

Niveles de glifosato en sedimentos de humedales del bosque atlántico del Alto Paraná BAAPA (Paraguay)

Evelyn Alonso Ortiz , Gisselle Espínola Vega , Andrea Sosa Ayala 

Resumen — Los humedales del Bosque Atlántico del Alto Paraná (BAAPA), ecosistemas de transición amenazados, enfrentan presiones significativas por actividades antropogénicas, particularmente la agricultura intensiva y el uso asociado de pesticidas como el glifosato. Este estudio evaluó la presencia y concentración de glifosato en sedimentos superficiales de 12 sitios distribuidos en cuatro humedales (Tati Yupi, Pikyry, Pozuelo, Carapã) dentro de esta ecorregión en Paraguay, clasificando los sitios según el uso de suelo circundante (agrícola, urbano, área protegida). La cuantificación se realizó mediante ELISA. Se detectó glifosato en el 100% de las muestras (N=12), con una concentración media de 3.45 ppb (rango: 2.62 - 3.90 ppb). La concentración máxima (3.90 ppb) se registró en un sitio agrícola (CA-27) y la mínima (2.62 ppb) en uno urbano (TY-01). No se encontraron diferencias estadísticamente significativas (Kruskal-Wallis, $p=0.1922$) entre los grupos de uso de suelo, sugiriendo fuentes de contaminación difusas y la importancia del transporte de sedimentos. La presencia ubicua de glifosato, incluso en áreas protegidas, subraya la vulnerabilidad de estos humedales y la necesidad de monitoreo y estrategias de conservación específicas.

Palabras clave — Glifosato, Sedimentos, Humedales, Contaminación, Bosque Atlántico del Alto Paraná

Abstract — The wetlands of the Upper Paraná Atlantic Forest (BAAPA), threatened transitional ecosystems, face significant pressures from anthropogenic activities, particularly intensive agriculture and the associated use of pesticides such as glyphosate. This study evaluated the presence and concentration of glyphosate in surface sediments at 12 sites distributed across four wetlands (Tati Yupi, Pikyry, Pozuelo, Carapã) within this ecoregion in Paraguay, classifying the sites according to surrounding land use (agricultural, urban, protected area). Quantification was performed using ELISA. Glyphosate was detected in 100% of the samples (N=12), with a mean concentration of 3.45 ppb (range: 2.62–3.90 ppb). The maximum concentration (3.90 ppb) was recorded at an agricultural site (CA-27) and the minimum (2.62 ppb) at an urban site (TY-01). No statistically significant differences (Kruskal-Wallis, $p=0.1922$) were found between land use groups, suggesting diffuse sources of contamination and the importance of sediment transport. The ubiquitous presence of glyphosate, even in protected areas, underscores the vulnerability of these wetlands and the need for monitoring and specific conservation strategies.

Keywords — Glyphosate, Sediments, Wetlands, Pollution, Atlantic Forest of Upper Paraná.

I. INTRODUCCIÓN

Los humedales, ecosistemas de interfaz entre ambientes terrestres y acuáticos, desempeñan funciones ecológicas

vitales y proveen servicios ecosistémicos esenciales (Mitsch & Gosselink, 2015; U.S. Environmental Protection Agency, 2019). En Paraguay, particularmente dentro del Bosque Atlántico del Alto Paraná (BAAPA), estos ambientes se encuentran bajo creciente presión antropogénica, destacando la expansión agrícola (Govindarajulu, 2008; Beecraft et al., 2020). Esta actividad frecuentemente implica el uso intensivo de agroquímicos, entre los cuales el glifosato es uno de los herbicidas más aplicados a nivel mundial y nacional (Ronco et al., 2016). Dada su alta solubilidad en agua y afinidad por partículas del suelo, el glifosato puede acumularse en los sedimentos de humedales, actuando como reservorio y potencial fuente de contaminación crónica (Fariña et al., 2015; García et al., 2019).

A pesar de la reconocida importancia ecológica de los humedales del BAAPA y la intensidad del uso de glifosato en la región, existe una notable escasez de datos sobre la presencia y niveles de este herbicida en sus sedimentos. Estudios previos en Paraguay y regiones adyacentes han confirmado la presencia de glifosato y otros pesticidas en aguas superficiales (Bento et al., 2017; Ronco et al., 2016) y han vinculado la contaminación por agroquímicos con efectos adversos en la biota acuática (Becker et al., 2021; Adam et al., 2011). Investigaciones internacionales también señalan a los sedimentos de humedales como importantes sumideros de glifosato (García et al., 2019; Rosolen et al., 2015). Por lo tanto, evaluar la contaminación por glifosato en sedimentos de humedales del BAAPA es crucial para comprender los riesgos ambientales y fundamentar estrategias de monitoreo y conservación.

Este trabajo tuvo como objetivo determinar la presencia y los niveles de concentración de glifosato en sedimentos superficiales de humedales seleccionados dentro de reservas naturales del BAAPA (Alto Paraná y Canindeyú, Paraguay), y analizar la posible influencia del uso del suelo circundante (agrícola, urbano, área protegida) sobre dichos niveles.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Recolección de muestras y zona de estudio

Se seleccionaron 12 sitios en cuatro humedales (Tati Yupi, Pikyry, Pozuelo, Carapã) asociados al embalse del Río Paraná, dentro de reservas naturales representativas del Bosque Atlántico del Alto Paraná (BAAPA) en los departamentos de Alto Paraná y Canindeyú, Paraguay. Los muestreos fueron realizados en los meses de marzo y abril de 2022.

Los sitios (Figura 1) fueron clasificados según el uso de suelo circundante: agrícola (A, n=7), área protegida (P, n=3) y urbano (U, n=2). Se recolectaron muestras compuestas de sedimento superficial (0-10 cm) en cada sitio (n=12) durante abril de 2022, siguiendo protocolos adaptados (Rosolen et al., 2015; McMurry et al., 2016) y asegurando condiciones adecuadas de recolección y preservación.

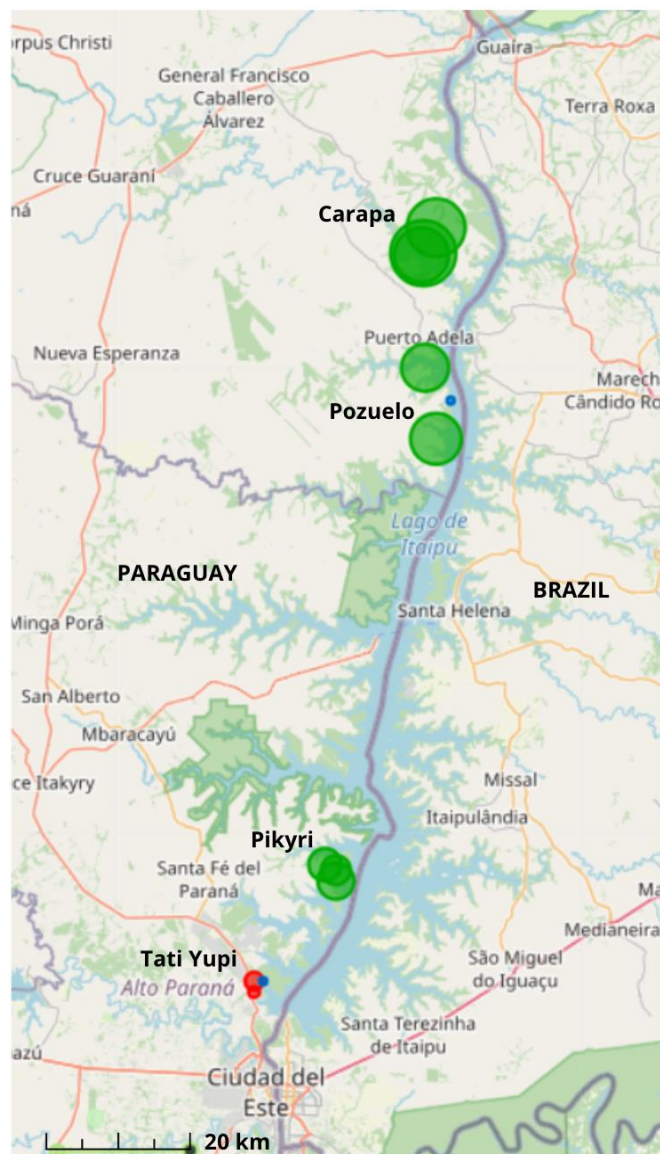


Fig. 1. Mapas de la ubicación de los sitios de toma de muestras. Mapas y vista aérea de la ubicación de los sitios de toma de muestras. Las áreas circulares representan la concentración proporcional de glifosato en los sitios de estudio. El color verde corresponde a puntos clasificados como agrícolas, rojo para los sitios urbanos y peri-urbanos y azul corresponde a áreas protegidas (reservas naturales).

Extracción y cuantificación de glifosato

En el laboratorio, se obtuvieron submuestras representativas mediante cuarteo. Se realizó una extracción de 15 g de

sedimento con NaH_2PO_4 0.1 M, seguida de agitación (15 min, 350 rpm) y centrifugación (10 min, 3500 rpm); el proceso se repitió dos veces sobre el pellet. Los sobrenadantes combinados se filtraron (0.45 μm) (Fariña et al., 2015; Adam et al., 2011). La cuantificación de glifosato en los extractos se efectuó mediante un kit comercial de ELISA (Ensayo por Inmunoabsorción Ligado a Enzimas), siguiendo las especificaciones del fabricante y utilizando una curva de calibración. El límite de detección fue de 0.05 ppb. Todas las determinaciones se realizaron por duplicado.

Análisis Estadístico

Se evaluó la normalidad de los datos mediante la prueba de Shapiro-Wilk. Dada la falta de normalidad ($p > 0.05$), se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para comparar las concentraciones de glifosato entre los diferentes grupos de uso de suelo. Se consideró un nivel de significancia $\alpha = 0.05$. Los análisis se realizaron con el software PAST 4.03 (Hammer, Harper, & Ryan, 2001; Hammer, 2020).

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se detectó glifosato en la totalidad (100%) de las muestras de sedimento analizadas (N=12). La concentración media general fue de 3.45 ± 0.62 ppb (media $\pm$ desviación estándar), con un rango que osciló entre 2.62 ppb (sitio urbano TY-01) y 3.90 ppb (sitio agrícola CA-27).

La tabla 1 resume los estadísticos descriptivos de las concentraciones de glifosato agrupadas por uso de suelo circundante. Aunque se observan ligeras variaciones en las medias entre grupos (Agricultor: 3.50 ppb; Área Protegida: 3.71 ppb; Urbano: 3.12 ppb), la prueba de Kruskal-Wallis no reveló diferencias estadísticamente significativas ($H = 2.041$, $p = 0.1922$). La distribución de las concentraciones por grupo se visualiza en la Figura 1 (boxplot).

Tabla 1. Estadísticos descriptivos de la concentración de glifosato (ppb) en sedimentos de humedales según uso de suelo circundante. DE: Desvío Estándar.

Uso del Suelo	Media (ppb)	DE (ppb)	Mín (ppb)	Máx (ppb)
Agrícola (A)	3.50	0.34	2.87	3.90
Área Protegida (P)	3.71	0.16	3.53	3.85
Urbano (U)	3.12	0.70	2.62	3.61
General	3.45	0.62	2.62	3.90

La detección ubicua de glifosato en los sedimentos de los humedales estudiados dentro del BAAPA confirma la exposición generalizada de estos ecosistemas a este herbicida, en concordancia con el alto uso agrícola en la región (Beecraft

et al., 2020). La concentración media (3.45 ppb) y el rango (2.62-3.90 ppb) proporcionan un primer diagnóstico cuantitativo para esta matriz ambiental en humedales paraguayos del BAAPA.

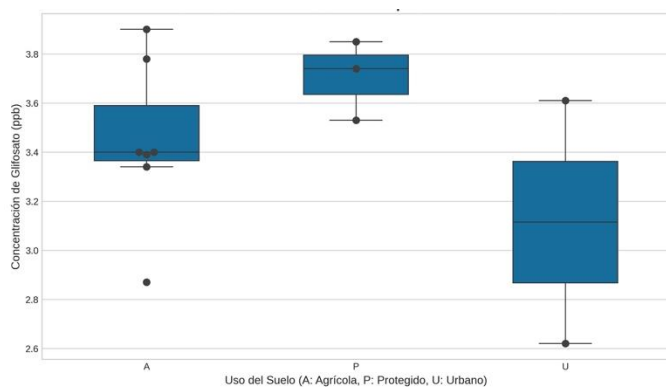


Fig. 2. Concentración de glifosato (ppb) por uso de suelo circundante en los sitios de estudio.

En la tabla 2 se compara los hallazgos de este estudio con valores reportados en la literatura a nivel regional. Los niveles encontrados en este estudio son considerablemente más bajos que los máximos reportados en sedimentos de áreas agrícolas intensivas en Argentina (hasta 5000 ppb) (Adam et al., 2011), pero se sitúan en un rango similar o ligeramente superior a otros estudios en sedimentos de humedales y arroyos de Argentina y Norteamérica (García et al., 2019; Rosolen et al., 2015; Aparicio et al., 2013; Primost et al., 2017). Es crucial notar la escasez de límites regulatorios específicos para glifosato en sedimentos con fines de protección ecológica; los límites existentes suelen referirse al agua potable (e.g., 700 ppb en EEUU) y se basan en salud humana, no siendo directamente aplicables a la evaluación del riesgo ecosistémico en sedimentos.

La ausencia de diferencias significativas entre los sitios agrícolas, protegidos y urbanos ($p=0.1922$) refuta la hipótesis inicial basada únicamente en la proximidad a la aplicación directa y sugiere un escenario de contaminación difusa. El transporte de partículas de suelo erosionadas vía escorrentía, la deposición atmosférica (García, Ávila, & Palau, 2019) y la posible contribución de fuentes no agrícolas pueden explicar la presencia de glifosato incluso dentro de áreas protegidas. La detección de niveles relativamente elevados en áreas protegidas (media 3.71 ppb) es particularmente preocupante, indicando que estas reservas no están aisladas de las presiones de la cuenca hidrográfica circundante y pueden actuar como sumideros de contaminantes transportados.

La acumulación de glifosato en sedimentos, incluso a niveles bajos, puede tener implicaciones ecológicas. Los sedimentos son hábitat para organismos bentónicos (potenciales bioindicadores) y pueden actuar como fuente secundaria de contaminación para la columna de agua. Aunque este estudio no evaluó efectos biológicos, la literatura reporta posibles impactos del glifosato en comunidades microbianas,

invertebrados y anfibios asociados a humedales (Shelton & Kingsbury, 1986). La presencia constante de este herbicida justifica la necesidad de incorporar su monitoreo en programas de evaluación de la salud de los humedales del BAAPA, idealmente junto con el análisis de bioindicadores sensibles.

Tabla 2. Comparación de niveles de glifosato (ppb) en sedimentos/suelos de estudios regionales.

Contexto	Matriz	Rango (ppb)
Este Estudio (Paraguay)	Sedimento humedal	2.62 - 3.90
Peruzzo et al. (2008) (Argentina)	Sedimento Suelo	500 - 5000
Primost et al. (2017) (Argentina)	Sedimento	8.28 - 32
Aparicio et al. (2013) (Argentina)	Sedimento (Arroyos)	5.7 - 221.2

Este estudio evidencia la contaminación generalizada por glifosato en sedimentos superficiales de humedales del Bosque Atlántico del Alto Paraná en Paraguay, detectándose en todos los sitios muestreados, incluyendo áreas agrícolas, urbanas y protegidas. Las concentraciones detectadas (rango 2.62-3.90 ppb), aunque no muestran diferencias estadísticas significativas entre usos de suelo, indican una exposición constante y sugieren la importancia de fuentes difusas y transporte de sedimentos en la dispersión del contaminante.

Estos hallazgos pioneros para la región subrayan la vulnerabilidad de los humedales del BAAPA, incluso dentro de áreas protegidas, a la presión de los agroquímicos. Se concluye que es imperativo incluir el monitoreo de glifosato en sedimentos como parte de las estrategias de conservación y manejo de estos ecosistemas críticos, y se recomienda investigar sus posibles efectos sobre la biota local y la función ecológica de los humedales.

REFERENCIAS

- Adam, F., Annett, B., Bersillon, J., Payeur, M., & Piolet, A. (2011). Diagnóstico de la presencia de glifosato en aguas superficiales de los departamentos de San Pedro y Canindeyú [Informe técnico].
- Aparicio, V. C., De Gerónimo, E., Marino, D., Primost, J., Carriquiriborde, P., & Ronco, A. E. (2013). Environmental fate of glyphosate and AMPA in surface water and sediments of a freshwater ecosystem. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(10), 7100–7108. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1703-7>

- Beecraft, L., Dean, J., Doyle, P., Frank, R. A., Hanson, M. L., Headley, J. V., & Prosser, R. S. (2020). Bioconcentration of glyphosate in wetland biofilms. *bioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2020.08>
- Becker, R. W., Araújo, D. S., Sirtori, C., Toyama, N. P., Tavares, D. A., Cordeiro, G. A., et al. (2021). Pesticides in surface water from Brazil and Paraguay cross-border region: Screening using LC-QTOF MS and correlation with land use and occupation through multivariate analysis. *Microchemical Journal*, 168, 106443. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2021.106443>
- Bento, C. P. M., Goossens, D., Rezaei, M., Riksen, M., Mol, H. G. J., Ritsema, C. J., et al. (2017). Glyphosate and AMPA distribution in wind-eroded sediment derived from loess soil. *Environmental Pollution*, 220, 1079–1089. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.10.081>
- Fariña, D., Cabral, N., Benítez, E., & Dure, R. (2015). Inventario de humedales del Paraguay. Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible. http://www.mades.gov.py/wp-content/uploads/2022/02/Producto2_corregido-2015.pdf
- García, L., Ávila, C., & Palau, M. (2019). Atlas del agronegocio en Paraguay. BASE-IS. https://www.baseis.org.py/wp-content/uploads/2020/03/2019_DicATLAS.pdf
- Govindarajulu, P. P. (2008). Literature review of impacts of glyphosate herbicide on amphibians: The importance of the surfactant, the formulation, and the environmental conditions. BC Ministry of Environment.
- Hammer, Ø., Harper, D. A. T., & Ryan, P. D. (2001). PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4(1), 1–9.
- McMurry, S. T., Belden, J. B., Smith, L. M., Morrison, S. A., Daniel, D. W., Euliss, B. R., et al. (2016). Land use effects on pesticides in sediments of prairie pothole wetlands in North and South Dakota. *Science of the Total Environment*, 565, 682–689. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.187>
- Mitsch, W. J., & Gosselink, J. G. (2015). *Wetlands* (5th ed.). Wiley.
- Peruzzo, P. J., Porta, A. A., & Ronco, A. E. (2008). Levels of glyphosate in surface waters, sediments and soils associated with direct sowing soybean cultivation in north pampasic region of Argentina. *Environmental Pollution*, 156(1), 61–66. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.01.019>
- Primost, J. E., Marino, D. J. G., Aparicio, V. C., & Ronco, A. E. (2017). Glyphosate and AMPA in freshwater ecosystems: Presence and potential adverse effects. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189, 1–12. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-5853-2>
- Ronco, A. E., Marino, D. J. G., Abelando, M., Almada, P., & Apartin, C. D. (2016). Water quality of the main tributaries of the Paraná Basin: Glyphosate and AMPA in surface water and bottom sediments. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(8), 458. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5467-0>
- Rosolen, V., De-Campos, A. B., Govone, J. S., & Rocha, C. (2015). Contamination of wetland soils and floodplain sediments from agricultural activities in the Cerrado Biome (State of Minas Gerais, Brazil). *Catena*, 128, 203–210. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.02.015>
- Shelton, L. R., & Kingsbury, J. A. (1986). Methods for collecting, preserving, and analyzing precipitation samples in the United States Geological Survey. U.S. Geological Survey.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2019, March 19). Wetland functions and values. <https://www.epa.gov/watertrain>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2022). Basic information about glyphosate in drinking water. <https://www.epa.gov/sdwa/basic-information-about-glyphosate-drinking-water>