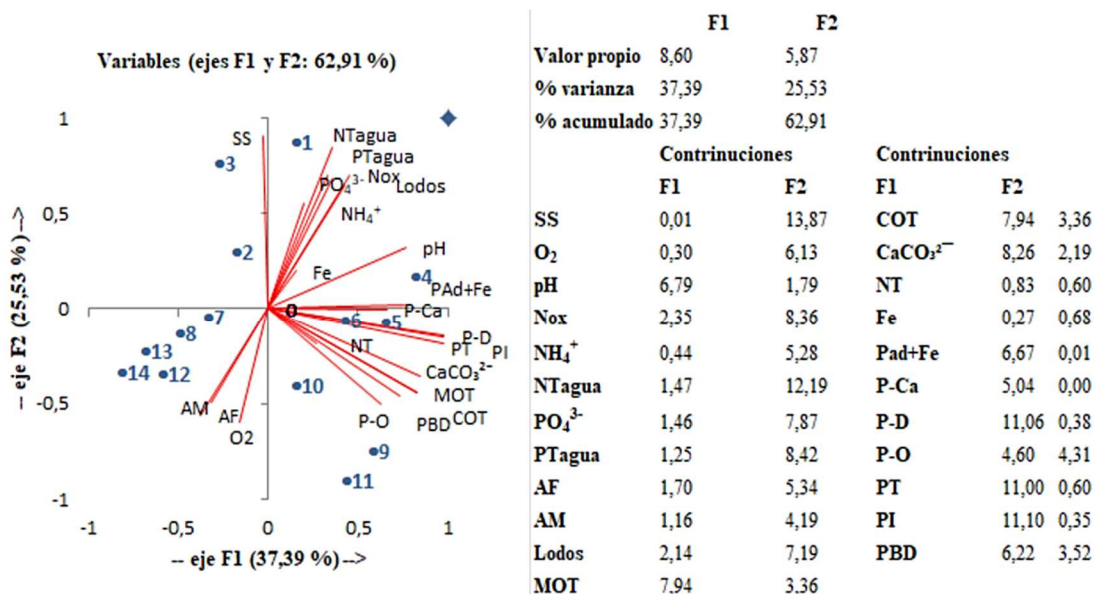


Figura 2. Proyección ortogonal de los dos primeros componentes principales para los parámetros fisicoquímicos del agua y sedimento del río Orinoco.

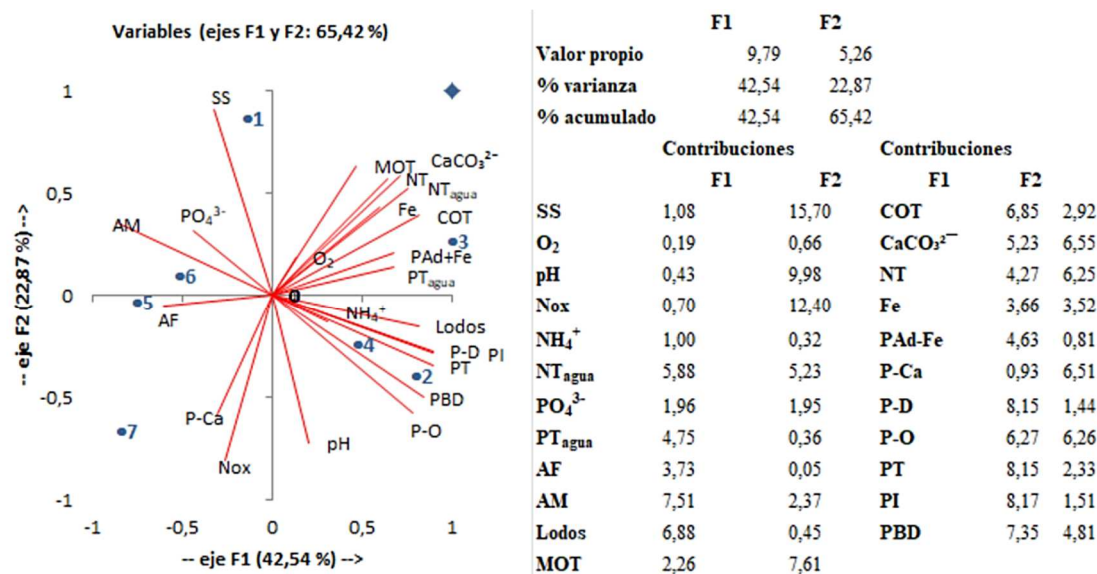


Figura 3. Proyección ortogonal de los dos primeros componentes principales para los parámetros fisicoquímicos del agua y sedimento de la laguna de Castillero.

Los patrones observados en los ACP a su vez, permitió clasificar a las diferentes estaciones (números en azul en el ACP) de acuerdo a su funcionabilidad. Para el Orinoco, en el cuadrante I (+F1, +F2) se ubican las estaciones 1 y 4; en el II (-F1, +F2) se ubican las estaciones 2 y 3, en el III (-F1, -F2); por ultimo están en el IV (+F1, -F2) las estaciones 5, 6, 9 y 10. Para Castillero en el cuadrante I se ubica la estación 3; en el II aparecen las estaciones 1 y 6, en el III las estaciones 5 y 7, y en el IV se ubican las estaciones 2 y 4. La asociación de las estaciones con las formas de fósforo y con los parámetros fisicoquímicos - geoquímicos, así como la funcionabilidad se muestran en la Tabla 4. Las pruebas de MDS (Figura 4), ANOSIM corroboraron la disimilitud entre el Orinoco y la laguna de Castillero, siendo el hierro principal contribuyente a esa diferencia, tal como lo demuestra el SIMPER (Tabla 5).

Tabla. 4. Comparación de las categorías funcionales de estaciones de muestreo entre el río Orinoco y la laguna de Castillero.

Ecosistema	Categoría funcional	Estaciones	Criterios limnológicos y geoquímicos
R. Orinoco	● Zona crítica (+F1, +F2) (acoplamiento agua-sedimento y riesgo alto de liberación)	1, 4	Asociación simultánea de fósforo en agua (PTagua, PO_4^{3-}) y en sedimento (P-O, PBD, MOT, COT, P-Ad+Fe). Elevada interacción funcional y peligro de movilización.
	● Zonas transicionales (-F1, +F2) (intercambio parcial o intermitente)	2, 3	Contenido moderado de nutrientes disueltos y fósforo orgánico, sin que se acumule en gran medida. Posible impacto de la dinámica fluvial y la contribución alóctona.
	● Zonas estables (-F1, -F2) (pobreza de fósforo y desconexión funcional)	7, 8, 12, 13, 14	Sedimentos con bajo contenido de fósforo (en todas las fracciones), que son pobres en materia orgánica total y tienen escasa interacción con los parámetros del agua. Limitada capacidad para reciclar internamente.
	● Sumideros ((+F1, -F2) geoquímicos (retención de P en formas refractarias)	5, 6, 9, 10,	Dominancia de PI, P-D y COT, sin vinculación con nutrientes solubles. Fosfatos que están retenidos en formas no lábiles. Retención geoquímica en el largo plazo.
L. Castillero	● Zona crítica (+F1, +F2) (acumulación activa + liberación potencial)	3	PO_4^{3-} , SS, COT, $CaCO_3$ + alta carga de fósforo biodisponible (P-O, PT, PBD). Posible liberación debido a la mineralización o a las condiciones anóxicas.
	● Zonas transicionales (-F1, +F2) (acumulación parcial, actividad moderada)	1, 6	El contenido de fósforo es moderado, así como el orgánico (P-O, NT, $CaCO_3$); no hay una presencia elevada de nutrientes disueltos y el pH es alcalino. Función intermedia.
	● Zonas estables (-F1, -F2) (sedimentos inertes, sin acumulación significativa)	5, 7	Concentraciones bajas de fósforo en todas las fracciones, baja MOT y sin acoplamiento con el agua. Sedimentos biogeoquímicos inactivos.
	● Sumideros (+F1, -F2) (retención inorgánica sin acoplamiento hídrico)	2, 4	Presencia de PI, P-D y COT, sin vínculo con los nutrientes acuáticos. Fosfatos estables que son retenidos por medio de adsorción o mineralización. Riesgo inmediato bajo.

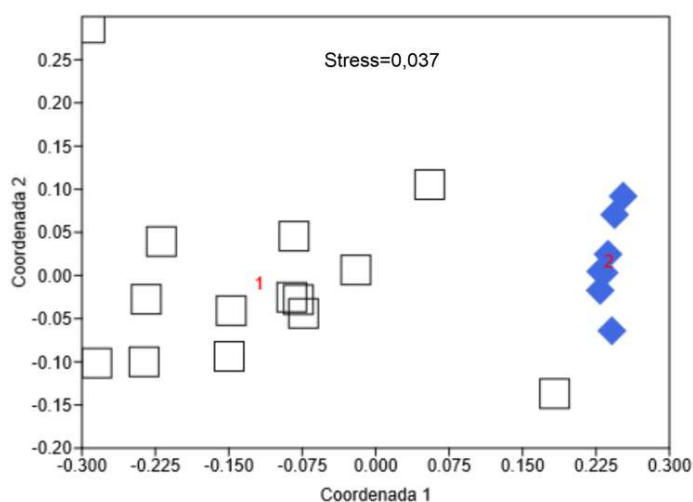


Figura 4. Análisis de escalamiento multidimensional (MDS) (basado en una matriz de distancias euclidianas de datos fisicoquímicos no transformados) en sedimentos del río Orinoco () y laguna de Castillero (♦).

Tabla 5. Parámetros estadísticos ASOSIM de una vía y SIMPER aplicados al río Orinoco y la laguna de Castillero.

			ANOSIM		
	Permutaciones	R	P		
	9999	0,72	0,0001		
			SIMPER		
Taxón	Disimilitud	Contribución %	Acumulativo %	$\bar{x}$. R. Orinoco	$\bar{x}$. L. Castillero
Fe	6,88	84,88	84,88	811	33,7
NT	5,83	7,193	92,07	506	535
PT	2,73	3,369	95,44	104	236
PI	1,37	1,689	97,13	87,1	165
PD	1,29	1,593	98,73	79,1	154
PBD	3195	0,3943	99,12	22	75,6
PO	3149	0,3887	99,51	17,3	70,8
Lodos	1894	0,2337	99,74	30,6	47,4
AF	1636	0,2019	99,94	45,4	19
AM	407,2	0,05025	99,99	23,9	33,6
CaCO ₃	13,49	0,001665	100	3,76	4,04
P-Ca	12,21	0,001507	100	3,2	5,78
PAd+PFe	10,22	0,001262	100	4,78	4,81
MOT	10,04	0,001239	100	1,97	4,36
COT	0,9465	0,0001168	100	1,14	1,29

DISCUSIÓN

Los resultados confirman la hipótesis de una diferenciación funcional entre el sistema lótico (Orinoco) y el léntico (Castillero) en su papel como sumidero o fuente de P. Esta divergencia es impulsada fundamentalmente por las diferencias en la dinámica hidro-sedimentaria y sus efectos en la especiación geoquímica del nutriente.

En primer lugar, los patrones de especiación observados, dominancia de fracciones detríticas en el río y mayor proporción de fracciones orgánicas y lábiles en la laguna son coherentes con la influencia diferencial de la hidrodinámica y la granulometría sobre la retención y la reactividad del fósforo. Así, los ríos con elevada carga terrígena entregan sedimento con proporciones altas de P asociado a fracciones minerales poco reactivas, mientras que los ambientes lénticos de mayor tiempo de residencia favorecen la acumulación de materia orgánica y fracciones más susceptibles a mineralización y reciclaje interno (Lima Neto et al., 2022). Además, la mayor biodisponibilidad del P en la laguna (PBD) puede explicarse por procesos biogeoquímicos internos de mineralización microbiana de la materia orgánica, fluctuaciones redox y resuspensión que incrementan la fracción de P intercambiable y la liberación hacia la columna de agua en episodios de anoxia o perturbación física. Estudios experimentales y de campo recientes muestran que la magnitud del aporte interno desde sedimentos a la columna de agua puede ser dominante en sistemas lenticos y que la duración e intensidad de las condiciones anóxicas regulan la magnitud de la liberación (Swann et al., 2024; Trentman et al., 2021).

El papel del hierro como controlador de la retención o liberación de P debe analizarse en términos de reactividad mineralógica y de condiciones redox temporales. Aunque la presencia de Fe puede correlacionar con fracciones de P adsorbidas, no siempre implica estabilidad: fases férricas frescas y altamente reactivas adsorben P eficientemente, pero su reducción microbiana o química libera P adsorbido (y oxida/reduce el cúmulo de especies de Fe), transformando un sumidero en una fuente en condiciones anóxicas (Lima Neto et al., 2022).

Por otra parte, el análisis multivariado que relaciona textura, materia orgánica y fraccionamiento del P sugiere que la gestión de sedimentos y la hidrodinámica local son determinantes para el destino del P en sistemas conectados. Donde la retención hidráulica se incrementa (lagunas), la proporcionalidad del aporte interno tiende a aumentar con el tiempo y puede llegar a ser la principal fuente de P para la columna de agua, especialmente si los procesos anóxicos se vuelven frecuentes (Lima Neto et al., 2022; Swann et al., 2024). A su vez, la ausencia de un enriquecimiento antropogénico significativo ($IEP < 1$) indica que las fuentes de P son predominantemente naturales; sin embargo, la identificación de una zona crítica dentro de la laguna (Estación 3) con el mayor PBD ($92,82 \mu\text{g g}^{-1}$) resalta la existencia de microzonas de riesgo que pueden actuar como puntos calientes para la liberación de P, especialmente ante perturbaciones o cambios en el régimen de oxígeno (Yu et al., 2022). Esto tiene implicaciones importantes para la gestión, sugiriendo que medidas de control deberían enfocarse no solo en las cargas externas, sino también en manejar las condiciones internas (redox, turbulencia) que gobiernan la liberación desde los sedimentos (Berens et al., 2024; Echebiri et al., 2023; James, 2016).

Finalmente, desde una perspectiva aplicada, los resultados demandan que las estrategias de manejo consideren no solo la reducción de cargas externas, sino también la mitigación de fuentes internas (remediación de sedimentos, técnicas físicas para reducir resuspensión, medidas que reduzcan la duración de anoxia). La literatura reciente sobre control de carga interna y evaluación del riesgo de liberación sugiere evaluaciones cuantitativas del flujo P sedimento–columna y protocolos de monitoreo estacional para anticipar episodios de liberación (Trentman et al., 2021; Swann et al., 2024). En el caso del sistema Orinoco-Castillero, sería recomendable para futuros estudios, complementar la especiación con ensayos de incubación de núcleos sedimentarios y medidas de fracciones de Fe reactivas para estimar tasas de liberación potencial y priorizar intervenciones.

Las diferencias encontradas entre el Orinoco y la laguna Castillero evidencian el papel modulador de la geoquímica sedimentaria en términos de la biodisponibilidad y retención del fósforo en los ecosistemas acuáticos tropicales. La complejidad del Orinoco y sus llanuras inundables se debe a la diversidad de fuentes hídricas y sedimentarias que nacen en la Cordillera Andina, los Llanos y la Cordillera de la Costa, además de las que surgen en las provincias del Escudo Guayanés. A esto se suma lo indicado en Gibbs y Barron (1983); González de Juana et al. (1980); Lewis et al. (2000); Márquez et al. (2008, 2012, 2014, 2016, 2018); Márquez y Lemus (2020); Milliman y Meade (1983); Vásquez y Wilbert (1992); Warne et al. (2002), quienes señalan que la mineralogía, el transporte sedimentario y las repercusiones de las acciones humanas, dan como resultado un mosaico ecosistémico complejo en la red fluvial del Orinoco.

En la Tabla 6 se presenta una comparación funcional entre los resultados obtenidos en esta investigación y los reportados para otros grandes ríos tropicales del mundo. Esta comparación permite evaluar el comportamiento de cada sistema como sumidero o fuente de fósforo, destacando las similitudes y diferencias en los procesos que regulan la retención, movilización y disponibilidad de este nutriente en distintos contextos hidrológicos y biogeoquímicos.

Tabla 6. Comparación funcional del fósforo en sedimentos del sistema Orinoco–Castillero frente a grandes ríos tropicales de Sudamérica, Asia y África.

Sistema (región)	Funcionalidad predominante	Fracciones dominantes (operacionales)	Factores controlantes clave	Referencias
R. Orinoco - L. Castillero (Venezuela)	Orinoco: sumidero (dominancia de P detrítico); Castillero: reservorio/fuente potencial (mayor P biodisponible)	Orinoco: P detrítico > P orgánico; Castillero: P orgánico y fracciones lábiles (PBD mayor).	Granulometría (arenas en río vs lodos en laguna), tiempo de residencia, contenido de materia orgánica, condiciones redox locales.	(Este estudio)
Amazonas (margen /estuario)	Mayormente sumidero a depósito en canales principales; márgenes/estuario pueden actuar como reservorios con liberación bajo anoxia	Fracciones detríticas y autigénicas en márgenes; presencia de apatita autigénica y Fe-P en algunos transeptos.	Altas cargas terrígenas; procesos diagenéticos en planicies de marea; zonas de transición redox en márgenes.	März et al. (2018).
Río de la Plata (plataforma /margen continental)	Depósito / sumidero en canales principales; márgenes presentan fracciones autigénicas	Elevada proporción de P total asociado a fases minerales y apatitas en sedimentos profundos	Transporte de sedimento fluvial masivo, diagénesis y precipitación autigénica en condicionantes de marginación	März et al. (2018)
Mekong (tramo superior y embalses, Asia)	Heterogéneo: tramos libres pueden ser sumideros; embalses y tramos en cascada favorecen aumento de P biodisponible (reservorio/fuente potencial)	Incremento de fracciones biodisponibles en sedimentos superficiales aguas abajo de embalses; aumento de P lábil	Regulación por presas/embalses (retención de sedimento, cambios en granulometría), anoxia en embalses, retención hidráulica.	Yang et al. (2024b)
Ganges– Brahmaputra (India /Bangladesh)	Tendencia a fuente local (alta carga antropogénica) en tramos urbanos/agrícolas; sedimentos de llanura aluvial pueden actuar como reservorio	Fracciones orgánicas y adsorbidas (depende de carga orgánica y adsorbentes metálicos); P particulado transportado en suspensión	Fuertes entradas puntuales y difusas (agricultura, urbanos); temporada monzónica altera transporte y re-movilización	Varma y Jha (2024)
Nilo (África)	Variable: tramos regulados (presa de Asuán) han alterado dinámica; en general tendencia a fuente por descargas antropogénicas en sectores urbanos y agrícolas	Formas solubles y particuladas dominan en tramos con inputs antrópicos; sedimentos deltaicos muestran fases minerales	Embalses (gestión hídrica), descargas urbanas/agropecuarias, alteración del pulso de sedimentos	Nkwasa (2024)
Congo / ríos tropicales centrales de África	Generalmente sumideros en tramos cabecera por alta exportación de materia orgánica particulada; sin embargo, llanuras e inundaciones pueden convertir zonas en fuentes	Elevadas fracciones particuladas (P asociado a materia orgánica y partículas terrígenas)	Extensa exportación de sedimentos, grandes inundaciones estacionales, baja intervención humana en muchos tramos	Nkwasa (2024); Yasin et al. (2010)

CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio evidencian que el sistema fluvial Orinoco-Castillero presenta patrones contrastantes en la especiación y disponibilidad del fósforo, determinados por diferencias hidrodinámicas, texturales y biogeoquímicas entre ambos ambientes. El río Orinoco, caracterizado por una fuerte influencia terrígena y elevada proporción de fracciones inorgánicas poco reactivas, actúa como un sumidero geoquímico de fósforo, con baja capacidad de liberación hacia la columna de agua. En contraste, la laguna de Castillero, con mayor tiempo de residencia del agua, acumulación de materia orgánica y fluctuaciones redox, funciona como un reservorio con potencial de liberar fósforo en condiciones favorables, especialmente durante episodios de anoxia o resuspensión.

La integración de la especiación del P con el análisis multivariado permitió identificar que la textura fina, el contenido de materia orgánica y la dinámica Fe-P constituyen los factores que mayor influencia ejercen sobre la movilidad del fósforo en la laguna, mientras que en el Orinoco predomina el control físico asociado al transporte de sedimentos minerales. Asimismo, la comparación funcional con otros grandes ríos tropicales de Sudamérica, África y Asia muestra que estos patrones son coherentes con tendencias documentadas en sistemas de alta descarga fluvial y cuerpos de agua lénticos tropicales, lo que posiciona al sistema Orinoco-Castillero dentro de un marco global de comportamiento fuente-sumidero.

En conjunto, estos hallazgos subrayan la necesidad de considerar la especiación del fósforo, las características sedimentarias y las condiciones redox como componentes fundamentales para comprender y gestionar la dinámica de nutrientes en sistemas tropicales interconectados. Finalmente, los resultados sugieren que las estrategias de manejo deben contemplar no solo la reducción de cargas externas, sino también la evaluación del aporte interno de fósforo, particularmente en ambientes lénticos susceptibles a procesos de liberación desde el sedimento.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento al Departamento de Oceanografía del Instituto Oceanográfico de Venezuela, al Departamento de Química, Escuela de Ciencias, Universidad de Oriente, Núcleo Sucre, y al Instituto Limnológico, Universidad de Oriente, Núcleo Bolívar por todo el apoyo en la realización de esta investigación. Los datos de esta investigación forman parte de la tesis denominada: Especiación química de fósforo y su relación con parámetros geoquímicos, en sedimentos superficiales del río Orinoco y la laguna de Castillero, Venezuela; desarrollada por la Bachiller Joselyn Milagros Antonieta Acosta Núñez, como requisito para optar al título de Licenciado en Química, en la Universidad de Oriente. Agradecemos in memoriam al Doctor William Senior quien contribuyó en vida para la realización de los muestreos de esta investigación.

LITERATURA CITADA

Aminot, A. & Chaussepied, M. (1983). *Dosage de l'oxygène dissous*. En Aminot, A. & Chaussepied, M. (Eds.), Manuel des analyses chimiques en milieu marin (pp. 23-45). Centre National pour l'Exploitation des Océans (CNEXO). <http://geca.area.ge.cnr.it/files/5923.pdf>

- Anderson, L. & Delaney, M. (2000). Sequential extraction and analysis of phosphorus in marine sediments: Streamlining of the SEDEX procedure. *Limnology and Oceanography*, 45(2), 509–515. <https://doi.org/10.4319/lo.2000.45.2.0509>
- APHA. (1995). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (19th ed.). American Public Health Association.
- Barik, S. K., Bramha, S., Bastia, T. K., Behera, D., Kumar, M., Mohanty, P. K. & Rath, P. (2019). Characteristics of geochemical fractions of phosphorus and its bioavailability in sediments of a largest brackish water lake, South Asia. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 19(3), 370–382. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2019.02.002>
- Bendschneider, K. & Robinson, R. (1952). A new spectrophotometric determination of nitrite in sea water. *Journal of Marine Research*, 11, 87–96. https://elischolar.library.yale.edu/journal_of_marine_research/761
- Berens, M., Michaud, A., VanderJeugd, E., Miah, I., Sutor, F., Emerson, D., Bowden, W., Kinsman-Costello, L., Weintraub, M. & Herndon, E. (2024). Phosphorus interactions with iron in undisturbed and disturbed Arctic tundra ecosystems. *Environmental Science & Technology*, 58, 11400–11410. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c09072>
- Bhattacharya, R., Lin, S. & Basu, N. (2022). Windows into the past: Lake sediment phosphorus trajectories act as integrated archives of watershed disturbance legacies over centennial scales. *Env. Research Letters*, 17(4), 047001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4cf3>
- Cavalcante, H., Araújo, F., Noyma, N. & Becker, V. (2018). Phosphorus fractionation in sediments of tropical semiarid reservoirs. *Science of the Total Environment*, 619-620: 1022-1029. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.204>
- Clarke, K. R. & Warwick, R. M. (2001). *Change in marine communities: An approach to statistical analysis and interpretation* (2nd ed.). Plymouth Marine Laboratory.
- Echebiri, F., Abayomi, A., Oladosu, N., Ayeni, A., Adesalu, T., Olayinka, K. & Alo, B. (2023). Effects of physicochemical and sediment–mineral dynamics on phosphorus concentration and biological productivity in Lagos coastal waters. *Aquatic Sciences*, 85(1), 18. <https://doi.org/10.1007/s00027-023-00965-0>
- Falk, N., Droppo, I., Drouillard, K. & Weisener, C. (2023). Biogeochemical Processes and Microbial Dynamics Governing Phosphorus Retention and Release in Sediments: A Case Study in Lower Great Lakes Headwaters. *Environmental Management*, 72, 932–944. <https://doi.org/10.1007/s00267-023-01859-0>
- Folk, R. L. (1974). *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphill.
- Gibbs, A. K. & Barron, C. N. (1983). The Guiana Shield reviewed. *Episodes*, 6(2), 7–14. <https://doi.org/10.18814/epiiugs/1983/v6i2/003>
- González de Juana, C., Iturralde, J. & Picard, X. (1980). *Geología de Venezuela y sus cuencas petrolíferas*. Foninves (Ed).

- González, H. & Ramírez, M. (1995). The effect of nickel mining and metallurgical activities on the distribution of heavy metals in Levisa Bay, Cuba. *Journal of Geochemical Exploration*, 52(1–2), 183–192. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(94\)00054-F](https://doi.org/10.1016/0375-6742(94)00054-F)
- James, W. F. (2016). Internal P loading: A persistent management problem in lake recovery. *NALMS Lakeline*, 36(1), 1–4. <https://www.nalms.org/wp-content/uploads/2017/01/36-1-3.pdf>
- Jolliffe, I. T. & Cadima, J. (2016). Principal component analysis: A review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 374(2065), 20150202. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0202>
- Kleeberg, A. & Kozerski, H. P. (1997). Phosphorus release in Lake Großer Müggelsee and its implications for lake restoration. *Hydrobiology*, 342–343(1), 9–26. <https://doi.org/10.1023/A:1017079029053>
- Koroleff, F. (1976). *Determination of nutrients*. En K. Grasshoff (Ed.), *Methods of seawater analysis* (pp. 117–181). Verlag Chemie.
- Lewis, B. L. & Landing, W. M. (1992). The investigation of dissolved and suspended particulate trace metal fractionation in the Black Sea. *Marine Chemistry*, 40(1–2), 105–141. [https://doi.org/10.1016/0304-4203\(92\)90050-K](https://doi.org/10.1016/0304-4203(92)90050-K)
- Lewis, W. M., Jr., Hamilton, S. K., Lasi, M. A., Rodríguez, M. & Saunders, J. F., III. (2000). Ecological determinism on the Orinoco floodplain. *BioScience*, 50(8), 681–692. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2000\)050\[0681:EDOTOF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2000)050[0681:EDOTOF]2.0.CO;2)
- Li, S., Arnscheidt, J., Cassidy, R., Douglas, R., McGrogan, H. & Jordan, P. (2023). The spatial and temporal dynamics of sediment phosphorus attenuation and release in impacted stream catchments. *Water Research*, 245, 120663. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120663>
- Lima Neto, I. E., Medeiros, P. H. A., Costa, A. C., Wiegand, M. C., Barros, A. R. M., & Barros, M. U. G. (2022). Assessment of phosphorus loading dynamics in a tropical reservoir with high seasonal water level changes. *Science of the Total Environment*, 815, 152875. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152875>
- Lin, C., Li, S., Zhu, B., Liu, S., Li, F., Zhou, Z. & Li, T. (2021). Al-PHOSLOCK thin-layer capping to control phosphorus release from sediment: effect of hydraulic retention time and phosphorus migration/transformation mechanism. *Journal of Soils and Sediments*, 21, 2474–2482. <https://doi.org/10.1007/s11368-021-02958-3>
- Liu, J., Yu, Y., Liu, M. & Liu, X. A. (2025). Review of phosphorous in fluvial floodplains: Source or sink? *Hydroecology and Engineering*, 2(1), 10001. <https://doi.org/10.70322/hee.2025.10001>
- Márquez, A., González, Á, Senior, W., & Benítez, A. (2016). Especiación del fósforo en sedimentos de un río tropical venezolano y su posible impacto sobre el ecosistema. *Ciencia*, 24(2). <https://produccioncientificaluz.org/index.php/ciencia/article/view/21585>
- Márquez, A. & Lemus, A. (2020). *Riesgos ambientales por metales pesados en los sedimentos del río Orinoco*. En D. Rodríguez Olarte (Ed.), *Ríos en riesgo de Venezuela* (Vol. 3, pp. 57–76). Colección Recursos Hidrobiológicos de Venezuela.

- Márquez, A., García, O., Senior, W., Martínez, G. & González Á. (2012). Distribution of heavy metals in surface sediments of the middle Orinoco, Venezuela. *Ciencia*, 20(1), 60–73. <https://doi.org/10.6084/M9.FIGSHARE.4004001>
- Márquez, A., Guillot, L., Hernandez, D., Benítez, A., Senior, W., Fermín, I., De la Cruz, R. & González, Á. (2018). Especiación química y biodisponibilidad del fósforo en Sedimentos recientes del golfo de Paria, Venezuela. *Equilibrium*, 2, 50–66. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.6801422>
- Márquez, A., Guillot, L., Senior, W., Martínez, G. & González, Á. (2014). Especiación química del fósforo en sedimentos superficiales del Golfo de Paria y la costa atlántica venezolana. *Boletín del Instituto Oceanográfico de Venezuela*, 53(1), 111–122. <https://figshare.com/ndownloader/files/6432516>
- Márquez, A., Senior, W., Martínez, G., Castañeda, J., & González, Á. (2008). Concentraciones de metales en sedimentos y tejidos musculares de algunos peces de la Laguna de Castillero, Venezuela. *Revista Científica*, 18(2), 121–133. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/cientifica/article/view/15348>
- März, C., Riedinger, N., Sena, C., & Kasten, S. (2018). Phosphorus dynamics around the sulphate-methane transition in continental margin sediments: Authigenic apatite and Fe(II) phosphates. *Marine Geology*, 404, 84–96. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2018.07.010>
- Matula, M. & Wojtkowska, M. (2025). Phosphorus speciation in water and sediments. *Desalination and Water Treatment*, 322, 101102. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.101102>
- Milliman, J. D. & Meade, R. H. (1983). World-wide delivery of river sediment to the oceans. *The Journal of Geology*, 91(1), 1–21. <https://www.jstor.org/stable/30060512>
- Mora, A., Laraque, A. & López, J. L. (2017). *El Bajo Orinoco: aspectos hidrosedimentológicos, geoquímicos e influencia antrópica*. En D. Rodríguez Olarte (Ed.), *Ríos en riesgo de Venezuela* (Vol. 1, pp. 109–126). Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado.
- Moura, D. S., Neto, I. E. L., Clemente, A., Oliveira, S. M. A. C., Pestana, C. J., De Melo, M. C. & Capelo-Neto, J. (2020). Modeling phosphorus exchange between bottom sediment and water in tropical semiarid reservoirs. *Chemosphere*, 246, 125686. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125686>
- Mudroch, A. & Azcue, J. M. (1995). *Manual of aquatic sediment sampling*. Lewis Publishers. <https://scispace.com/pdf/manual-of-aquatic-sediment-sampling-iwlr1cfhsq.pdf>
- Murphy, J. & Riley, J. P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, 27, 31–36. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)88444-5](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)88444-5)
- Nkwasa, A., Chawanda, C. J., Nakkazi, M. T., Tang, T., Eisenreich, S. J., Warner, S., & van Griensven, A. (2024). One third of African rivers fail to meet the 'good ambient water quality' nutrient targets. *Ecological Indicators*, 166, 112544. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112544>

- Oh, H. & Choi, J. (2023). Variations in phosphorus fractions in sediments and their release according to precipitation in the Han River, South Korea. *Journal of Soils and Sediments*, 23(5), 2284–2297. <https://doi.org/10.1007/s11368-023-03459-1>
- Primo, E. & Carrasco, J. (1973). *Química agrícola I. Suelos y fertilizantes*. Alhambra.
- Roa, P. & Berthois, L. (1975). *Manual de sedimentología: Métodos para el estudio de los sedimentos no consolidados*. Universidad Central de Venezuela.
- Ruttenberg, K. C. (1992). Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments. *Limnology and Oceanography*, 37(7), 1460–1482. <https://doi.org/10.4319/lo.1992.37.7.1460>
- Shen, W., Li, S., Basu, N. B., Ury, E. A., Jing, Q., & Zhang, L. (2023). Size and temperature drive nutrient retention potential across water bodies in China. *Water Research*, 239, 120054. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120054>
- Søndergaard, M., Jensen, J. P. & Jeppesen, E. (2001). Retention and internal loading of phosphorus in shallow, eutrophic lakes. *The Scientific World Journal*, 1, 427–442. <https://doi.org/10.1100/tsw.2001.72>
- Søndergaard, M., Jensen, J. P. & Jeppesen, E. (2003). Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes. *Hydrobiology*, 506–509(1), 135–145. <https://doi.org/10.1023/B:HYDR.00000008611.12704.dd>
- Strickland, J. D. H. & Parsons, T. R. (1972). *A practical handbook of seawater analysis* (2nd ed.). Fisheries Research Board of Canada. <https://doi.org/10.25607/OBP-1791>
- Sutula, M., Bianchi, T. S. & McKee, B. A. (2004). Effect of seasonal sediment storage in the lower Mississippi River on the flux of reactive particulate phosphorus to the Gulf of Mexico. *Limnology and Oceanography*, 49(6), 2223–2235. <https://doi.org/10.4319/lo.2004.49.6.2223>
- Swann, M. M., Swann, M. M., Cortes, A., Forrest, A. L (2024). Internal phosphorus loading alters nutrient limitation and contributes to cyanobacterial blooms in a polymictic lake. *Aquatic Sciences*, 86 (46). <https://doi.org/10.1007/s00027-024-01045-2>.
- Tréguer, P. & Le Corre, P. (1975). *Manuel d'analyses des sels nutritifs dans l'eau de mer: Utilisation de l'AutoAnalyzer II Technicon* (2nd ed.). Université de Bretagne Occidentale.
- Trentman, M. T., Tank, J.L., Shepherd, H. A. M. (2021). Characterizing bioavailable phosphorus concentrations in an agricultural stream during hydrologic and streambed disturbances. *Biogeochemistry*. <https://doi.org/10.1007/s10533-021-00803-w>
- Valderrama, J. C. (1981). The simultaneous analysis of total nitrogen and total phosphorus in natural waters. *Marine Chemistry*, 10(2), 109–122. [https://doi.org/10.1016/0304-4203\(81\)90027-X](https://doi.org/10.1016/0304-4203(81)90027-X)
- Varma K, Jha PK. (2024) Phosphorus distribution in the water and sediments of the Ganga and Yamuna Rivers, Uttar Pradesh, India: insights into pollution sources, bioavailability, and eutrophication implications. *Environ Monit Assess*. 196(4): 336. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12499-0>

- Vásquez, E. & Wilbert, W. (1992). *The Orinoco River*. En P. Calow & G. E. Petts (Eds.), *The rivers handbook: Hydrological and ecological principles* (Vol. 1, pp. 448–471). Blackwell Scientific Publications.
- Vogel, A. I. (1960). *Vogel's textbook of practical organic chemistry* (5th Eds.). Longman Scientific & Technical.
- Walkley, A. & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29–38. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- Wang, L., Li, Q., Zou, H. & Zhou, H. (2013). Phosphorus speciation in wetland sediments of Zhujiang (Pearl) River Estuary, China. *Chinese Geographical Science*, 23(5), 574–583. <https://doi.org/10.1007/s11769-013-0627-4>
- Warne, A. G., Meade, R. H., White, W. A., Guevara, E. H., Gibeau, J. C., Smyth, R. C., Aslan, A. & Tremblay, T. A. (2002). Regional controls on geomorphology, hydrology, and ecosystem integrity in the Orinoco Delta, Venezuela. *Geomorphology*, 44(3-4), 273–307. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00179-9](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00179-9)
- Wetzel, R. G. (2001). *Limnology: Lake and river ecosystems* (3rd ed.). Academic Press.
- Xu, X., Weng, N., Zhang, H., Van De Velde, S., Hermans, M., Wu, F. & Huo, S. (2023). Cable bacteria regulate sedimentary phosphorus release in freshwater sediments. *Water Research*, 242, 120218. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120218>
- Yang, Z., Min, Q., Guo, X., Wang, C., Yan, B., Li, X., Liu, D., Ma, J., & Lorke, A. (2024a). Cascaded reservoirs promote phosphorus bioavailability of surface sediments in the Upper Mekong River. *Science of the Total Environment*, 955, 162345. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176876>
- Yang, H., Chang, Y., Dong, X., Wang, S., Che, F. & Huang, W. (2024b). The coupled effect of sediment resuspension and microbiota on phosphorus release and transformation in a simulated aquatic ecosystem. *Journal of Water Process Engineering*, 58, 104653. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104653>
- Yasin, J. A., Kroeze, C., & Mayorga, E. (2010). Nutrients Export by Rivers to the Coastal Waters of Africa: Past and Future trends. *Global Biogeochemical Cycles*, 24(4), Article GB0A07. <https://doi.org/10.1029/2009GB003568>
- Yu, W., Yang, H., Chen, J., Liao, P., Chen, Q., Yang, Y., & Liu, Y. (2022). Organic phosphorus mineralization dominates the release of internal phosphorus in a macrophyte-dominated eutrophication lake. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 812834. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.812834>
- Zhang, W., Jin, X., Zhu, X. & Shan, B. (2016). Characteristics and distribution of phosphorus in surface sediments of limnetic ecosystem in Eastern China. *PLOS ONE*, 11(6), e0156488. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156488>

BIODATA

Aristide Márquez: Lic. en Química, MSc. Oceanografía Química; Dr. En Ciencias Marinas. Investigador y Profesor de Postgrado en Ciencias Marinas. Jefe de los laboratorios de biogeoquímica, elementos nutritivos y de metales pesados en ecosistemas marinos, costeros y fluviales. Universidad de Oriente, Instituto Oceanográfico de Venezuela. Dep. de Oceanografía. Publicaciones: *Biodiversidade Brasileira*, 12(2): 1-10, (2022). *Foro Iberoam. Rec. Mar. Acui.* 11: 162-177 (2023). *Foro Iberoam. Rec. Mar. Acui.* 11:142-154 (2023). *Acta Oceanográfica del Pacífico.* 6(1). 65-81 (2024). *Bol. Inst. Oceanogr. Venez.* 63 (01): 01-20 (2024). *Boletín Instituto del Mar Perú.* 39 (2): 64-82. (2024). *Foro Iberoam. Rec. Mar. Acui.* 12: 485-507 (2024). *Rev. Cien. Ing.*, (12): 1-29 (2025). *Rev. Cien. Ing.*, (12) 2: 1-27 (2025).

Joselyn Acosta Núñez: Lic. Químico. Escuela de Ciencias, Departamento de Química. Universidad de Oriente.