

Análisis de la composición química elemental de los sedimentos del Sistema Iberá (Corrientes, Argentina)

Assessment of the elemental chemical composition of sediments from the Iberá System (Corrientes, Argentina)

Paola Suárez⁽¹⁾, Marisol Vega⁽²⁾, Nieves María del Carmen Talavera Prieto⁽³⁾ y Sylvína Casco⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Universidad Nacional del Nordeste, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura. Av. Libertad 5470, Corrientes, Argentina.

e-mail: paolasuarez792@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8046-0348>

⁽²⁾ Universidad de Valladolid, Facultad de Ciencias, Departamento de Química Analítica. Campus Miguel Delibes, Valladolid, España.

e-mail: mariasol.vega@uva.es. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3635-7920>

⁽³⁾ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Instituto de Química Básica y Aplicada del Nordeste Argentino. Av. Libertad 5470, Corrientes, Argentina.

e-mail: nievest80@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6881-8461>

⁽⁴⁾ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - Universidad Nacional del Nordeste, Centro de Ecología Aplicada del Litoral. Ruta Provincial N°5 km 2.5 s/n, Corrientes, Argentina.

e-mail: sylvina.casco@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8326-8931>

RESUMEN

La evaluación de ambientes protegidos ha tomado mayor relevancia en las últimas décadas, a través de estudios orientados a conocer su dinámica y así trabajar para mantenerlos lo más cercano posible a sus condiciones prístinas. El macrosistema Iberá, localizado en el noreste de la República Argentina, es una de las principales fuentes de agua limpia superficiales del país, así como el segundo humedal más importante de Latinoamérica. Sin embargo, es escasa la información disponible sobre la composición química elemental de los sedimentos de la región. Este trabajo presenta resultados sobre las variaciones químicas que han tenido lugar en los últimos años en las principales lagunas del sistema Iberá. Con tal objetivo, se evaluó la composición química elemental de los sedimentos superficiales y profundos de dos islas ubicadas en la Laguna Trin. Los resultados obtenidos indican variaciones significativas en características físicas y químicas de los sedimentos de áreas cercanas, tanto en sentido temporal como espacial. Esta situación genera la necesidad de continuar con este tipo de estudios, logrando un mapeo de la historia geoquímica de la zona.

Palabras clave: Humedales, Química de Sedimentos, Registro Histórico, Metales, Sudamérica.

ABSTRACT

The evaluation of protected environments has gained greater relevance in recent decades, with the goal of understanding their dynamics and thus working to maintain them as close to their pristine condition as possible. The Iberá macrosystem, located in Northeastern Argentina, constitutes one of the primary sources of potable surface water in the country, as well as the second most important wetland in Latin America. However, limited information is available on the elemental chemical composition of regional sediments. This work presents results of chemical variations that have occurred in recent years in the main lagoons of the Iberá Wetlands system. To this objective, the elemental chemical composition of the surface and deep sediments of two islands located in Laguna Trin was evaluated. The results indicate significant variations in the physical and chemical characteristics of the sediments in nearby areas, both temporally and spatially. This situation highlights the importance to continuing this type of study, mapping the geochemical history of the area.

Keywords: Wetlands, Sediment Chemistry, Historical Record, Metals, South America.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el interés por los humedales ha trascendido la esfera meramente ecológica. Investigadores de numerosas disciplinas (botánica, hidrología, geología, etc.) se han abocado al estudio de estos ecosistemas con un enfoque multidisciplinario, permitiendo comprender mejor los complejos servicios ecosistémicos que brindan, como así también su vulnerabilidad frente al cambio climático y las presiones antropogénicas. Del amplio abanico de servicios ambientales ofrecidos por estos ambientes naturales, podemos mencionar al abastecimiento de agua y alimentos, la regulación hídrica, la captura de carbono y la conservación de la biodiversidad, como así también ser soporte económico, cultural y recreativo del ser humano (Neiff, 2001; Neiff y Poi de Neiff, 2006; Szporak-Wasilewska et al., 2015). Por ello, en la mayoría de los casos, humedales de interés internacional funcionan como principal recurso económico de la región a través de la explotación agrícola, ganadera y ecoturística.

Los sedimentos constituyen un componente fundamental de los sistemas acuáticos, ya que intervienen en la dinámica hidrosedimentológica, la composición química del agua y los procesos biológicos. Su caracterización física, química y mineralógica proporciona información relevante para comprender el funcionamiento y la evolución ambiental de estos sistemas, particularmente en regiones de llanura (Suárez y Vega, 2017). Debido a que las actividades antrópicas pueden ser fuente de elementos potencialmente nocivos que llegan a los ecosistemas acuáticos, es relevante destacar que estos materiales tienden a acumularse en los sedimentos, en el suelo y la biota (Aycicek et al., 2008; Islam et al., 2015; Ahmed et al., 2017; Griboff et al., 2018; Abdel-Khalek et al., 2020; Fu y Zi, 2020; Mehar et al., 2023). La toxicidad de estos elementos depende de su especiación química como también del pH, potencial redox, contenido de materia orgánica y salinidad del ambiente. Es por ello que resulta urgente implementar monitoreos exhaustivos que evalúen el estado actual de los ecosistemas y sirvan de ayuda para tomar medidas preventivas y/o enmendadoras, en el marco de una gestión sustentable de estos recursos naturales. En este contexto, la Convención de RAMSAR ha remarcado la importancia de generar un inventario de humedales, como así también de mantener una evaluación y monitoreo activos, con el propósito de obtener suficiente información que pueda ser

utilizada para la correcta gestión de estos ambientes, con medidas que refuercen su conservación y uso racional (Convención de Ramsar, 2010; Benzaquen et al., 2020).

En este sentido, la transferencia de metales entre la columna de agua y las partículas de sedimento es considerada como uno de los fenómenos más importantes que ocurren en los sistemas acuáticos, pudiendo actuar los sedimentos como reservorios de iones metálicos, nutrientes y contaminantes en general. Weckström et al. (2017) mencionan que los cambios en la calidad del agua de una laguna modifican sus características químicas y minerales, y que a través del análisis de estos componentes en los sedimentos de fondo, puede obtenerse información sobre los cambios históricos de la calidad del agua. A su vez, Horowitz (1991) señala que los sedimentos ubicados a una cierta profundidad no se encuentran influenciados por las recientes alteraciones físicas ni químicas de superficie, por lo que pueden utilizarse como registro histórico de las condiciones hidroquímicas que han tenido lugar en el cuerpo de agua. El mismo autor consideró que las diferencias en la química composicional de los sedimentos comienzan a ser visibles a partir de los 8-10 cm por debajo de la superficie.

Investigaciones previas (Wu et al., 2001; Burton, 2002; Jin et al., 2006) señalan que los sedimentos, al actuar como aceptores finales de contaminantes, pueden funcionar incluso como fuentes secundarias de contaminación, al ser éstos ocasionalmente removilizados por procesos naturales o por actividad antrópica, devolviéndolos nuevamente a la columna de agua. Además, cabe mencionar que la contaminación de los sedimentos no solo podría deteriorar la calidad del recurso hídrico, sino que además aumenta las posibilidades de alteraciones en la dinámica de sedimentos, lo que conduce a importantes consecuencias ambientales, no solo por los posibles nutrientes y/o metales que podrían estar transportando, sino también por la contaminación que se genera a causa de los cambios en las tasas de sedimentación de los propios materiales detríticos (Suárez y Orfeo, 2015; Suárez et al., 2016).

Por su parte, Rahhou et al. (2023) evaluaron la cantidad y calidad de la materia orgánica acumulada en los sedimentos de fondo utilizando el índice orgánico. Este índice representa una medida integrada del estado orgánico del sedimento, que refleja la acumulación relativa de materia orgánica y

su grado de enriquecimiento con nitrógeno. A través de este índice, lograron identificar el importante rol que tienen los sedimentos en la retención de materia orgánica. Incluso Søndergaard et al. (2003) mencionan que, a pesar de las actividades de restauración, los sedimentos continúan durante años, actuando como reservorio o sumidero de contaminantes que liberan la carga acumulada a la columna de agua. Este fenómeno, conocido como “carga interna”, es utilizado tanto para nutrientes como para metales y expresa la posibilidad de que este reservorio acumulado en el sedimento pase al agua, por procesos físicos-químicos o biogeoquímicos, con la eventualidad de ocasionar el deterioro de la calidad del agua. En consecuencia, Rahhou et al. (2023) concluyen que los sedimentos deben utilizarse como una herramienta eficaz en la evaluación y la gestión sistemáticas, para garantizar la protección ambiental y la conservación del ecosistema de los humedales.

El sistema Iberá, si bien se encuentra dentro de un área protegida, que fuera declarada Reserva Natural en 1983 por la Ley Provincial N°3771, se encuentra influenciada por una intensa actividad antrópica, parte de la cual se lleva a cabo, incluso, dentro del área protegida. Borrego et al. (2003) mencionan a la producción de arroz, el turismo y el crecimiento demográfico como las potenciales fuentes de contaminación del agua de los Esteros del Iberá. Los mismos autores han identificado a pesticidas, materia orgánica, microorganismos patógenos, hidrocarburos y metales pesados como los contaminantes que eventualmente son introducidos al sistema por la actividad antrópica desarrollada, no sólo dentro de las áreas de reserva, sino también provenientes de áreas ubicadas en las regiones aledañas.

El arroz bajo riego es el cultivo anual de mayor importancia económica en la provincia de Corrientes, pero también es una de las principales actividades antrópicas que genera modificaciones del paisaje natural. La agricultura del arroz en la provincia de Corrientes se encuentra vinculada con la presencia de fertilizantes y pesticidas, encontrados de manera esporádica y aleatoria en aguas y sedimentos de diferentes lagunas y ríos pertenecientes al macrosistema del Iberá, superando en algunos casos los límites permisibles (Neiff y Poi de Neiff, 2006; Gariboglio et al., 2014; Roggiero et al., 2014; Zilio et al., 2017; Roggiero et al., 2017).

Por su parte, Roggiero et al. (2017) atribuyen a la actividad turística, de creciente explotación privada

a través del ecoturismo, una larga lista de impactos ambientales. El impacto conjunto de las diversas actividades humanas que se desarrollan en el entorno de los Esteros del Iberá amerita un estudio urgente que permita conocer en detalle las características actuales de la química de los sedimentos de esta reserva, que sirva como información de los niveles base para futuros estudios de evaluación de impacto ambiental.

En este contexto, numerosos proyectos se han llevado a cabo para caracterizar diferentes aspectos biológicos de este macrosistema (Arbo y Tressens, 2002; Almirón et al., 2003; Álvarez et al., 2003; Giraudo, 2003; Zalocar, 2003; Bechara, 2004; Bar et al., 2005; López et al., 2005; Úbeda et al., 2013; Vallejos, 2014; entre muchos otros), así como su hidroquímica, geología, gestión, entre otros (Blanco et al., 2002; Canziani et al., 2002; Angeleri et al., 2003; Lancelle, 2003; Orfeo, 2003; Poi de Neiff, 2003; Piccoli et al., 2020; etc.). Sin embargo, no se realizó hasta el momento ningún estudio de la química elemental de los sedimentos de la región que pueda relacionarse con las posibles variaciones químicas en la columna de agua, producto de las diversas actividades antrópicas desarrolladas en la región.

Por lo antes mencionado, el presente trabajo explora las características físicas y químicas de los sedimentos de fondo de dos islas ubicadas en la Laguna Trin, localizada en el centro sur de los Esteros del Iberá (Corrientes, Argentina). La hipótesis general plantea que la condición particular del relieve plano del Iberá lo hace muy sensible a los cambios ambientales y a la actividad antrópica, ejercida cerca y dentro de la Reserva Natural Iberá, generando alteraciones que pueden ser evaluadas a través de un análisis exhaustivo de los sedimentos de este sistema.

La información generada constituirá una línea inicial para la reconstrucción e interpretación del registro hidroquímico histórico del área de estudio, aportando información útil a los trabajos de conservación y uso sostenible de los humedales, que se llevan a cabo a través de la ejecución de la Ley General del Ambiente (Ley N°25675, 28 de noviembre de 2002) y la Convención sobre los Humedales aprobada por Ley N°23919 (t.o. Ley N°25335) (24 de abril de 1991).

Concretar este tipo de estudios es particularmente importante cuando tienen lugar sucesos ambientales

excepcionales, tales como los extensos incendios ocurridos en 2022 (más de 10000 km², según Saucedo et al., 2023) y 2023 en la región o las sequías prolongadas observadas en los últimos años en la región de los Esteros del Iberá, donde los efectos de la actividad antrópica se podrían potenciar ya que, como mencionan Neiff y Neiff (2013), la biota de estos esteros es más sensible a la falta de agua que a los excesos.

OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es lograr una exploración preliminar de las variaciones que ocurren en estos humedales naturales, a través de la comparación espacial y temporal de las características físico-químicas de los sedimentos depositados en estas islas. De manera complementaria, se propone lograr una primera aproximación a los factores que podrían explicar las variaciones observadas. De esta forma, se contribuye con información clave para determinar niveles base de concentraciones iónicas en sedimentos, establecer niveles de referencia de la zona y realizar comparaciones de las condiciones actuales del sistema Iberá, a la luz de los numerosos proyectos socioeconómicos y turísticos que se están desarrollando en la zona de influencia de esta reserva.

METODOLOGÍA

Área de estudio

Los Esteros del Iberá se localizan en el noreste de la República Argentina. Con una superficie total de 12300 km², constituyen el segundo humedal más importante del mundo y una de las principales fuentes superficiales de agua dulce del país (Cózar et al., 2003; Lancelle, 2003; Poi de Neiff, 2003). Comprenden principalmente ambientes palustres (esteros y bañados) que interconectan extensos lagos poco profundos, unidos por cursos de agua de distinto orden (Neiff y Poi de Neiff, 2006).

Estudios basados en la combinación de parámetros hidroquímicos han permitido identificar que la mayoría de las aguas subterráneas estudiadas en la zona representan mezclas de aguas de diferentes profundidades y formaciones geológicas debido a grandes fallas verticales (Manzano et al., 2013; Mira et al., 2013; Ortega et al., 2013; Rodríguez, 2018).

En el mismo sentido, se han registrado interacciones entre aguas subterráneas asociadas al Sistema Acuífero Guaraní (SAG) y aguas superficiales, posiblemente favorecidas por estructuras tectónicas regionales que facilitan el ascenso de flujos verticales (Ortega et al., 2013; Vives et al., 2020; Ortega et al., 2022).

Los suelos, frecuentemente orgánicos, casi siempre presentan la napa freática poco profunda, cuyo nivel varía según la época del año y los aportes hídricos que recibe (Escobar et al., 1990; Maccarini y Baleani, 1995; Matteucci, 2012).

Su patrón de paisaje, su origen, la hidroquímica, la inmensa riqueza de especies tanto vegetales como animales, su estado prístino y su posición biogeográfica hacen de los Esteros del Iberá un sistema único en América (Neiff, 2001). Biogeográficamente, la zona de estudio forma parte de la Región Neotropical, en el Dominio Chaqueño, Provincia Chaqueña y se encuentra en el interior del Distrito Oriental Chaqueño (Cabrera y Willink, 1980; Carnevali, 1994).

Por su parte, la Reserva Natural de los Esteros del Iberá abarca un área muy extensa, de la cual se seleccionaron para este trabajo dos islas ubicadas dentro de la Laguna Trin (28°39'55.77"S 57°50'00.12"W, Figura 1), a la que se accede a través del portal Carambolas. Las islas estudiadas son "El Disparito" y "El Ombucito", que distan aproximadamente 4.5 km una de la otra.

La isla "El Disparito" (28°39'26.3"S 57°49'30.4"W, Figura 1) es un terreno relativamente pequeño de tierra firme que representa uno de los sitios arqueológicos de mayor importancia para la historia del Iberá. De acuerdo a los estudios expeditivos de Mujica (1996; 2017) y Rodríguez (1995; 2008), en esta isla se encuentran valiosos restos arqueológicos (entre ellos un cementerio) que evidencian la ocupación humana, así como también gran diversidad de restos de mamíferos, reptiles, peces y conchillas de moluscos. Por su parte, la isla "El Ombucito" (28°38'46"S 57°46'52.4"W, Figura 1) presenta poca influencia antrópica, por lo que hace interesante la comparación para poder evaluar sus posibles impactos en el ambiente estudiado.

Materiales y métodos

En cada sitio seleccionado se tomaron muestras de sedimentos superficiales y profundos en la margen

de los mismos, en el momento en el cual la superficie emergida estaba en contacto con el agua. Los sedimentos fueron extraídos verticalmente mediante la utilización de sacatestigo (Livingston core sampler).

Las muestras de sedimentos se colocaron en bolsas rotuladas y se transportaron refrigeradas hasta el laboratorio de Sedimentología del Centro de Ecología Aplicada del Litoral (CONICET-UNNE), donde se llevaron a cabo las determinaciones analíticas.

Considerando que la composición química de los sedimentos ubicados a más de 10 cm de profundidad puede ser utilizada como valores base, se extrajeron sedimentos hasta 60 cm de profundidad. Resultaron así 7 sub-muestras por cada isla y se consideró como muestra superficial a la situada entre 0 y 10 cm de profundidad. De esta forma se obtiene perspectiva de la distribución espacial de los metales, al comparar los sedimentos superficiales de diferentes puntos de muestreo. Por su parte, la comparación de los sedimentos ubicados a diferentes profundidades permite establecer cambios históricos en las concentraciones de los metales asociados a ellos.

La humedad de las muestras se determinó gravimétricamente tras secado en la estufa a 105°C hasta peso constante. Se midió pH y conductividad eléctrica de cada muestra utilizando medidor multiparamétrico (HANNA HI 9811-5).

Posteriormente se realizó digestión ácida utilizando ácido nítrico según el United States Environmental Protection Agency (US EPA) (2007), el método 3051 y posterior medición de metales por espectrometría de absorción atómica (Perkin – Elmer 2380), para cuantificar el contenido de metales mayoritarios (Ca, Mg, Na, K, Fe, Cu, Mn y Zn). Los resultados se corrigieron teniendo en cuenta la humedad. Se realizó análisis granulométrico por medio de tamizado mecánico (Carver, 1971; Lafleur et al., 1980). Todos los resultados presentados se refieren a muestra seca.

Los resultados de pH, conductividad y contenidos de metales fueron analizados mediante técnicas estadísticas uni y multivariantes. El efecto del sitio de muestreo (isla) y de la profundidad del sedimento en la variabilidad de los parámetros estudiados se analizó mediante análisis de la varianza (ANOVA) de dos vías, empleando un nivel de significación del 5%. Las relaciones entre los parámetros analizados y las similitudes y diferencias entre las muestras, atendiendo a la profundidad y ubicación de los sedimentos, se visualizaron mediante (i) análisis en componentes principales (ACP) y (ii) análisis de conglomerados jerárquicos, empleando el método de agrupamiento de Ward (Ward, 1989; Ward, 1998; Ward et al., 1999) y la distancia euclidiana al cuadrado como medida de similitud. Todos los cálculos estadísticos se realizaron con el software Statgraphics 19.



Figura 1. Sitio de muestreo laguna Trin - isla El Disparito e isla El Ombucito - en la provincia de Corrientes (Argentina).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Abundancia granulométrica

Los diagramas triangulares de granulometría para las muestras recogidas en los sitios Isla El Ombucito e Isla El Disparito (Figura 2) indican predominio de sedimentos tamaño arena, con muy bajas proporciones de granos tamaño limo y arcilla (menos del 5% para ambas fracciones), en todas las profundidades analizadas. Por su parte, los resultados de los análisis de abundancia granulométrica indicaron mayor frecuencia de la fracción correspondiente a arena fina. Esta fracción se encuentra seguida en orden decreciente por las fracciones arenas medianas > arenas muy finas > arenas gruesas > limos gruesos > arena muy gruesa.

Considerando que los sitios de muestreo se encuentran dentro de la ecorregión “Esteros del Iberá” (Pereyra, 2003), cuyo origen se relaciona con los antiguos abanicos aluviales desarrollados por el río Paraná al ingresar en la llanura correntina durante el Plioceno (Orfeo, 2005; Orfeo, 2012; Orfeo, 2016; Santa Cruz et al., 2019), los datos granulométricos obtenidos son consecuentes. El río Paraná registra actualmente sedimentos de fondo de granulometría correspondiente a la fracción arena, con variaciones comprendidas entre arena mediana a fina (Orfeo, 2005; Orfeo, 2012; Orfeo, 2016).

De acuerdo a Santa Cruz et al. (2019), la única formación reconocida en la sub-región de los Esteros del Iberá es la Formación Ituzaingó (areniscas de edad plio-pleistocena), misma formación indicada para los depósitos aflorantes más antiguos del río Paraná.

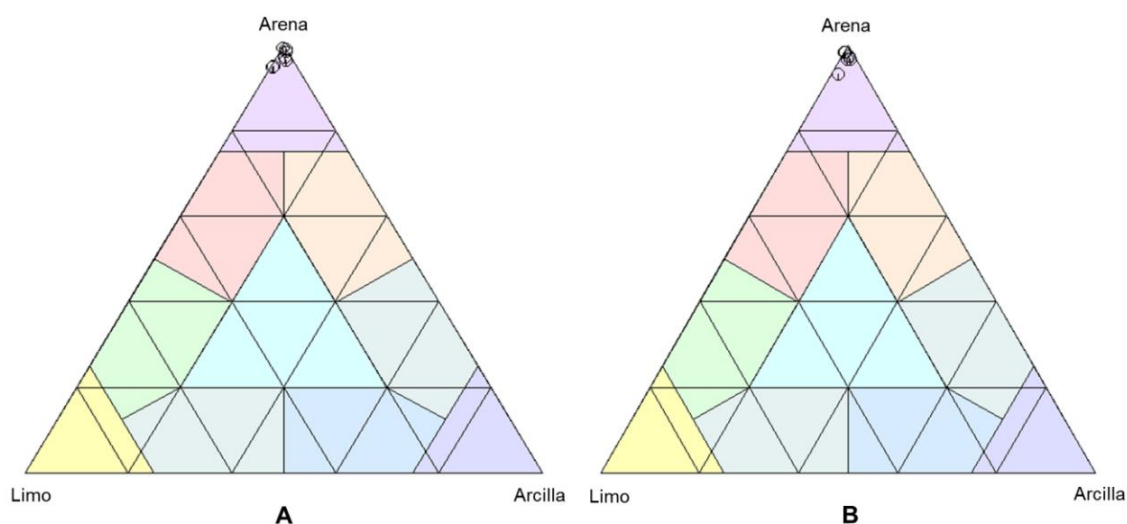


Figura 2. Diagrama de Shepard de las muestras colectadas en: (A) Isla El Ombucito y (B) Isla El Disparito.

Análisis de la composición físico-química de los sedimentos

La acidez, expresada como pH, de los sedimentos de fondo tomados en los 2 sitios de muestreo considerados se muestra en la Tabla 1. Los sedimentos de fondo de la Isla El Ombucito son débilmente ácidos, con valores que oscilaron entre 6.01 y 6.72, mientras que los sedimentos del sitio Isla El Disparito resultaron ligeramente alcalinos, con valores de pH entre 7.71 y 8.60. En cuanto a la conductividad eléctrica de los sedimentos de ambas localizaciones (Tabla 1), se observaron diferencias espaciales significativas, con valores entre 30 y 79

$\mu\text{S/cm}$ en la Isla El Ombucito, y valores superiores en Isla El Disparito, entre 64 y 128 $\mu\text{S/cm}$.

Cózar et al. (2003) registraron variaciones significativas de los valores de pH del agua al comparar diferentes sectores de la Laguna Iberá. El valor promedio de pH registrado por estos autores fue de 5.9 ± 0.4 en el sector sur y de 6.7 ± 1.4 en el sector norte, sin embargo, no registraron valores alcalinos. Neiff et al. (2020) mencionan que, si bien el agua en Iberá proviene de las precipitaciones locales, sus características químicas no se diferencian mayormente de las encontradas para el río Paraná, donde la conductividad eléctrica es baja y el pH varía

de ligeramente ácido a neutro. Los elevados aportes de materia orgánica que recibe el sistema justifican la acidez registrada en estos ambientes.

Por ello, los valores ligeramente alcalinos registrados para los sedimentos del sitio Isla El Disparito se encuentran discretamente fuera de los rangos esperados. Cabe destacar que el pH alcalino o ligeramente alcalino de los sedimentos tiende a sedimentar con mayor rapidez los metales pesados (López Jiménez et al., 2012), al favorecer los procesos de adsorción y precipitación de iones metálicos. Considerando el rol relevante que tiene el sedimento en los ecosistemas de los cuerpos de agua someros (Cózar et al., 2005; Scheffer, 1998, Carignan y Lorrain, 2000; Carignan y Vaithyanathan, 1999; Scheffer et al., 2003), se debe prestar particular atención a las regiones de los Esteros del Iberá donde predomina el pH alcalino y existe desarrollo de actividades antrópicas en las zonas aledañas. En este sentido, los sedimentos alcalinos podrían actuar como sumidero de metales tóxicos, eliminándolos del agua y acumulándolos. Esta situación representa riesgo en caso de la acidificación de las aguas

(consecuencia de cambios en las condiciones químicas o hidrológicas), puesto que los metales pueden ser liberados nuevamente a la columna de agua. Dadas las particulares características del ambiente, la acidificación del agua es un evento factible de ocurrir. Por lo antes mencionado, las diferencias espaciales observadas entre ambas islas en los valores de pH y conductividad, señalan además la necesidad de un análisis más detallado e integrado que además evalúe la interacción entre aguas superficiales y subterráneas. Estas interacciones se ven favorecidas por la escasa pendiente regional, que posibilita interconexiones dinámicas entre el nivel freático somero y los cuerpos de agua superficiales.

De los extractos obtenidos mediante digestión con ácido nítrico de las muestras de sedimento, se cuantificaron 8 iones metálicos. Posteriormente se determinaron parámetros estadísticos básicos para los datos analíticos de las concentraciones de metales en los sedimentos (Tabla 1), logrando así una exploración preliminar de la variación que presenta el conjunto de datos.

Tabla 1. Principales parámetros estadísticos de las variables físico-químicas de sedimentos de los sitios de muestreo.

	Unidad	Isla El Ombucito				Isla El Disparito			
		Media	Mediana	Desv. estándar	Rango	Media	Mediana	Desv. estándar	Rango
pH		6.37	6.30	0.26	0.71	8.08	8.03	0.31	0.89
CE	μS/cm	50.4	48.0	15.7	49.0	91.7	83.0	24.8	64.0
K	g/kg	0.92	0.88	0.49	1.47	1.47	1.59	0.44	1.32
Na	g/kg	0.13	0.07	0.16	0.46	0.22	0.17	0.15	0.42
Ca	g/kg	23.2	10.5	27.1	75.0	57.4	64.7	39.4	109.0
Mg	g/kg	2.6	2.4	1.3	3.6	1.8	1.4	0.7	1.8
Fe	g/kg	0.62	0.65	0.25	0.72	0.53	0.53	0.11	0.34
Cu	mg/kg	3.3	3.1	1.2	3.5	6.5	6.5	1.8	4.9
Mn	mg/kg	106	91	91	259	247	221	145	404
Zn	mg/kg	21.4	23.2	14.6	41.2	45.7	37.7	33.1	92.3

El valor promedio de la concentración de los iones analizados, indica el siguiente orden de abundancia para ambas islas: Ca>Mg>K>Fe>Na>Mn>Zn>Cu. Estos valores guardan relación con la caracterización hidroquímica realizada tanto para el agua superficial como subterránea de los Esteros del Iberá, donde las aguas superficiales son descritas como

principalmente bicarbonatadas cálcicas y bicarbonatadas sódicas (Ortega et al., 2013; Manzano et al., 2013). Esta correspondencia sugiere que los sedimentos conservan una impronta composicional vinculada al marco hidrogeoquímico regional. Sin embargo, las diferencias espaciales detectadas entre Isla El Ombucito e Isla El Disparito,

particularmente en los valores de pH y conductividad eléctrica, indican la posible intervención de procesos locales adicionales.

En el caso del agua subterránea, Manzano et al. (2013) señalan que, si bien no hay un patrón espacial definido, en la región centro, norte y noreste de los Esteros del Iberá dominan las aguas bicarbonatadas sódicas, asociadas a formaciones geológicas, mientras que al sur dominan las aguas de tipo bicarbonatadas cálcicas.

Calcio, magnesio y potasio son los tres elementos que registran las concentraciones medias más altas en los sedimentos de fondo de ambos sitios de muestreo. Estos iones desempeñan un papel significativo en la salinidad del suelo, al igual que el ion sodio. Por lo tanto, reviste especial interés mencionar que, en ambientes eutróficos, los sedimentos pueden actuar como fuente de calcio fácilmente solubilizable (Lazzaretti Ulmer y Hanselmann, 1999). Los valores del análisis químico de sedimentos, obtenidos en este trabajo, se correlacionan con la composición química del agua local, previamente mencionada. Santa Cruz et al. (2019) indicaron que los sedimentos que circundan la mayoría de los ambientes de los Esteros del Iberá corresponden a sedimentos finos con concreciones carbonáticas. En consecuencia, la elevada concentración del ion Ca en ambos sitios de muestreo puede tener un origen geológico.

De acuerdo a las concentraciones iónicas observadas en los sedimentos de fondo, los valores elevados de conductividad eléctrica observados en la isla El Disparito podrían atribuirse a los valores medios de calcio y el potasio. Estos elementos participan activamente en la salinización de los suelos y, por ende, es probable que estén definiendo esta característica en particular.

Por otra parte, si bien el manganeso es considerado un elemento traza esencial, también puede resultar tóxico en concentraciones elevadas. Su presencia en cuerpos de agua puede originarse tanto a través de aguas residuales domésticas como por el uso de fertilizantes (American Public Health Association, American Water Works Association y Water Environment Federation, 1998; Porta Casanellas et al., 2003). La Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (2003), ha propuesto un nivel guía de calidad de agua para el manganeso de ≤ 0.8 mg/l, con el fin de proteger la biota acuática, al observar las manifestaciones tóxicas en peces, crustáceos,

algas y plantas vasculares. En ambas islas se observa una mayor concentración de Mn en los estratos sedimentarios más profundos, con valores que superan en más del doble la media registrada. Sin embargo, en isla El Disparito la concentración media de este ion duplica la concentración registrada en isla El Ombucito, lo que pone de manifiesto la necesidad de considerar su seguimiento con estudios hidroquímicos.

Con respecto al cobre, la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (2005) indicó como nivel guía de calidad de agua para la protección de la biota acuática ≤ 0.95 $\mu\text{g/l}$, referido a la muestra de agua filtrada. Sin embargo, el criterio de máxima concentración para el cobre disuelto en agua dulce, determinado por Environmental Protection Agency (EPA) (2007) donde se utiliza el modelo de biodisponibilidad de metales, es de 2.337 $\mu\text{g/l}$. De acuerdo a lo expuesto por Herrera et al. (2013), el cobre que se registra en los sedimentos en ocasiones proviene de áreas adyacentes con explotación agrícola (por la utilización de fertilizantes ricos en Cu), que llega a los cuerpos de agua por el lixiviado de los suelos y se deposita posteriormente en los sedimentos. Por esta razón, y al notar la misma tendencia que con el ion Mn, de presentar en isla El Disparito una concentración media del doble registrado en isla El Ombucito, se repite la recomendación de realizar un seguimiento con estudios hidroquímicos.

Con el objetivo de comprobar el aporte de las diferentes fuentes de variación (sitios de muestreo / profundidad) a la variabilidad de los datos composicionales investigados en las muestras de sedimentos de las islas El Ombucito y El Disparito, se realizó un análisis de la varianza (ANOVA) de dos vías, cuyos resultados se visualizan en la Tabla 2. Dicha información representa una primera instancia al conocimiento del origen de las variaciones observadas en las variables analizadas. A través de esta herramienta se identificaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en los resultados experimentales entre los dos sitios de muestreo para las variables: pH, conductividad eléctrica y para los iones Ca, Cu, Mn y Zn. Mientras que, al considerar la profundidad como fuente de variación, se observan diferencias significativas en las concentraciones de Na, Ca y Mn.

En el mismo sentido, con el objetivo de analizar y visualizar las relaciones entre las múltiples variables estudiadas, se emplearon dos técnicas estadísticas

multivariantes: análisis de conglomerados jerárquicos y análisis en componentes principales. El análisis de conglomerados permite clasificar los objetos (muestras) en base a similitudes composicionales. En este trabajo se utilizó el algoritmo de Ward como método de agrupamiento jerárquico aglomerativo, en combinación con la distancia Euclídea al cuadrado como medida de similitud. Los dendrogramas resultantes de los análisis de conglomerados para muestras y variables fueron complementados con un mapa de calor elaborado con Matlab R2023 a partir de valores estandarizados de las variables. En el dendrograma obtenido de las variables investigadas (Figura 3) se observan tres grupos, el primer agrupamiento (V1) comprende los grupos formados por pH, CE y los iones Cu y K; agrupados a cierta distancia se encuentran los elementos Na, Ca, Mn y Zn. Mientras que el tercer agrupamiento (V2) comprende las variables Mg y Fe. Estas asociaciones coinciden

aproximadamente con las correlaciones más significativas entre las variables.

Tabla 2. Fuentes de variación significativa para las variables físico-químicas determinadas en los sedimentos de fondo mediante ANOVA.

	Fuente de variación	
	Sitio	Profundidad
pH	0.0000	0.6090
CE	0.0196	0.8265
K	0.1430	0.9818
Na	0.0728	0.0143
Ca	0.0115	0.0215
Mg	0.1702	0.3934
Fe	0.3138	0.1925
Cu	0.0236	0.9579
Mn	0.0094	0.0361
Zn	0.0450	0.1022

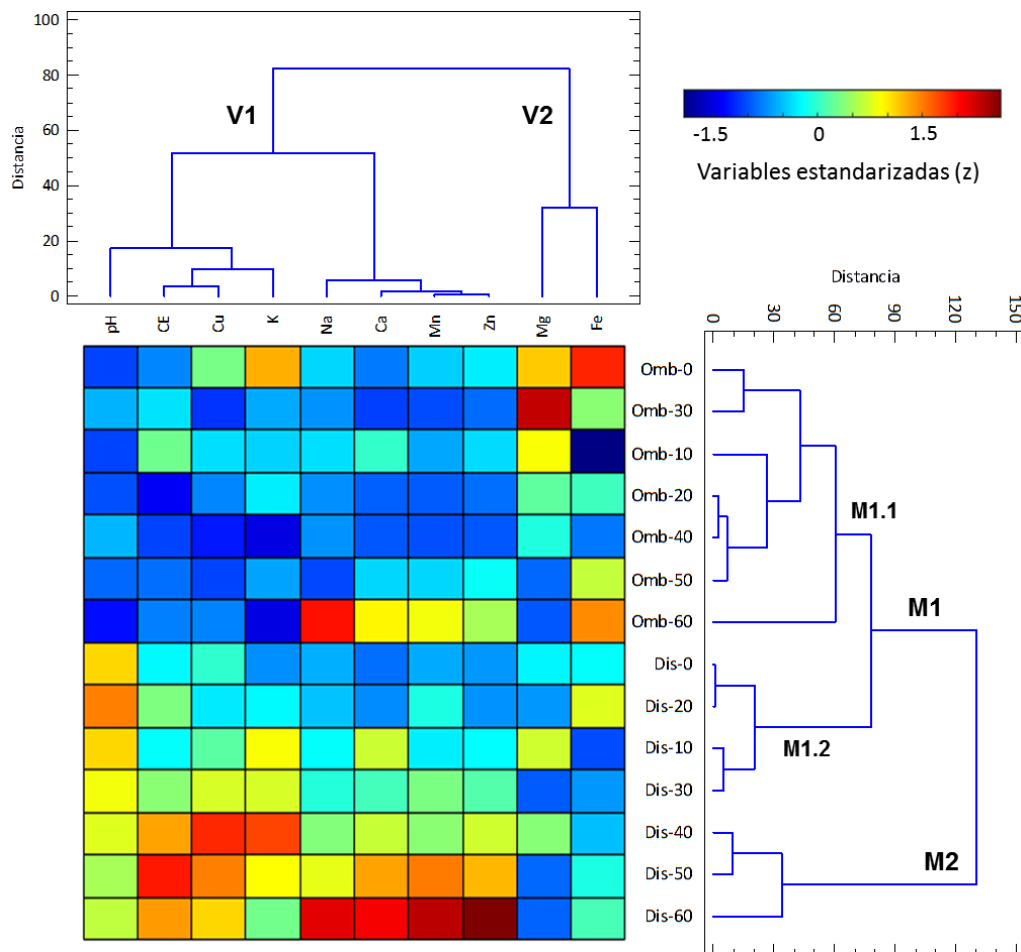


Figura 3. Dendrogramas de muestras y variables obtenidos por análisis de conglomerados jerárquicos (método de Ward y distancia euclídea al cuadrado) complementados con mapa de calor.

Por su parte, el dendrograma de objetos (muestras) indica diferencias composicionales apreciables entre las dos islas consideradas en este trabajo. Al mismo tiempo, se puede observar que para el sitio El Disparito, los sedimentos superficiales y hasta 30 cm de profundidad se agrupan por separado (M1.2) de los sedimentos más profundos (M2). Esto brinda evidencia a favor de la hipótesis que sugiere la existencia de diferencias significativas en la dimensión vertical superficial en este sitio de muestreo.

La interpretación conjunta de los dos dendrogramas se puede realizar fácilmente con el mapa de calor (Figura 3), en el que los colores azules representan los valores de la variable por debajo de la media, tendiendo a tonos rojos cuando aumenta la magnitud del parámetro.

Las relaciones más claras se observan entre V1 y M2. Las muestras que pertenecen al segundo grupo se definen por tener una alta conductividad eléctrica (CE) y las concentraciones más elevadas de Cu y K, así como Na, Ca, Mn y Zn. El grupo de muestras M1 está definido por variables que pertenecen tanto a V1 como a V2: el grupo de muestras M1.1 (sedimentos de isla El Ombucito) presenta elevadas concentraciones de Mg y Fe de la V2 en casi todas las profundidades, excepto los sedimentos más profundos (60 cm) que están definidos por el ion Na. En menor medida, algunas muestras de M1.1 parecen estar controladas por la variable K de la V1. Por su parte las muestras del grupo M1.2 parecen estar relacionadas en parte con el pH.

Posteriormente, a través del análisis en componentes principales (ACP) se pretendió visualizar más claramente las interacciones existentes entre las variables analizadas en los sedimentos de ambas islas y las fuentes de variación. La aplicación del método de análisis en componentes principales permitió concentrar la información del conjunto de datos experimentales en únicamente tres nuevas variables o componentes principales (CP), que son combinaciones lineales de las variables originales y que explican el 84.6% de la varianza total del conjunto de datos experimentales.

La Tabla 3 recoge las cargas de los tres CP retenidos, sus valores propios, así como el porcentaje de varianza explicada por cada factor y la varianza acumulada. En negrita se han resaltado las variables que más contribuyen a cada uno de los nuevos CP. El CP1 explica el 55.1% de la varianza total de los datos, y el CP2 explica un 19.0%

adicional, de tal forma que entre estos dos factores explican el 74.1% de la varianza total de la tabla original de datos y, por tanto, su representación conjunta permitirá visualizar y extraer la mayor parte de la información de la matriz de datos original. Se advierte que CP1 se encuentra correlacionado positivamente con la CE y la concentración de los iones Na, Ca, Cu, Mn y Zn, mientras que el CP2 se asocia al pH de forma positiva y a la concentración de K. Los iones Mg y Fe, que aparecían agrupados en el análisis de conglomerados, aparecen agrupados aquí en el CP3, que explica el 10.5% de la variabilidad total de la matriz de datos experimentales.

Tabla 3. Cargas de las 10 variables originales en los 3 CP obtenidos por ACP de los datos de sedimentos.

Variables	CP1	CP2	CP3
pH	0.489	0.542	-0.364
CE	0.863	0.339	-0.060
K	0.545	0.628	0.473
Na	0.795	-0.500	0.062
Ca	0.918	-0.197	-0.041
Mg	-0.494	0.435	0.509
Fe	-0.061	-0.540	0.620
Cu	0.851	0.431	0.187
Mn	0.949	-0.297	0.010
Zn	0.937	-0.238	0.086
Valor Propio	5.51	1.90	1.05
% Varianza	55.05	19.03	10.51
Var. Acumulada	55.1	74.1	84.6

La Figura 4 muestra el gráfico de cargas (derecha), es decir, la representación de las variables originales en el espacio bidimensional definido por los dos primeros componentes principales, CP1 y CP2. En el gráfico de puntuaciones de los sitios de muestreo (izquierda) se observan dos grupos bastante bien definidos, debido principalmente al CP1, donde las muestras del sitio Isla El Disparito poseen valores más altos de pH, CE, K y Cu.

Las muestras más profundas (60 cm) de ambos sitios de muestreo poseen CP1 positivo, pero CP2 negativo, con mayores aportes de Ca, Na, Zn y Mn. Por su parte, la mayor parte de las muestras de la Isla El Ombucito poseen CP1 negativo, con mayores aportes de Mg y Fe que el resto de las muestras analizadas.

Si bien se identifican tres grupos principales de variables, como se observó previamente en el análisis de conglomerados, con esta herramienta visual se logra diferenciar que, si bien el Fe y el Mg tienen ambos CP1 negativo, en CP2 tienen diferente aporte, Mg es positivo y Fe aporta negativamente, estando estas variables agrupadas en CP3, como muestra la Tabla 3.

Queda claro así que la configuración geomorfológica favorece la interacción entre el nivel freático, los cuerpos de agua superficiales y del agua

subterránea (Ortega et al., 2013; Ortega et al., 2022). Bajo este esquema, pequeñas diferencias microtopográficas entre ambas islas podrían condicionar la profundidad relativa del nivel freático o la intensidad de descarga sub-superficial, incidiendo en la composición química del sedimento. No obstante, el presente estudio no incluyó mediciones piezométricas ni determinaciones directas del nivel freático local, por lo que la influencia del flujo sub-superficial se plantea como hipótesis interpretativa sustentada en antecedentes regionales.

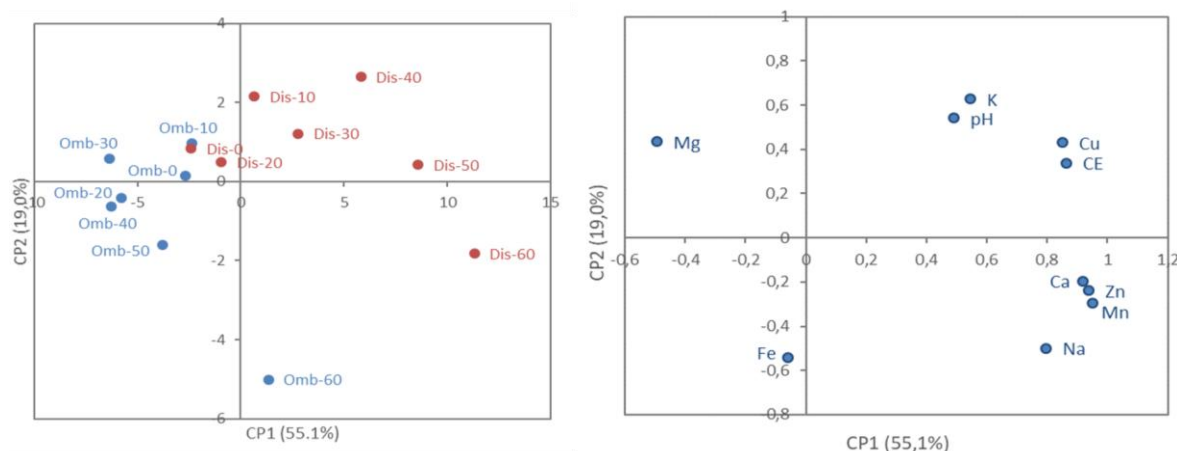


Figura 4. Gráfico de puntuaciones por punto de muestreo y a diferentes profundidades (izquierda) y gráfico de cargas de las variables (derecha).

CONCLUSIONES

En este trabajo se estudiaron los sedimentos de dos islas ubicadas en la Laguna Trin, en un área de la reserva natural del Sistema Iberá. El estudio consistió en evaluar las características físico-químicas y granulométricas de los materiales depositados en la parte inundada de las islas El Ombucito y El Disparito, a diferentes profundidades.

La distribución granulométrica de las partículas de los sedimentos analizados fue similar en ambas islas y a todas las profundidades, donde predominan los granos tamaño arenas finas. En cuanto al análisis de la concentración de los iones mayoritarios en los sedimentos, se observaron similitudes en el orden de abundancia de metales, pero con concentraciones apreciablemente más altas en la isla El Disparito. En este sitio, además, se registraron los valores de conductividad eléctrica más elevados y un pH levemente alcalino, lo que resalta una diferencia notable no solo con los valores observados en la isla

El Ombucito, sino también con estudios previos tanto para el macrosistema Iberá como para regiones aledañas. Mediante la aplicación de análisis estadísticos, se identificaron, además, diferencias composicionales significativas entre ambas islas y en función de la profundidad. El análisis en componentes principales y el análisis de conglomerados han permitido identificar dos situaciones diferenciales. Primero, que los sedimentos más profundos presentan una composición similar en ambas islas, que los diferencia de los sedimentos más superficiales. Segundo, que la mayor parte de los sedimentos superficiales generan dos agrupamientos, por una parte, los de isla El Ombucito y por otra parte los de isla El Disparito, indicando claras diferencias composicionales entre ambas islas estudiadas.

Los resultados presentados en este trabajo sobre el registro histórico geoquímico del sistema Iberá son inéditos y de importancia para estudios de gestión, niveles base y contaminación, entre muchos otros.

La información de base aquí generada, donde se observan variaciones en la concentración de metales en los sedimentos de dos sectores tan cercanos, señala la necesidad de continuar con este mapeo químico en más sectores de los Esteros del Iberá. Futuros estudios que incorporen monitoreo de niveles freáticos y caracterización hidroquímica conjunta permitirán además evaluar cuantitativamente las posibles vinculaciones.

De este modo se logrará comprender mejor el origen de estas importantes variaciones, entendiendo que estos cuerpos de agua se encuentran influenciados por actividades antrópicas que podrían alterar la calidad del agua y, con ello, poner en riesgo la biota.

FINANCIAMIENTO

18Q003. Caracterización Física y Química de los sedimentos y aguas de lagunas de la margen occidental del Sistema Iberá. Secretaría General de Ciencia y Técnica – Universidad Nacional del Nordeste (SGCyT-UNNE).

REFERENCIAS

- Abdel-Khalek, A. A., Badran, S. R. y Marie, M. A. S. (2020). The efficient role of rice husk in reducing the toxicity of iron and aluminum oxides nanoparticles in *Oreochromis niloticus*: hematological, bioaccumulation, and histological endpoints. *Water, Air, and Soil Pollution*, 231(2), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-4424-2>
- Ahmed, Q., Ali, Q. M. y Bat, L. (2017). Assessment of heavy metals concentration in holothurians, sediments and water samples from coastal areas of Pakistan (northern Arabian Sea). *Journal of Coastal Life Medicine*, 5(5), 191–201. <https://doi.org/10.12980/jclm.5.2017j7-56>
- Almirón, A., Casciotta, J., Bechara, J., Roux, P., Sanchez, S. y Toccalino, P. (2003). La ictiofauna de los esteros del Iberá y su importancia en la designación de la reserva como sitio Ramsar. En B. B. Álvarez (ed.), *Fauna del Iberá*. Editorial de la Universidad Nacional del Nordeste Corrientes: 1-10. Argentina. <https://naturalis.fcny.unlp.edu.ar/handle/628872547/52312>
- Álvarez, B. B., Aguirre, R., Céspedes, J., Hernando, A. y Tedesco, M. E. (2003). Herpetofauna del Iberá. En B. B. Álvarez (ed.), *Fauna del Iberá*. Editorial de la Universidad Nacional del Nordeste Corrientes, 99-178. Corrientes. Argentina.
- American Public Health Association, American Water Works Association y Water Environment Federation (1998). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 20ª edición. American Public Health Association, Washington, D.C. <https://agris.fao.org/search/en/providers/122535/records/65dde1ac4c5aef494fd66a6b>
- Angeleri, J. L., Blanco, D. E., Canziani, G., Ferrati, R., Fulquet A. y Neiff, J. J. (2003). El aumento del agua en los Esteros del Iberá y la ausencia de una respuesta institucional. *La Ley. Suplemento de Derecho Ambiental*, 10, 1:6. Buenos Aires.
- Arbo, M. M. y Tressens, S. G. (2002). *Flora del Iberá*. EUDENE, 613p. Corrientes, Argentina.
- Aycicek, M., Kaplan, O. y Yaman, M. (2008). Effect of cadmium on germination, seedling growth and metal contents of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Asian Journal of Chemistry*, 20(4), 2663-2672. <https://asianpubs.org/index.php/ajchem/article/view/12618>
- Bar, M. E., Damborsky, M. P., Ávalos, G., Monteresino, E. y Oscherov, E. B. (2005). Fauna de Arthropoda de la Reserva Iberá, Corrientes, Argentina. *Temas de la Biodiversidad del Litoral fluvial argentino II. INSUGEO, Miscelánea 14*, 293-310. <https://www.insugeo.org.ar/publicaciones/docs/misc-14-23.pdf>
- Bechara, J. (2004). *Caracterización de la fauna ictica y elaboración de pautas para el Plan de Manejo*. 4º Informe de avance, INICNE/Universidad Nacional del Nordeste, PNUD ARG 02 G35, 5p.
- Benzaquen, L., Lingua, G., Lacoste, F. F. y González Trilla, G. (2020). *Documento marco para el desarrollo del Inventario Nacional de Humedales de Argentina*. Secretaría de Política Ambiental en Recursos Naturales, Dirección Nacional de Gestión Ambiental del Agua y los Ecosistemas Acuáticos, Buenos Aires. Argentina. <https://www.senado.gob.ar/upload/archivo/48226>
- Blanco, D., Parera, A. y Acerbi, M. (2002). *La inundación silenciosa. El aumento de las aguas en los esteros del Iberá: la nueva amenaza de la represa Yacyretá*. Fundación Vida Silvestre Argentina, 56 p. Buenos Aires. Argentina.
- Borrego, C., Boia, C., Martins, J. M., Silva, C., Neves, P., Valente, J., Lopes, M. y Carvalho, A. C. (2003). Impactos ambientales químicos y monitoreo. En Canziani, G., Rossi, C., Loiselle, S. y Ferrati, R. (eds.), *Esteros de Iberá*. Informe del Proyecto “El manejo sustentable de los Recursos de Humedales en el Mercosur”. Fundación Vida Silvestre Argentina, Buenos Aires. Argentina.

- Burton, G. A. (2002). Sediment quality criteria in use around the world. *Limnology*, 3(2), 65-76. <https://doi.org/10.1007/s102010200008>
- Cabrera, A. L. y Willink, A. (1980). *Biogeografía de América Latina*. Programa Regional de los Científicos y Tecnología, Washington, Estados Unidos.
- Canziani, G., Rossi, C., Loiselle, S. y Ferrati, R. (2002). *Esteros de Iberá*. Informe del Proyecto "El manejo sustentable de los Recursos de Humedales en el Mercosur". Fundación Vida Silvestre Argentina, Buenos Aires.
- Carignan, R. y Lorrain, S. (2000). Sediment dynamics in the fluvial lakes of the St. Lawrence River: accumulation rates and characterization of the mixed sediment layer. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 57(S1), 63-77. <https://doi.org/10.1139/f99-246>
- Carignan, R. y Vaithyanathan, P. (1999). Phosphorus availability in the Paraná floodplain lakes (Argentina): Influence of pH and phosphate buffering by fluvial sediments. *Limnology and Oceanography*, 44, 1540-1548. <https://doi.org/10.4319/lo.1999.44.6.1540>
- Carnevali, R. (1994). *Fitogeografía de la Provincia de Corrientes*. 324p. Gobierno de la Provincia de Corrientes, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Argentina.
- Carver, R. (1971). *Procedures in Sedimentary Petrology*. Wiley Interscience, 653p. New York.
- Convención de Ramsar (2010). *Uso racional de los humedales: Conceptos y enfoques para el uso racional de los humedales*. Manuales Ramsar para el uso racional de los humedales, 4ª ed., vol. 1, Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland, Suiza. <http://www.ramsar.org/sites/default/files/document/s/pdf/lib/hbk4-01sp.pdf>
- Cózar, A., Gálvez, J. A., Hull, V., García, C. M. y Loiselle, S. A. (2005). Sediment resuspension by wind in a shallow lake of Esteros del Iberá (Argentina): a model based on turbidimetry. *Ecological Modelling*, 186(1), 63-76. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.01.020>
- Cózar, A., García, C. y Gálvez, J. (2003). Limnología de las Lagunas Iberá y Galarza. En Canziani, G., Rossi, C., Loiselle, S. y Ferrati, R. (eds.), *Los Esteros del Iberá*. Informe del Proyecto "El Manejo Sustentable de Humedales en el Mercosur". Fundación Vida Silvestre Argentina, 117-142, Buenos Aires.
- Environmental Protection Agency (2007). *Aquatic life ambient freshwater quality criteria – copper. Revision*. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Office of Science and Technology, 266p. Washington, DC.
- Escobar, E., Ligier, H. y Mateio, H. (1990). Los suelos de Corrientes. En *Atlas de suelos de la República Argentina*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Buenos Aires.
- Fu, Z. y Xi, S. (2020). The effects of heavy metals on human metabolism. *Toxicology Mechanisms and Methods*, 30(3), 167-176. <https://doi.org/10.1080/15376516.2019.1701594>
- Gariboglio, C. I., Rujana, M. R., Andisco, C. B. y Vázquez, F. A. (2014). *Evaluación de calidad de aguas vinculada con la actividad arrocerá en cuencas hídricas de la Provincia de Corrientes*. IFRH, Segundo Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos, Corrientes.
- Giraud, A. R. (2003). Avifauna. En Álvarez, B. B. (ed.), *Fauna del Iberá*. EUDENE, 181-307, Corrientes, Argentina.
- Griboff, J., Horacek, M., Wunderlin, D. y Monferran, M. (2018). Bioaccumulation and trophic transfer of metals, As and Se through a freshwater food web affected by anthropic pollution in Córdoba, Argentina. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 148, 275-284. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.10.028>
- Herrera, J., Rodríguez, J., Coto, J., Salgado, V. y Borbón, H. (2013). Evaluación de metales pesados en los sedimentos superficiales del río Pirro. *Tecnología en Marcha*, 26(1), 27-36. <https://doi.org/10.18845/tm.v26i1.1119>
- Horowitz, A. J. (1991). *A primer on trace metal-sediment chemistry*. 2ª ed., U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2277, 136 p.
- Islam, M. S., Ahmed, M. K., Habibullah-Al-Mamun, M. y Hoque, M. F. (2015). Preliminary assessment of heavy metal contamination in surface sediments from a river in Bangladesh. *Environmental Earth Sciences*, 73, 1837-1848. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3538-5>
- Jin, X. C., Wang, S. R., Pang, Y. y Wu, F. C. (2006). Phosphorus fractions and the effect of pH on the phosphorus release of the sediments from different trophic areas in Taihu Lake, China. *Environmental Pollution*, 139(2), 288-295. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.05.010>
- Lafleur, A. E., Marea Llanos, M. y Santa Cruz, J. N. (1980). *Métodos granulométricos y determinaciones texturales. Normas y procedimientos*. Instituto Nacional de Ciencia y Tecnología Hídricas, 9-20, Buenos Aires, Argentina.
- Lancelle, H. (2003). Características físicas y químicas de las aguas del Iberá. En Poi de Neiff,

- A. (ed.), *Limnología del Iberá*. EUDENE, 71-85, Corrientes, Argentina.
- Lazzaretti Ulmer, M. A. y Hanselmann, K. W. (1999). Seasonal variation of microbially regulated buffering capacity at sediment-water interface in a freshwater lake. *Aquatic Sciences*, 61, 59-74. <https://doi.org/10.1007/s000270050052>
- Ley N°25675 (28 de noviembre de 2002). *Ley General del Ambiente*. Boletín Oficial de la República Argentina, N°30036. <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/norma-79980/texto>
- Ley N°23919 (t.o. Ley N°25335) (24 de abril de 1991). *Convención sobre los Humedales*. Boletín Oficial de la República Argentina, N°29526. <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/64959/texto>
- López Jiménez, M. A., Monks, S., Serrano, A., Pulido Flores, G., Gaitán Oyarzun, J. C. y López Ortega, M. (2012). Dinámica de las variables físicoquímicas del sedimento de la laguna de Tampamachoco, Veracruz, México. *Revista Científica UDO Agrícola*, 12(4), 965-972. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6104332>
- López, H. L., Miquelarena, A. M. y Ponte Gómez, J. (2005). Biodiversidad y distribución de la ictiofauna mesopotámica. En Aceñolaza, F. G. (coord.) *Temas de la biodiversidad del Litoral Fluvial Argentino II*. INSUGEO, Miscelánea 14, 311-354, Tucumán. Argentina.
- Maccarini, G. D. y Baleani, O. (1995). *Atlas de suelos de la República Argentina*. Instituto de Suelos, INTA, Aeroterra SA., Fundación ArgenINTA, Buenos Aires.
- Manzano, M., Rodríguez, L., Vives, L., Ortega, L., Heredia, J., Mira, A., Nittman, J., Valladares, A., Araguás, L. y Aggarwal, P. (2013). Caracterización hidroquímica e isotópica de las aguas subterráneas del entorno de los Esteros de Iberá (Corrientes, Argentina). En González, N. et al. (eds.), *Agua subterránea, recurso estratégico*. Tomo II. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (Edulp), 43-51, La Plata. Argentina.
- Matteucci, S. D. (2012). Ecorregión Esteros del Iberá. En Morello, J.; Matteucci, S. D.; Rodríguez, A. F. y Silva, M. E. (eds.). *Ecorregiones y complejos ecosistémicos argentinos*. Orientación Gráfica Editora, 293-308, Buenos Aires, Argentina.
- Mehar, S., Anam, I., Masood, Z., Alvi, S., Khan, W., Kabir, M., Shahbaz, M. y Khan, T. (2023). Bioaccumulation of heavy metals in the different tissues of mackerel scad, *Decapterus macarellus* (Cuvier, 1833) collected from Karachi and Gwadar coasts of Pakistan. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 30(2), 103540. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.103540>
- Mira, A., Rodríguez, L., Veroslavsky, G. y Vives, L. (2013). *Actualización del modelo hidrológico conceptual del SAG y la influencia geológica del sector argentino*. VIII Congreso Argentino de Hidrogeología, La Plata, Argentina.
- Mujica, J. I. (1996). *Sitios arqueológicos en los esteros del Iberá-Corrientes*. Actas del XVI Encuentro de Geohistoria Regional, 135-148, Gobernador Virasoro.
- Mujica, J. I. (2017). *Rescate de un cementerio indígena en isla Disparito - laguna Trim - Iberá*. XVII Congreso de Historia de la Provincia de Corrientes, Empedrado.
- Neiff, J. J. (2001). Humedales de la Argentina: sinopsis, problemas y perspectivas futuras. En Cirelli, A. F. (ed.), *El Agua en Iberoamérica. Funciones de los humedales, calidad de vida y agua segura*. Publ. CYTED, 83-112, Madrid. España.
- Neiff, J. J. y Neiff, M. (2013). *Evaluación de los impactos del cambio climático sobre el ecosistema natural y la biodiversidad. Esteros del Iberá (Argentina)*. CEPAL, Serie Medio Ambiente y Desarrollo 152, Santiago de Chile.
- Neiff, J. J. y Poi de Neiff, A. S. G. (2006). Situación ambiental en la ecorregión Iberá. En *La Situación Ambiental Argentina*. Fundación Vida Silvestre Argentina, 177-184, Buenos Aires. Argentina.
- Neiff, J. J., Casco, S. L., Cózar Cabañas, A., Poi, A. S. G., Úbeda, B., Ricaurte, L. F. y Menciondo, E. M. (2020). Connectivity of river floodplains – The case of Ibera Wetlands after 10,000 years of isolation from Paraná River. *Wetland Science & Practice*, 267-282.
- Orfeo, O. (2003). *Geología del macrosistema Iberá*. Jornadas Iberá, un patrimonio nuestro. FACENA, Universidad Nacional del Nordeste, Corrientes.
- Orfeo, O. (2005). Historia Geológica del Iberá, Provincia de Corrientes, como escenario de biodiversidad. En Aceñolaza, F. (comp.), *Temas de la biodiversidad del Litoral Fluvial Argentino II*. INSUGEO, Miscelánea 14, 71-78, Tucumán. Argentina.
- Orfeo, O. (2012). Las aguas brillantes de Corrientes. *El Ojo del Cóndor*, 2, 7-9, Instituto Geográfico Nacional, Buenos Aires. Argentina. https://www.ign.gob.ar/descargas/elojodelcondor/Ojo_del_Condor_02.pdf
- Orfeo, O. (2016). Esteros del Iberá. En *Diccionario histórico de las Ciencias de la Tierra en Argentina*. Museo de La Plata, Protohistoria Ediciones, 147-149, La Plata.

- Ortega, L., Manzano, M., Rodríguez, L., Vives, L., Mira, A., Heredia, J., Araguás, L. y Aggarwal, P. (2013). Relaciones entre aguas superficiales y subterráneas en la región hídrica de los Esteros del Iberá (Corrientes, Argentina). En González, N. et al. (eds.), *Temas actuales de la hidrología subterránea*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EduLP), 205-212, La Plata. Argentina. <https://libros.unlp.edu.ar/index.php/unlp/catalog/view/228/204/679-1>
- Ortega, L., Miller, J., Araguás-Araguás, L., Zabala, M. E. Vives, L., Mira, A., Rodríguez L., Heredia, J., Armengol, S. y Manzano, M. (2022). Unravelling groundwater and surface water sources in the Esteros del Iberá Wetland Area: An isotopic approach. *Science of the Total Environment*, 846, 157475. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157475>
- Pereyra, F. X. (2003). *Ecoregiones de la Argentina*. Anales, 37, 208 p. Servicio Geológico Minero Argentino, Buenos Aires. Argentina. <https://repositorio.segemar.gov.ar/handle/308849217/2953>
- Piccoli, C., Barboza, M. C., Ávila, J. D., Gallego, O. F., Carvallo, M., Pusterla, S., Torri, M., Contreras, F. I., Zilli, F., Martínez, S. A., Cuaranta, P., Contreras, S., Saucedo, O., Monferran, M. D., Fernández-Pacella, L., Cabaleri, N. G. y Weibel, F. (2020). El sitio isla Disparo (Iberá, Corrientes). Aportes a la arqueología del Chaco húmedo (Argentina). *Revista del Museo de La Plata*, 5(2). La Plata. <https://doi.org/10.24215/25456377e137>
- Poi de Neiff, A. (2003). *Limnología del Iberá, Corrientes*. EUDENE, 191 p. Corrientes.
- Porta Casanellas, J., López-Acevedo, M. y Roquero, C. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. 3ª ed., Ediciones Mundi-Prensa, 960 p., Madrid. España.
- Rahhou, A., Layachi, M., Akodad, M., El Ouamari, N., Aknaf, A., Skalli, A., Loukili, H., Bernichi, Y., Oudra, B. y Baghour, M. (2023). Assessment of old eutrophication in the sediments of Marchica Lagoon (a post-restored lagoon, Mediterranean): The role of geochemistry and granulometry of the sediments. *Soil and Water Research*, 18(3), 169–180. <https://doi.org/10.17221/142/2022-SWR>
- Rodríguez, J. A. (1995). Nuevos aportes para la arqueología de la provincia de Corrientes. *Revista del Museo de Historia Natural de San Rafael*, 27(1-4), 83-102.
- Rodríguez, J. A. (2008). Arqueología de humedales en la Provincia de Corrientes (Argentina). En Loponte, D. M. y Acosta, A. (comps.), *Entre la tierra y el agua. Arqueología de humedales de Sudamérica*, 165-190. AINA, Buenos Aires.
- Rodríguez, L. (2018). Interacción humedal-agua subterránea-composición química de las aguas: Esteros del Iberá y Bajos Submeridionales. En *Agua + Humedales* (Serie Futuros). Universidad Nacional de San Martín y Fundación Innovación Tecnológica (FUNINTEC). Programa Futuros. Escuela de Posgrado. UNSAM Edita, Buenos Aires.
- Roggiero, M., Zamponi, A. y Zilio, M. C. (2014). Impacto de las actividades económicas en el Iberá en tiempos de la globalización. *X Jornadas de Investigación en Geografía*, 15 al 17 de octubre de 2014, Santa Fe, Argentina. En Memoria Académica. http://www.memoria.fahce.unlp.edu.ar/trab_evento/ev.13853/ev.13853.pdf
- Roggiero, M., Zamponi, A. y Zilio, M. C. (2017). Impactos ambientales. En Vallejos, V. y Pohl Schnake, V. (coords.), *Ñande Ivera (Nuestro Iberá). Encrucijadas hacia un destino de enajenación de los Esteros*, 365-387. Moglia Ediciones – FaHCE-UNLP, Corrientes-La Plata. <https://www.memoria.fahce.unlp.edu.ar/libros/pm.491/pm.491.pdf>
- Santa Cruz, J. N., Orfeo, O. y Gulisano, F. (2019). *Geología de la provincia de Corrientes, Argentina y cuencas geotectónicas relacionadas*. Moglia Ediciones, Corrientes. Argentina.
- Saucedo, G. I., Perucca, A. R., Kurtz, D. B. (2023). Las causas de los incendios de principios del año 2022 en la provincia de Corrientes. *Ecología Austral*, 33(1), 273-284. <https://doi.org/10.25260/EA.23.33.1.0.2020>
- Scheffer, M. (1998). *Ecology of shallow lakes*. Chapman & Hall, 357p. ISBN 0-412-74920-3. London. [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(00\)00103-0](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(00)00103-0)
- Scheffer, M., Portielje, R. y Zambrano, L. (2003). Fish facilitate wave resuspension of sediment. *Limnology and Oceanography*, 48(5), 1920-1926. <https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.5.1920>
- Søndergaard, M., Jensen, J. P. y Jeppesen, E. (2003). Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes. *Hydrobiologia*, 506, 135–145. <https://doi.org/10.1023/B:HYDR.0000008611.12704.dd>
- Suárez, P. y Orfeo, O. (2015). Agregación de sedimentos en una cuenca de llanura: utilización del microscopio electrónico de barrido como herramienta de evaluación. *Estudios Geológicos*, 71(2), e038. <https://doi.org/10.3989/egeol.42054.366>

- Suárez, P. y Vega, M. (2017). Utilización de la conectividad hidrológica para evaluar la transferencia de metales entre sedimentos fluviales. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*, 4(3), 240-247. https://doi.org/10.11137/2017_3_240_247
- Suárez, P., Vega, M., Pardo, R., Orfeo, O., García Cuesta, J. L. y Ronco, A. (2016). Hydrochemical and sedimentological dynamics in a subtropical plain river: Assessment by multivariate statistical analysis. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1004. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5814-z>
- Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (2003). Desarrollos de niveles guía nacionales de calidad de agua ambiente correspondientes a manganeso. <https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/documento59.pdf> (último acceso 09/2025)
- Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (2005). Desarrollos de niveles guía nacionales de calidad de agua ambiente correspondientes a cobre. <https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/documento59.pdf> (último acceso 09/2025)
- Szporak-Wasilewska, S., Piniewski, M., Kubrak, J. y Okruszko, T. (2015). What we can learn from a wetland water balance? Narew National Park case study. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 15(3), 136–149. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2015.02.003>
- Úbeda, B., Di Giacomo, A., Neiff, J. J., Loisele, S., Poi, A. S. G., Gálvez, J. A., Casco, S. y Cózar, A. (2013). Potential effect of climate changes on the water level, flora and macro-fauna of a large neotropical wetland. *PLoS ONE*, 8(7), e67787. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0067787>
- United States Environmental Protection Agency (2007). *Method 3051A (SW-846): Microwave-assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils*. Revision 1, 30 p. Washington, DC.
- Vallejos, S. V. (2014). Diversidad de cianobacterias asociadas a macrófitos acuáticos en ambientes someros del nordeste argentino. Tesis doctoral, Universidad Nacional del Nordeste (inédita), 215 p., Corrientes.
- Vives, L., Rodríguez, L., Manzano, M., Mira, A., Araguás-Araguás, L., Ortega, L., Heredia, J., Matsumoto, T. (2020). Using isotope data to characterize and date groundwater in the southern sector of the Guaraní Aquifer System. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 56(5-6), 533-550. <https://doi.org/10.1080/10256016.2020.1810684>
- Ward, J. V. (1989). The four-dimensional nature of lotic ecosystems. *Journal of the North American Benthological Society*, 8(1), 2-8. <https://doi.org/10.2307/1467397>
- Ward, J. V. (1998). A running water perspective of ecotones, boundaries, and connectivity. *SIL Proceedings, 1922-2010*, 26(3), 1165-1168. <https://doi.org/10.1080/03680770.1995.11900902>
- Ward, J. V., Tockner, K. y Schiemer, F. (1999). Biodiversity of floodplain river ecosystems: Ecotones and connectivity. *Regulated Rivers: Research & Management*, 15, 125-139. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1646\(199901/06\)15:1/3<125::AID-RRR523>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1646(199901/06)15:1/3<125::AID-RRR523>3.0.CO;2-E)
- Weckström, K., Saunders, K. M., Gell, P. A. y Skilbeck, C. (2017). *Applications of Paleoenvironmental Techniques in Estuarine Studies*. Developments in Paleoenvironmental Research, vol. 20. Springer, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-94-024-0990-1>
- Wu, F., Qing, H. y Wan, G. (2001). Regeneration of N, P and Si near the sediment/water interface of lakes from the Southwestern China Plateau. *Water Research*, 35(5), 1334-1337. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00380-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00380-8)
- Zalocar, Y. (2003). Fitoplancton de lagunas y cursos de agua del sistema Iberá. En Poi de Neiff, A. (ed.), *Limnología del Iberá*, 85-142. EUDENE, Corrientes, Argentina.
- Zilio, M. C., Zamponi, A. y Roggiero, M. F. (2017). Peligrosidad y vulnerabilidad en los Esteros del Iberá, Argentina: análisis geográfico desde la Teoría Social del Riesgo. *Revista Geográfica*, 158, 43-67. <https://www.revistasipgh.org/index.php/regeo/article/view/203>

Tipo de Publicación: ARTÍCULO.

Trabajo recibido el 06/11/2025, aprobado para su publicación el 07/03/2026 y publicado el 20/03/2026.

COMO CITAR

Suárez, P., Vega, M., Talavera Prieto, N. y Casco, S. (2026). Análisis de la composición química elemental de los sedimentos del Sistema Iberá (Corrientes, Argentina). *Cuadernos del CURIHAM*, 31. e12. <https://doi.org/10.35305/curiham.v31.e12>

ROLES DE AUTORÍA

Paola Suárez: Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Adquisición de fondos, Investigación, Metodología, Administración del

proyecto, Recursos, Software, Supervisión, Validación, Visualización, Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición.

Marisol Vega: Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Adquisición de fondos, Metodología, Software, Supervisión, Redacción – revisión y edición.

Nieves Talavera Prieto: Metodología, Análisis formal.

Sylvina Casco: Redacción – revisión y edición.

LICENCIA

Este es un artículo de acceso abierto bajo licencia: Creative Commons Atribución -No Comercial -Compartir Igual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>)

