

EVALUACIÓN ESPACIOTEMPORAL DEL SISTEMA CARBÓNICO EN EL HUMEDAL EL HATO, ISLA DE MARGARITA, ESTADO NUEVA ESPARTA, VENEZUELA, DURANTE 2015

ANAIS DÍAZ^{1*}, ARÍSTIDE MÁRQUEZ¹, ELENA HERNÁNDEZ¹ & JULIO RODRÍGUEZ²

¹*Instituto Oceanográfico de Venezuela, Dpto. de Oceanografía, Universidad de Oriente, Venezuela.*

**Autor de correspondencia: anaisd1990@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-1283-5182>*

aristd@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0003-1426-5264>

hernandezlna@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-8664-8494>

²*Centro Regional de Investigaciones Ambientales, Universidad de Oriente, Núcleo de Nueva Esparta.*

juliorod58@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0001-6378-236x>

RESUMEN: El incremento de las concentraciones de CO₂ atmosférico ha intensificado procesos como la acidificación de ecosistemas acuáticos, donde los humedales, a pesar de su vulnerabilidad climática, cumplen un rol crucial como sumideros de carbono. Con el objetivo de caracterizar la dinámica espacio-temporal del sistema carbónico en el humedal El Hato, se realizaron muestreos mensuales entre enero y diciembre de 2015 en cinco estaciones y dos estratos de profundidad. Se midieron parámetros físico-químicos y biológicos, y los componentes del sistema carbónico se calcularon mediante el programa CO₂SYS a partir de pH y alcalinidad total. Los análisis estadísticos incluyeron pruebas no paramétricas, correlaciones de Spearman y análisis multivariado. Los resultados evidenciaron una variación significativa de la alcalinidad total (406,29-1650,62 μmol/l) y del carbono inorgánico total (268,49-1948,58 μmol/l), con máximos durante la época de lluvias y mínimos en sequía. El pH mostró un rango inusualmente amplio (5,6-11,2), asociado tanto a la litología cárstica como al metabolismo autotrófico. Predominaron condiciones subsaturadas de calcita y aragonita ($\Omega < 1$), con un breve episodio de sobresaturación en agosto. Además, se observaron diferencias verticales en $f\text{CO}_2$ y eventos de acidificación vinculados a la respiración bacteriana y a la lixiviación de carbonatos. En conclusión, la dinámica del sistema carbónico en este humedal está modulada por la estacionalidad hidrológica, la geología local y la actividad biológica, lo que determina una alta variabilidad y limitada capacidad amortiguadora frente a la acidificación. Estos hallazgos resaltan la importancia de incluir humedales cársticos en programas de monitoreo y gestión ambiental en escenarios de cambio climático.

Palabras clave: Sistema carbónico, humedal cárstico, acidificación, cambio climático

ABSTRACT: Increasing atmospheric CO₂ concentrations have intensified processes such as the acidification of aquatic ecosystems, where wetlands, despite their climate vulnerability, play a crucial role as carbon sinks. To characterize the spatiotemporal dynamics of the carbon system in the El Hato wetland, monthly sampling was conducted between January and December 2015 at five stations and two depth strata. Physical, chemical, and biological parameters were measured, and the components of the carbon system were calculated using the CO₂SYS program based on pH and total alkalinity. Statistical analyses included nonparametric tests, Spearman correlations, and multivariate analysis. The results showed significant variation in total alkalinity (406.29-1650.62 μmol/l) and total inorganic carbon (268.49-1948.58 μmol/l), with maxima during the rainy season and minima during the dry season. The pH ranged unusually wide (5.6-11.2), associated with both karst lithology and autotrophic metabolism. Undersaturated conditions of calcite and aragonite ($\Omega < 1$) predominated, with a brief episode of supersaturation in August. Furthermore, vertical differences in $f\text{CO}_2$ and acidification events linked to bacterial respiration and carbonate leaching were observed. In conclusion, the dynamics of the carbon system in this wetland are modulated by hydrological seasonality, local geology, and biological activity, which determine high variability and limited buffering capacity against acidification. These findings highlight the importance of including karst wetlands in environmental monitoring and management programs under climate change scenarios.

Keywords: Carbonaceous system, karst wetland, acidification, climate change

INTRODUCCIÓN

Uno de los principales promotores del cambio climático es el incremento en las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono (CO₂), derivado principalmente de actividades antropogénicas. En

2022, las emisiones fósiles de este gas alcanzaron un récord histórico de 38,3 Gt/año (gigatoneladas por año), con proyecciones de llegar a 39 Gt/año para 2025 (IEA 2023). Este incremento ha intensificado fenómenos como el calentamiento global, la acidificación oceánica, el derretimiento de la criosfera y el aumento acelerado del nivel del mar, cambios sin precedentes en los últimos siglos (IPCC 2023).

Los humedales, por su naturaleza dinámica, son ecosistemas bastante sensibles a las variaciones climáticas y eventos extremos. Alteraciones en la temperatura, los patrones de precipitación y el nivel del mar pueden generar impactos significativos, en muchos casos irreversibles (MOYA *et al.* 2005). No obstante, estos ecosistemas desempeñan un rol crucial en la mitigación del cambio climático, ya que actúan como sumideros naturales de carbono, siendo los más eficientes del planeta (MITSCH *et al.* 2022).

La dinámica del sistema carbónico en cuerpos de agua está determinada por procesos biológicos, como la fotosíntesis y la respiración, así como por procesos abióticos de precipitación y disolución de carbonatos (DECARLO *et al.* 2017). Para caracterizar este sistema se emplean parámetros clave como la alcalinidad total (AT), el carbono inorgánico disuelto (CID), el pH, la presión parcial y/o fugacidad del CO₂ (pCO₂; fCO₂), además de la concentración de nutrientes, la salinidad y la temperatura (CYRONAK *et al.* 2018). Este sistema puede describirse a través del siguiente equilibrio:



Donde el CO₂ disuelto (CO₂(ac)) se hidrata para formar ácido carbónico (H₂CO₃), el cual se disocia rápidamente en bicarbonato (HCO₃⁻) y carbonato (CO₃²⁻), alcanzando un equilibrio termodinámico (SARMIENTO & GRUBER 2006).

La importancia de estudiar este sistema se incrementa en ambientes costeros y humedales, donde los intercambios de carbono son altamente dinámicos y sensibles a variaciones hidrológicas estacionales, tales como sequías e intensas precipitaciones. Los humedales, en particular, representan ecosistemas de gran valor ecológico y socioeconómico, al funcionar como sumideros de carbono, zonas de crianza de especies marinas y filtros naturales de nutrientes y contaminantes. Sin embargo, su vulnerabilidad frente al cambio climático, la presión antrópica y la alteración de los regímenes hidrológicos hace necesario caracterizar de manera detallada los procesos que regulan el sistema carbónico en estos ambientes (MOYA *et al.* 2005).

En Venezuela, los estudios sobre el sistema carbónico en humedales dulceacuícolas son limitados. Investigaciones como las de ASTOR *et al.* (2005, 2013) y MÁRQUEZ (2015) en ambientes oceánicos y MÁRQUEZ *et al.* (2024) en regiones costeras han servido como referencia metodológica. El objetivo de esta investigación es aportar evidencia científica acerca de las correlaciones entre los patrones espaciales y temporales del sistema carbónico en el humedal El Hato y los factores físicos, químicos y biológicos de la zona. El desarrollo de este conocimiento resulta crucial no solo para comprender la dinámica hidrogeoquímica de los humedales venezolanos, sino también para diseñar estrategias de gestión y conservación adaptadas a escenarios de cambio climático, en los cuales se prevén modificaciones significativas en los regímenes de precipitación y en los flujos de carbono en ecosistemas costeros.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

El humedal El Hato (Fig.1) es un cuerpo de agua dulce de 3153 m², ubicado en el Monumento Natural Laguna de Las Marites, municipio García, Isla de Margarita, Venezuela. Este sistema presenta un paisaje cárstico con fluctuaciones estacionales notables: durante la época de sequía (septiembre-octubre), su profundidad promedio es de 1,80 m, mientras que en los meses de mayor precipitación (noviembre-enero) alcanza hasta 4 m (RODRÍGUEZ *et al.* 2008).

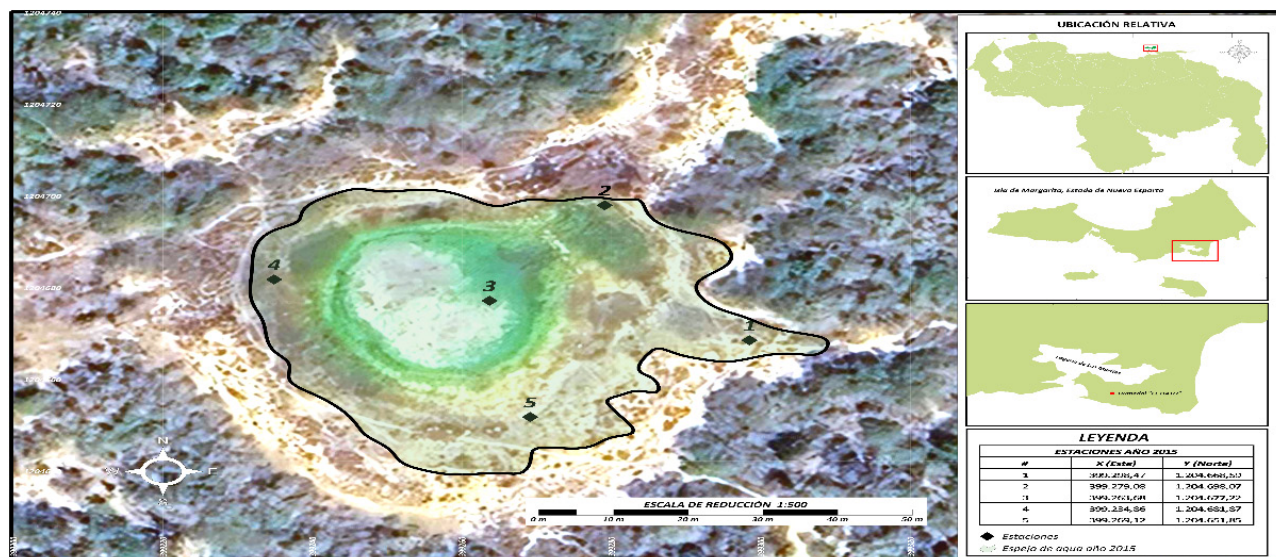


Fig. 1. Localización geográfica del humedal El Hato, Isla de Margarita, Venezuela, y distribución de las cinco estaciones de muestreo durante 2015.

Muestras

Durante el periodo de enero a diciembre de 2015 se realizaron muestreos mensuales en cinco (5) estaciones georreferenciadas con GPS (Garmin), recolectando agua en dos estratos de profundidad: superficial (10 cm bajo el espejo de agua) y cercano al fondo (20 cm sobre el sedimento). En cada estación, los parámetros *in situ*, como temperatura ($^{\circ}\text{C}$), pH, oxígeno disuelto y salinidad, se midieron con una sonda multiparamétrica YSI 600R acoplada a un capturador de datos YSI 650 DMS. Para los análisis de laboratorio, se recolectaron 5 l de agua por estrato en envases prelavados con HCl al 10%, destinados a la determinación de nutrientes (nitrito, nitrato, amonio, fosfato y silicatos), alcalinidad total (AT) y clorofila a . Las muestras fueron preservadas en hielo y posteriormente procesadas en el Laboratorio de Calidad Ambiental del Centro Regional de Investigaciones Ambientales (CRIA), Universidad de Oriente (UDO), Núcleo de Nueva Esparta.

Componentes del sistema carbónico

La determinación del carbono inorgánico total (TCO_2), fugacidad de dióxido de carbono ($f\text{CO}_2$), carbonato (CO_3^{2-}), bicarbonato (HCO_3^-), así como los grados de saturación de calcita (Ω cal.) y aragonita (Ω arag.), se realizó a partir de mediciones de pH y alcalinidad total (AT), junto con datos de temperatura, salinidad y concentraciones de PO_4^{3-} y SiO_4^{4-} . Los cálculos se efectuaron empleando el programa CO_2SYS , utilizando las constantes de equilibrio K_1 y K_2 propuestas por MEHRBACH *et al.* (1973), ajustadas según MILLERO (1995). Este procedimiento ha sido aplicado en estudios internacionales (FEELY *et al.* 2008; RIEBESELL *et al.* 2010; KOEVE & OSCHLIES 2012) y nacionales (MÁRQUEZ 2015; MÁRQUEZ *et al.* 2024).

El CO_2SYS es un software diseñado para calcular los equilibrios químicos del sistema de carbono inorgánico en aguas marinas y continentales. Permite trabajar en modo de entrada única, que genera resultados individuales y análisis de sensibilidad, o en modo por lotes, empleado para procesar grandes volúmenes de datos, como los obtenidos en cruceros oceanográficos. Ofrece diversas opciones de configuración, incluyendo diferentes formulaciones para las constantes K_1 y K_2 , dos formulaciones para KSO_4 , cuatro escalas de pH (libre, total, agua de mar y NBS) y la posibilidad de utilizar $f\text{CO}_2$ o $p\text{CO}_2$. El programa requiere como entrada dos de los cuatro parámetros principales del sistema CO_2 (AT, TCO_2 , pH y/o $f\text{CO}_2$ o $p\text{CO}_2$) para calcular los restantes bajo un conjunto definido de condiciones de entrada (temperatura y presión) y de salida especificadas por el usuario. CO_2SYS resuelve un sistema de ecuaciones basado en los principios de la termodinámica química y puede ejecutarse en cualquier ordenador compatible, incluyendo versiones operativas en MS-DOS y entornos modernos (DICKSON 1990).

Análisis estadísticos

Ante el incumplimiento de los supuestos paramétricos de normalidad y homocedasticidad, verificados mediante las pruebas de Shapiro-Wilk y Anderson-Darling, se procedió a implementar análisis estadísticos no paramétricos. Las diferencias en los parámetros del sistema de carbonatos en función de los factores temporales (meses, estaciones) y de profundidad fueron evaluadas mediante la prueba de Kruskal-Wallis, con un nivel de significancia establecido en $\alpha=0,05$. Cuando se detectaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$), se realizaron comparaciones *post hoc* mediante la prueba de Dunn, aplicando la corrección de Bonferroni para controlar la tasa de error en comparaciones múltiples.

Complementariamente, se utilizó el coeficiente de correlación de Spearman para examinar las relaciones bivariadas entre variables (CÉSPEDES 2017) y se aplicó un Análisis de Componentes Principales (ACP) para identificar patrones multivariados entre los parámetros físico-químicos, biológicos y carbonáticos. El ACP se ejecutó sobre 12 variables estandarizadas (z-score) para evitar la dominancia de variables con unidades o escalas diferentes, eliminando previamente las redundantes mediante análisis de correlación, lo que garantizó la independencia de los predictores.

Todos los procedimientos analíticos fueron ejecutados utilizando el software Statgraphics Centurion XVII, garantizando un enfoque metodológicamente robusto para la interpretación integral de la dinámica del humedal.

RESULTADOS

Durante la mayor parte del periodo de estudio, las aguas del humedal El Hato mostraron condiciones netamente alcalinas, con pH superiores a 7, salvo un único registro por debajo de este valor (5,61). El rango total fue de 5,61 a 11,28 unidades, con un promedio de 8,78 unidades. Uno de los puntos máximos (agosto: 11,03) coincidió con la estación seca y menor aporte de agua continental, mientras que los mínimos (junio–julio) se asociaron a incrementos en la pluviosidad y potencial dilución de las sales alcalinas (Fig. 2A). Espacialmente, el pH se mantuvo relativamente homogéneo (8,32-9,21), con ligeros aumentos en las estaciones 4 y 5, posiblemente vinculados a mayor incidencia lumínica y fotosíntesis superficial (Fig. 2B). No se detectaron diferencias significativas en el perfil vertical, lo que concuerda con la escasa profundidad del humedal (Fig. 2C).

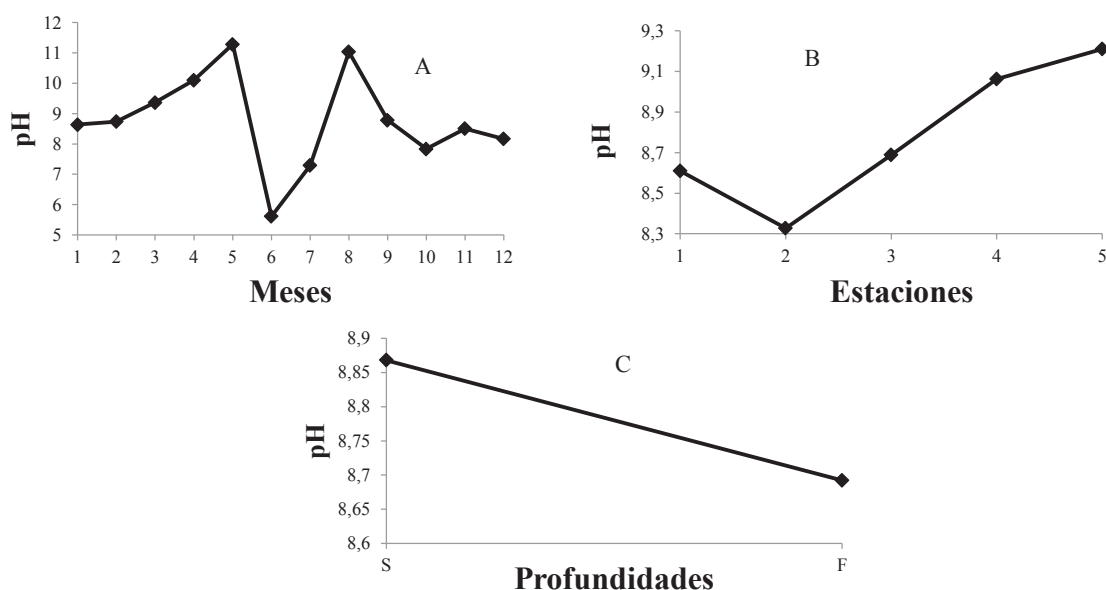


Fig. 2. Variación del pH entre los meses de muestreo (A), las estaciones (B) y profundidades (C) durante el 2015, en el humedal El Hato.

La alcalinidad total (AT) presentó un rango de 406,29–1650,62 $\mu\text{mol/l}$ (promedio: 1115,26 $\mu\text{mol/l}$), con picos en octubre–noviembre, coincidiendo con el periodo de mayor aporte pluvial, lo que sugiere un incremento por lixiviación y aporte fluvial de carbonatos disueltos. Los valores mínimos (abril–mayo) reflejan un periodo de mayor evaporación y menor entrada de agua dulce (Fig. 3A). La estabilidad espacial y vertical (Fig. 3B y 3C) indica que los aportes y procesos de consumo son relativamente uniformes en el humedal.

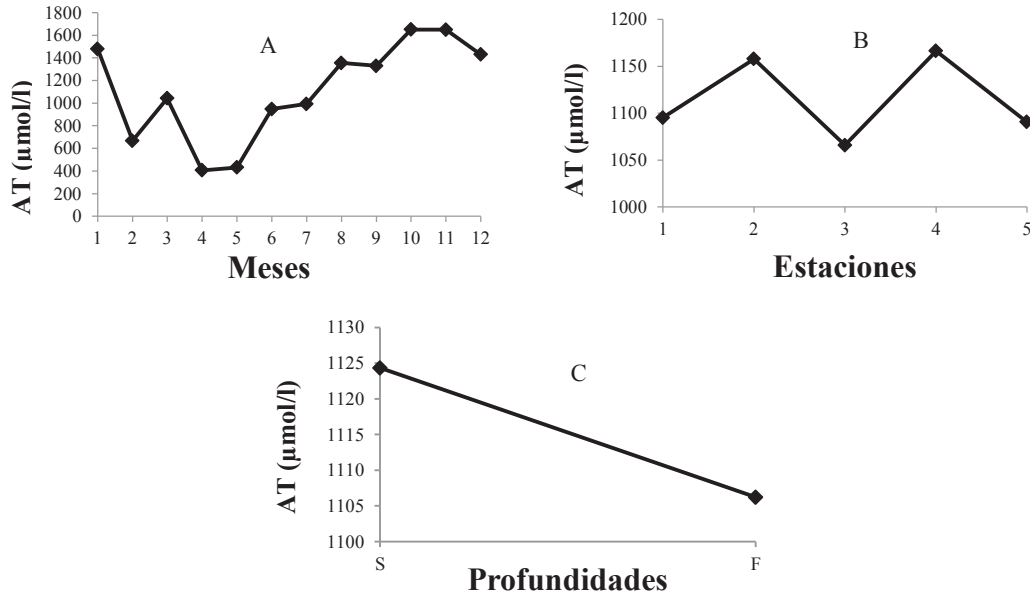


Fig. 3. Variación de la AT entre los meses (A), estaciones (B) y profundidad (C) durante el 2015, en el humedal El Hato.

El ion bicarbonato (HCO_3^-) siguió un patrón temporal paralelo a la AT (213,06–1592,03 $\mu\text{mol/l}$; promedio: 975,74 $\mu\text{mol/l}$), y opuesto al del ion carbonato. Sus máximos en octubre–noviembre evidencian la dominancia de la forma bicarbonato en condiciones de pH moderado–alto y mayor entrada de CO_2 disuelto desde fuentes externas (Fig. 4A). La homogeneidad espacial y vertical (Fig. 4B y 4C) es consistente con un cuerpo de agua poco estratificado.

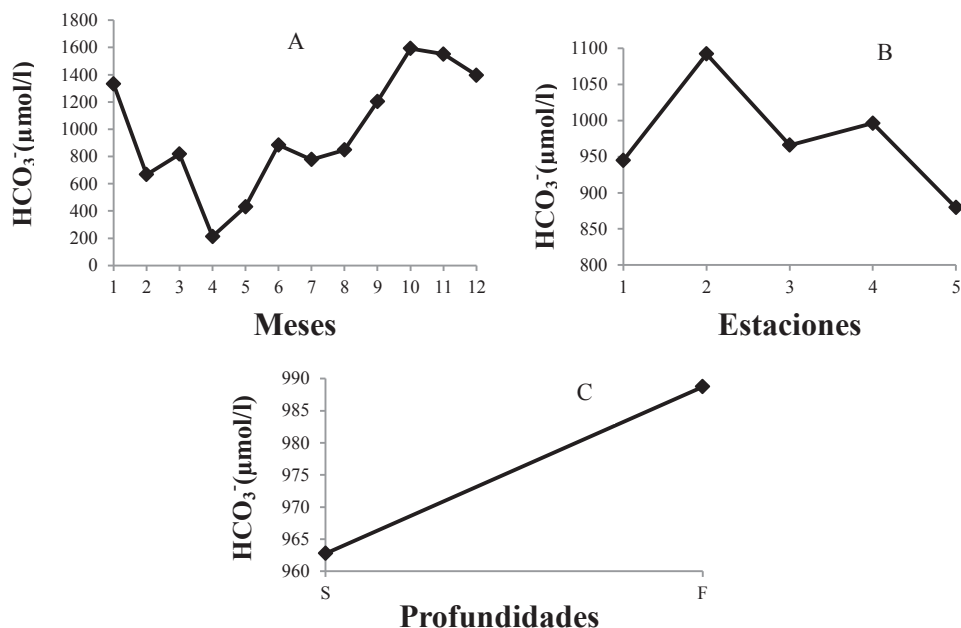


Fig. 4. Variación del HCO_3^- entre los meses (A), estaciones (B) y profundidad (C) durante el 2015, en el humedal El Hato.

Las concentraciones de TCO_2 (268,49–1948,58 $\mu\text{mol/l}$; promedio: 1074,77 $\mu\text{mol/l}$) mostraron la misma estacionalidad que la AT y el HCO_3^- , destacando que en octubre–noviembre el sistema presentó un incremento marcado de carbono inorgánico disuelto total (Fig. 5A). El hecho de que el TCO_2 se correlacione fuertemente con el bicarbonato confirma que esta especie es la principal contribuyente al carbono inorgánico disuelto en este humedal.

El ion carbonato (CO_3^{2-}), con concentraciones de 15,05–213,96 $\mu\text{mol/l}$ (promedio: 60,76 $\mu\text{mol/l}$), mostró picos en agosto y marzo, periodos de baja pluviosidad, y mínimos en mayo y diciembre, en condiciones de mayor dilución (Fig. 6A). Esto sugiere un control directo de la producción fotosintética sobre la fracción carbonato: la mayor fotosíntesis eleva el pH, desplazando el equilibrio químico hacia formas carbonato y aumentando el grado de saturación de minerales carbonatados. En cuanto a la distribución espacial (Fig. 6B), la estación 5 alcanzó el valor más alto (92,07 $\mu\text{mol/l}$), mientras que la estación 2 presentó la menor concentración (37,38 $\mu\text{mol/l}$). Respecto al perfil vertical (Fig. 6C), en superficie se observó la máxima concentración (72,78 $\mu\text{mol/l}$), mientras que en el fondo se registró el mínimo valor (48,74 $\mu\text{mol/l}$).

De manera general, las variaciones de CO_3^{2-} estuvieron asociadas a los cambios temporales, espaciales y de profundidad en el humedal El Hato, siguiendo patrones similares a los grados de saturación (Ω) a lo largo del sistema. Los grados de saturación de calcita (Ω_{calc} : 0,07–1,31; promedio: 0,34) y aragonito (Ω_{arag} : 0,05–0,84; promedio: 0,22) se mantuvieron en general por debajo de la saturación ($\Omega < 1$), lo que indica condiciones de disolución de estos minerales. Únicamente en agosto, Ω_{calc} se aproximó a 1, coincidiendo con el máximo de CO_3^{2-} y pH más elevado (Fig. 7 A1 y A2). Espacialmente, los mayores valores se registraron en la estación 5, posiblemente por su menor profundidad y mayor incidencia lumínica que favorece la fotosíntesis, mientras que los mínimos se dieron en la estación 2, más profunda y con menor entrada de luz (Fig. 7B1 y B2).

La fugacidad de CO_2 ($f\text{CO}_2$) mostró un rango muy amplio (4,33–1408,44 μatm ; promedio: 1160,37 μatm), con máximos en octubre y diciembre, asociados al aumento de materia orgánica en descomposición y aporte de CO_2 desde el drenaje continental (Fig. 8A). Los mínimos en abril y agosto coinciden con pH altos y concentración elevada de CO_3^{2-} , reflejando predominio de la asimilación fotosintética del carbono inorgánico.

En la distribución espacial (Fig. 8B), la mayor $f\text{CO}_2$ se registró en la estación 2 (3945,50 μatm), mientras que la menor correspondió a la estación 4 (137,23 μatm). En cuanto a los estratos de profundidad (Fig. 8C), el valor máximo se observó en el fondo con 374,29 μatm , y el mínimo en la superficie con 353,89 μatm . La correlación negativa con oxígeno disuelto confirma un balance autotrófico neto: la producción primaria excede la respiración, disminuyendo la $f\text{CO}_2$ y aumentando el oxígeno disuelto.

Análisis estadístico

La prueba de Kruskal-Wallis indicó que la variabilidad mensual fue el principal factor que determinó los parámetros del sistema carbónico ($p < 0,05$; TABLA 1), mientras que estacionalidad y profundidad mostraron efectos menos pronunciados y significativos solo para ciertos parámetros.

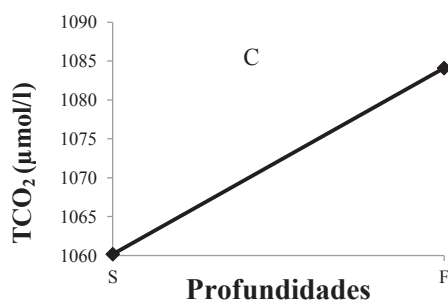


Fig. 5. Variación del TCO_2 entre los meses (A), estaciones (B) y profundidad (C) durante el 2015, en el humedal El Hato.

Todos los parámetros evidenciaron diferencias temporales altamente significativas. Los análisis post hoc de Dunn revelaron patrones específicos:

✓ pH: presentó siete grupos homogéneos (42 pares significativos), con valores entre 5,62 (junio) y 11,29 (mayo), reflejando su naturaleza como variable integradora de múltiples equilibrios ácido-base.

✓ Reserva alcalina (AT, HCO_3^- , TCO_2): mostró gradientes anuales continuos. AT formó seis grupos (36 pares significativos; 406,29–431,24 $\mu\text{mol/l}$

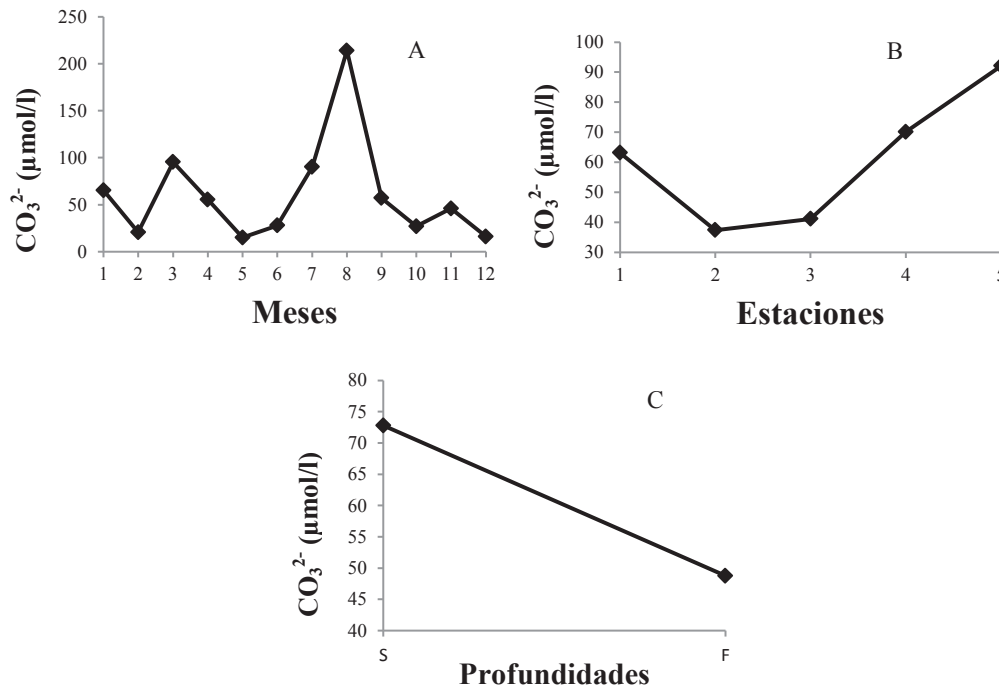


Fig. 6. Variación del CO_3^{2-} entre los meses (A), estaciones (B) y profundidad (C) durante el 2015, en el humedal El Hato.

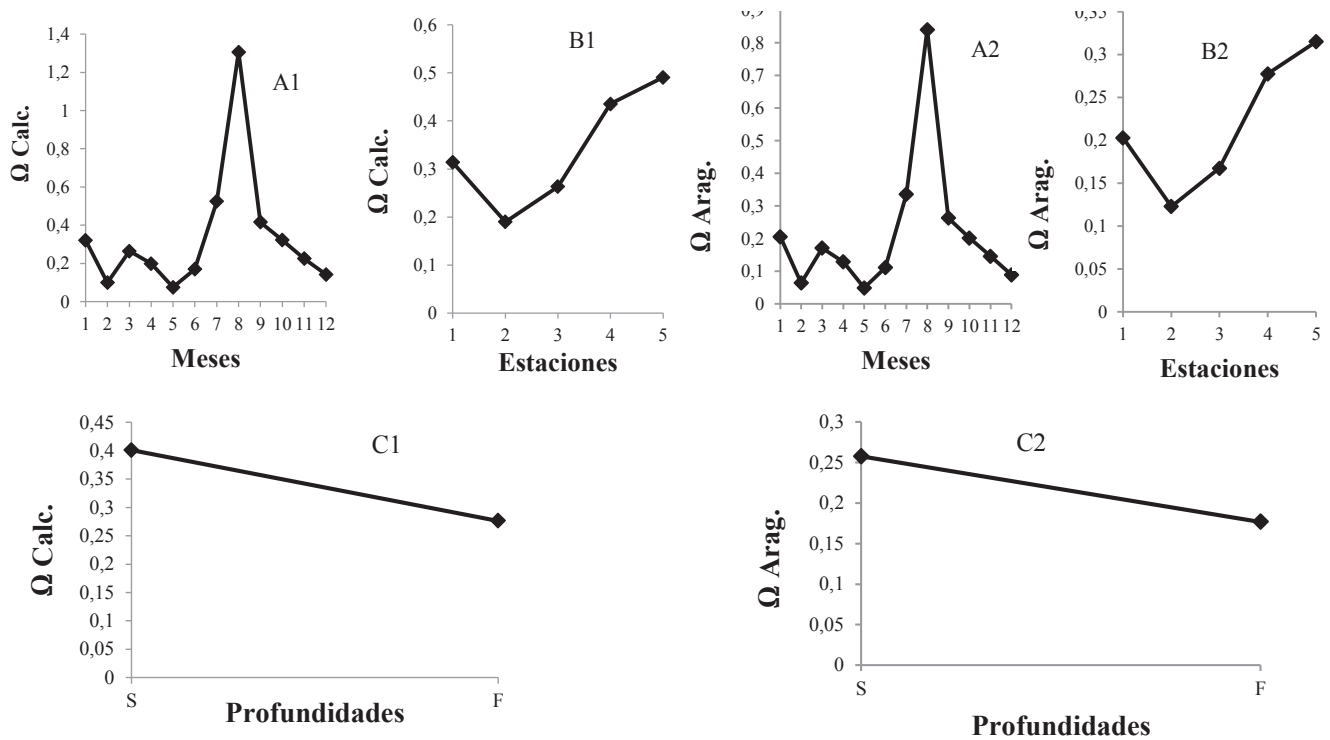


Fig. 7. Variación de Ω Calcita y aragonita entre los meses (A1, A2), estaciones (B1, B2) y profundidad (C1, C2) durante el 2015, en el humedal El Hato

en abril-mayo a 1649,72-1650,63 $\mu\text{mol/l}$ en octubre-noviembre), HCO_3^- cinco grupos (39 pares; 213,06-1592,03 $\mu\text{mol/l}$), y TCO_2 siete grupos (37 pares; 268,49-1948,58 $\mu\text{mol/l}$).

✓ Especiación de carbonatos (CO_3^{2-} , Ω_{calc} , Ω_{arag}): formó dos grupos homogéneos (11 pares significativos), destacando agosto como mes crítico con los valores más altos (CO_3^{2-} 213,96 $\mu\text{mol/l}$, Ω_{calc} 1,30, Ω_{arag} 0,84).

✓ $f\text{CO}_2$: presentó dos grupos homogéneos (6 pares significativos), con valores mínimos entre abril y agosto ($4\text{-}18 \mu\text{atm}$) y máximos entre octubre y diciembre ($1071,65\text{-}1408,44 \mu\text{atm}$).

Espacialmente, solo CO_3^{2-} , Ω_{calc} y Ω_{arag} mostraron diferencias significativas entre estaciones, aunque sin contrastes entre pares específicos, indicando un gradiente gradual. Verticalmente, únicamente $f\text{CO}_2$ evidenció estratificación significativa ($H = 6,70$; $p = 0,03$), sugiriendo producción de CO_2 en capas subsuperficiales.

Con base en estos resultados, los parámetros pueden clasificarse en cuatro grupos biogeoquímicos:

- Reserva alcalina (AT , HCO_3^- , TCO_2): indican acumulación progresiva y aportes continentales o remineralización orgánica.
- Especiación de carbonatos (CO_3^{2-} , Ω_{calc} , Ω_{arag}): patrón temporal con agosto como mes crítico, favoreciendo procesos de calcificación.
- pH: variable integradora, sensible a múltiples procesos simultáneos.
- $f\text{CO}_2$: patrón temporal bimodal y estratificación vertical, consistente con respiración y limitado intercambio gaseoso.

Estos resultados sugieren que distintos procesos biogeoquímicos gobiernan la dinámica del sistema carbónico del humedal El Hato en escalas temporales y espaciales diferenciadas, siendo agosto un mes clave para la especiación de carbonatos y, potencialmente, para la calcificación biológica bajo escenarios de cambio climático.

En el análisis de correlaciones de Spearman se identificó una elevada coherencia interna entre los principales componentes del sistema de carbónico. Las correlaciones fuertes y positivas entre el carbono inorgánico disuelto (TCO_2) y el ion bicarbonato (HCO_3^-) ($\rho = 0,98$, $p < 0,05$), y entre la alcalinidad total (AT) con TCO_2 ($\rho = 0,95$, $p < 0,05$) y HCO_3^- ($\rho = 0,89$, $p < 0,05$), son consistentes con la predominancia de HCO_3^- como la especie mayoritaria de carbono inorgánico en el rango de pH típico de la mayoría de las aguas naturales. Esto confirma que la AT y el TCO_2 en este humedal están fundamentalmente controlados por la dinámica del sistema bicarbonato-carbonato. Asimismo, la correlación casi perfecta entre los índices de saturación de calcita y aragonita (Ω_{calc} y Ω_{arag} , $\rho = 0,99$, $p < 0,05$) era esperable, dado que ambos se calculan a partir del producto iónico $[\text{Ca}^{2+}][\text{CO}_3^{2-}]$ y solo difieren en su constante de equilibrio de solubilidad (K_{ps}), indicando que los factores que controlan la precipitación/disolución mineral afectan de manera semejante a ambas fases.

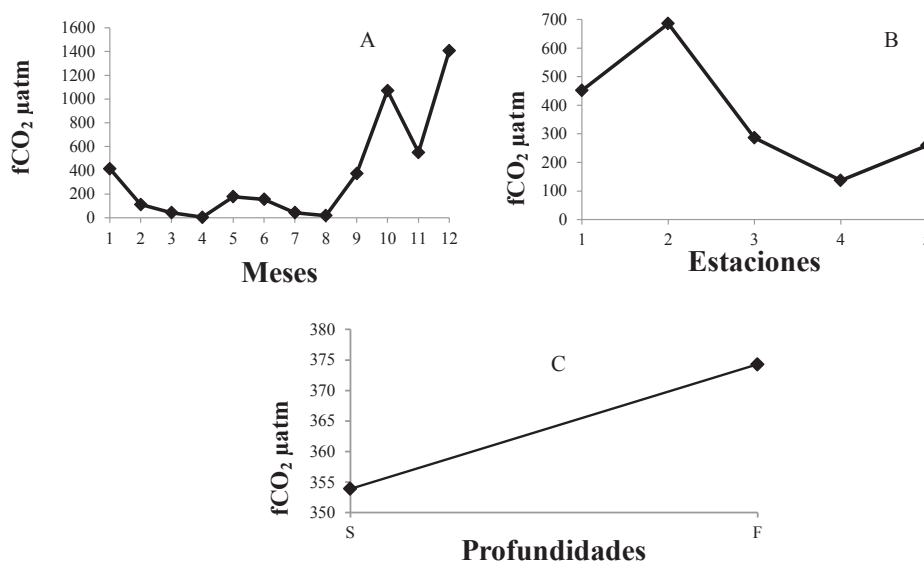


Fig. 8. Variación de la $f\text{CO}_2$ entre los meses (A), estaciones (B) y profundidad (C) durante el 2015, en el humedal El Hato

Las relaciones del pH con otros parámetros del sistema carbónico reflejan los equilibrios ácido-base. La correlación negativa significativa entre el pH y la AT ($\rho = -0,24$, $p = 0,01$) y, de manera más pronunciada, entre el pH y el HCO_3^- ($\rho = -0,45$, $p < 0,05$), sugiere que periodos de alta alcalinidad y concentración de bicarbonato están asociados con un pH más bajo. Este patrón evidencia procesos de acidificación del sistema, posiblemente impulsados por la entrada de CO_2 proveniente de la respiración orgánica en los sedimentos o la columna de agua, el cual al hidratarse genera H^+ y HCO_3^- , aumentando así ambos parámetros mientras disminuye el pH.

En consonancia con este mecanismo, se observó una correlación positiva moderada entre el pH y el ion carbonato (CO_3^{2-} , $\rho = 0,44$, $p < 0,05$), ya que la concentración de CO_3^{2-} es fuertemente dependiente del pH, incrementándose en condiciones alcalinas. El comportamiento de la fugacidad de CO_2 ($f\text{CO}_2$) consolida esta interpretación: sus fuertes correlaciones negativas con el pH ($\rho = -0,59$, $p < 0,05$) y el CO_3^{2-} ($\rho = -0,75$, $p < 0,05$), y su correlación positiva con HCO_3^- ($\rho = 0,73$, $p < 0,05$) y TCO_2 ($\rho = 0,65$, $p < 0,05$), delinean un escenario donde el incremento en la presión parcial de CO_2 desplaza el equilibrio hacia la formación de HCO_3^- , acidificando el medio y reduciendo la concentración de CO_3^{2-} .

La temperatura mostró un papel multifacético, influyendo tanto en los equilibrios químicos como en los procesos biológicos. Sus correlaciones positivas con los nutrientes NO_2^- ($\rho = 0,48$, $p < 0,05$) y Si(OH)_4 ($\rho = 0,52$, $p < 0,05$) podrían estar asociadas a una mayor tasa de mineralización de la materia orgánica y/o a procesos de resuspensión de sedimentos inducidos por condiciones térmicas más cálidas, que liberan nutrientes y silicatos a la columna de agua. Además, la correlación positiva de la temperatura con Ω_{calc} y Ω_{arag} ($\rho = 0,50$, $p < 0,05$) puede atribuirse a un efecto dual: 1) la disminución de la solubilidad del CO_2 con el aumento de la temperatura, lo que tendería a elevar ligeramente el pH y, por ende, la concentración de CO_3^{2-} , y 2) su posible asociación con periodos de mayor productividad primaria y consumo de CO_2 .

La conexión entre la productividad primaria y el sistema carbónico queda evidenciada por las correlaciones positivas de la clorofila a con la AT ($\rho = 0,43$, $p < 0,05$) y el TCO_2 ($\rho = 0,43$, $p < 0,05$). Esto sugiere que la actividad fotosintética no es el principal control inmediato de la concentración de carbono inorgánico, sino que más bien existe un acoplamiento con procesos de remineralización. Una hipótesis plausible es que los picos de productividad generan una mayor cantidad de materia orgánica, la cual, al ser remineralizada, libera nutrientes y CO_2 , este último hidratándose para formar HCO_3^- , contribuyendo así a un aumento de la AT y el TCO_2 . Este ciclo de producción-descomposición parece ser un driver significativo de la biogeoquímica del carbono en el humedal.

Las interrelaciones entre los nutrientes inorgánicos y los parámetros carbónicos refuerzan la idea de un fuerte acoplamiento entre los ciclos biogeoquímicos. La correlación positiva del NO_2^- con la AT ($\rho = 0,51$, $p < 0,05$) es un marcador robusto de procesos de descomposición y nitrificación, donde la mineralización de la materia orgánica nitrogenada libera amonio, que es posteriormente oxidado a nitrito, simultáneamente liberando CO_2 y protones (H^+) que, al reaccionar con especies alcalinas, contribuyen a la AT. En contraste, las correlaciones negativas del NO_2^- con la AT ($\rho = -0,37$, $p < 0,05$) y el TCO_2 ($\rho = -0,37$, $p < 0,05$) podrían indicar un consumo de nitrato durante periodos de alta productividad primaria (por ejemplo, por desnitrificación o asimilación algal), proceso que consumiría simultáneamente CO_2 , llevando a una disminución relativa del TCO_2 y afectando los equilibrios ácido-base.

En síntesis, el análisis de correlaciones pinta un cuadro de un ecosistema donde la dinámica del carbono está intrínsecamente ligada a los ciclos de nutrientes y a los procesos biológicos de producción y descomposición, con la temperatura actuando como un modulador clave de estas interacciones.

El análisis de componentes principales (Fig. 9), permitió identificar los principales ejes de variabilidad en el sistema, explicando en conjunto el 67,83 % de la varianza total. Este porcentaje resulta adecuado para sintetizar la complejidad de los parámetros fisicoquímicos y biogeoquímicos evaluados, y confirma que la estructura del sistema está determinada por un número limitado de procesos ambientales dominantes.

TABLA 1. Valores del análisis de Kruskal-Wallis y pruebas Post Hoc de Dunn para los parámetros del sistema de carbónico en función de meses, estaciones y profundidad.

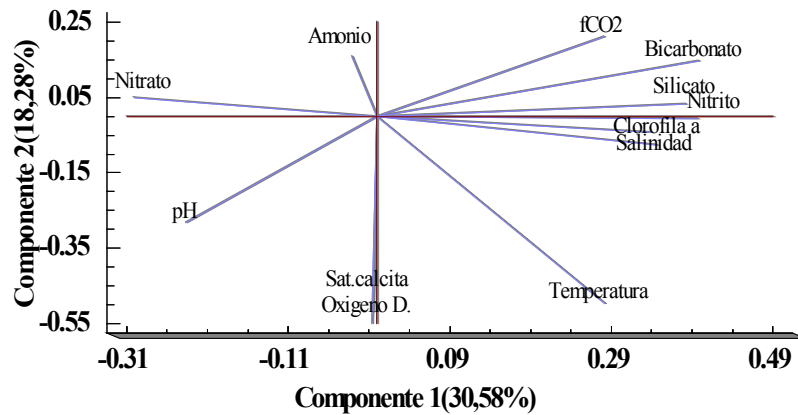
Variable	Factor	H	gl	P	G.S	Resultado Post Hoc
pH	Meses	98,63	11	< 0,05	**	7 grupos homogéneos (42 pares sig.)
	Estaciones	3,94	4	0,41	*	No requiere post hoc
	Profundidad	1,94	2	0,37	*	No requiere post hoc
AT	Meses	90,94	11	< 0,05	**	6 grupos homogéneos (36 pares sig.)
	Estaciones	0,74	4	0,94	*	No requiere post hoc
	Profundidad	0,79	2	0,67	*	No requiere post hoc
HCO ₃ ⁻	Meses	91,04	11	< 0,05	**	5 grupos homogéneos (39 pares sig.)
	Estaciones	2,59	4	0,63	*	No requiere post hoc
	Profundidad	1,86	2	0,39	*	No requiere post hoc
TCO ₂	Meses	93,97	11	< 0,05	**	7 grupos homogéneos (37 pares sig.)
	Estaciones	1,39	4	0,85	*	No requiere post hoc
	Profundidad	1,70	2	0,43	*	No requiere post hoc
CO ₃ ²⁻	Meses	58,06	11	2,12×10 ⁻⁸	**	2 grupos homogéneos (11 pares sig.)
	Estaciones	10,42	4	0,03	**	No diferencias por pares (Bonferroni/Tukey)
	Profundidad	5,57	2	0,06	*	No requiere post hoc
ΩCalc	Meses	48,23	11	1,30×10 ⁻⁶	**	2 grupos homogéneos (11 pares sig.)
	Estaciones	12,39	4	0,015	**	No diferencias por pares (Bonferroni/Tukey)
	Profundidad	4,24	2	0,12	*	No requiere post hoc
Ωarag	Meses	48,29	11	1,27×10 ⁻⁶	**	2 grupos homogéneos (11 pares sig.)
	Estaciones	12,48	4	0,01	**	No diferencias por pares (Bonferroni/Tukey)
	Profundidad	4,23	2	0,12	*	No requiere post hoc
fCO ₂	Meses	73,82	11	1,25×10 ⁻¹¹	**	2 grupos homogéneos (6 pares sig.)
	Estaciones	8,13	4	0,08	*	No requiere post hoc
	Profundidad	6,70	2	0,03	**	2 grupos homogéneos (2 pares sig.)

*= No significativo; **=Significativo; P= Valor de significancia; GS= Grado de significancia; H = estadístico de Kruskal-Wallis; gl = grados de libertad.

TABLA 2. Correlaciones significativas de Spearman (ρ) entre parámetros seleccionados del sistema carbónico y variables ambientales (n = 120)

Parámetro 1	Parámetro 2	ρ	Valor-p
TCO ₂	HCO ₃ ⁻	0,98	< 0,05
AT	TCO ₂	0,95	< 0,05
Ωcalc	Ωarag	0,99	< 0,05
AT	HCO ₃ ⁻	0,89	< 0,05
fCO ₂	CO ₃ ²⁻	-0,75	< 0,05
fCO ₂	HCO ₃ ⁻	0,73	< 0,05
fCO ₂	TCO ₂	0,65	< 0,05
pH	fCO ₂	-0,59	< 0,05
pH	HCO ₃ ⁻	-0,45	< 0,05
pH	CO ₃ ²⁻	0,43	< 0,05
T	Si(OH) ₄	0,521	< 0,05
T	Ωcalc	0,50	< 0,05
OD	UAO	-0,99	< 0,05
T	OD	0,54	< 0,05

Nota: Solo se muestran correlaciones con $|\rho| > 0,40$ y $p < 0,05$



Componente	Valores propios			Variable	Cargas factoriales			
	Autovalor	% Varianza	% Acumulado		C1	C2	C3	C4
1	3,66	30,57	30,57	Bicarbonato	0,39	0,15	-0,10	-0,10
2	2,19	18,28	48,85	Nitrito	0,39	-0,01	0,09	0,43
3	1,24	10,39	59,25	Silicato	0,38	0,03	0,12	0,49
4	1,03	8,58	67,83	Salinidad	0,34	-0,07	0,197	-0,45
				Clorofila a	0,33	-0,04	-0,16	-0,08
				Temperatura	0,28	-0,49	0,05	-0,00
				fCO ₂	0,28	0,21	0,26	-0,01
				pH	-0,23	-0,28	-0,12	0,47
				Nitrato	-0,30	0,05	0,49	0,03
				Oxígeno D,	-0,00	-0,52	0,38	-0,25
				Sat. Calcita	-0,01	-0,54	-0,05	0,12
				Amonio	-0,03	0,16	0,65	0,19

Fig. 9. Componentes Principales para los parámetros fisicoquímicos, biológicos y del sistema carbónico del humedal El Hato durante el 2015

El primer componente, responsable de más del 30 % de la varianza, agrupó a los principales nutrientes inorgánicos (bicarbonato, nitrito, silicato) junto con la salinidad y la clorofila a, lo que sugiere una estrecha relación entre la disponibilidad de nutrientes, la composición iónica y la producción primaria. Esta asociación respalda la idea de que el acoplamiento entre aportes de sales y nutrientes favorece la proliferación fitoplanctónica, siendo un eje fundamental para la dinámica del sistema.

El segundo componente reflejó un gradiente térmico y de oxigenación, donde valores más altos de temperatura se asociaron a menores concentraciones de oxígeno disuelto y a reducciones en la sobresaturación de calcita. Este patrón es consistente con el efecto combinado de la solubilidad del oxígeno y la disminución de la capacidad de saturación de carbonatos en aguas cálidas, lo cual plantea implicaciones relevantes en el contexto de la acidificación del agua y la vulnerabilidad de organismos calcificadores.

El tercer componente estuvo dominado por el amonio y el nitrato, acompañados por el oxígeno, lo que señala la importancia de los procesos de regeneración nitrogenada. La co-ocurrencia de estas formas de nitrógeno sugiere que la remineralización de la materia orgánica y la posterior nitrificación representan mecanismos clave en la dinámica interna del sistema, garantizando la disponibilidad de nutrientes en la columna de agua.

Finalmente, el cuarto componente integró la variabilidad del pH con el silicato y el nitrito en ambientes de menor salinidad. Este patrón se interpreta como un reflejo de la influencia continental, donde los aportes fluviales modifican tanto el equilibrio ácido-base como la disponibilidad de nutrientes silicatados, generando condiciones particulares en el sistema.

En conjunto, los resultados del ACP evidencian que la dinámica del sistema está controlada por cuatro procesos fundamentales: la disponibilidad de nutrientes y su vínculo con la producción primaria, el efecto de la temperatura sobre la oxigenación y la química de carbonatos, la regeneración de compuestos nitrogenados, y la influencia de aguas continentales en el equilibrio ácido-base. Estos ejes de variabilidad resaltan la complejidad de las interacciones físico-químicas en el sistema y aportan una base sólida para interpretar su comportamiento espacio-temporal y su respuesta frente a perturbaciones naturales o antrópicas.

DISCUSIÓN

El presente estudio aporta evidencia significativa sobre la dinámica del sistema carbónico en el humedal El Hato, donde interactúan procesos biogeoquímicos, factores climáticos y características geomorfológicas. Los resultados confirman que este sistema dulceacuícola presenta particularidades distintivas respecto a ecosistemas marinos y estuarinos reportados en la literatura.

La variación mensual de la alcalinidad total (AT: 406,29-1650,62 $\mu\text{mol/l}$) y del carbono inorgánico total (TCO_2 : 268,49-1948,58 $\mu\text{mol/l}$), altamente significativa según Kruskal–Wallis ($H = 90,94-93,97$; $p < 0,001$), mostró valores máximos en octubre-noviembre (época lluviosa) y mínimos en abril-mayo (sequía). Este patrón coincide con lo observado en sistemas cársticos tropicales (HERNÁNDEZ & OCANTO 2010; NORIEGA *et al.* 2015) y refleja la influencia combinada de: (1) la lixiviación de carbonatos desde el sustrato geológico durante eventos pluviales y (2) la modulación biológica del equilibrio $\text{CO}_2\text{-HCO}_3^- \text{- CO}_3^{2-}$ por la fotosíntesis (STUMM & MORGAN 1981). La correlación negativa entre pH y AT ($r = -0,72$) confirma al sistema carbonato-bicarbonato como principal regulador químico, aunque con menor eficiencia que en ambientes marinos debido a la baja salinidad (GARBAGNATI *et al.* 2005).

El comportamiento del pH en El humedal El Hato (máx. 11,28 en sequía) contrasta con lo reportado en otros humedales venezolanos como Paria y Laguna Grande, donde los valores más altos se observan en época de lluvias con 6,59-7,97 (BRITO *et al.* 2016; GORDON-COLÓN *et al.* 2021). Estas diferencias pueden explicarse por la geología y la dinámica biológica: mientras en El Hato el sustrato cárstico favorece la acumulación de carbonatos bajo condiciones de evaporación, en Paria y Monagas los suelos menos

carbonatados responden principalmente a los aportes pluviales (CHAPMAN & KIMSTACH 1996). Además, en estos últimos predomina la fotosíntesis durante la temporada lluviosa, mientras que en El Hato la remineralización en condiciones secas cobra mayor relevancia.

La interacción entre geología y metabolismo autotrófico neto se evidencia en la correlación positiva entre clorofila *a* y AT ($r = 0,68$), y en la relación inversa entre $f\text{CO}_2$ (4-1408 μatm) y oxígeno disuelto ($r = -0,65$), típica de sistemas donde la fotosíntesis excede la respiración (YANG *et al.* 2023). En este contexto, la baja precipitación favorece la acumulación de carbonatos y la formación de OH^- (PÉREZ 2017), amplificando el aumento del pH y de CO_3^{2-} durante la sequía. Este patrón coincide con lo reportado en la Laguna de Tacarigua, donde las mayores concentraciones de HCO_3^- se asociaron con aguas más alcalinas (DÍAZ-ZAMBRANO 2012).

En términos verticales, la mayoría de los parámetros presentaron homogeneidad, salvo el $f\text{CO}_2$, que mostró diferencias significativas entre profundidades ($H = 6,70$; $p = 0,03$), con valores subsuperficiales duplicando a los de superficie. Este resultado sugiere respiración bacteriana activa y descomposición en sedimentos, además de un intercambio gaseoso limitado en aguas más profundas.

Respecto al estado de saturación mineral, el humedal mostró condiciones predominantemente subsaturadas (Ω_{calc} y $\Omega_{\text{arag}} < 1$), con un breve pulso de sobresaturación en agosto ($\Omega_{\text{calc}} = 1,31$). Este resultado, opuesto a la sobresaturación sostenida de estuarios marinos como el Guadalete, con $\Omega > 4$ (PÉREZ 2017), indica que en humedales cársticos como El humedal el Hato la ventana temporal favorable para la calcificación biológica es corta y altamente dependiente de las condiciones ambientales.

Eventos extremos también marcaron la dinámica del sistema, como la acidificación registrada en junio ($\text{pH} = 5,6$), atribuible a la respiración bacteriana intensificada en sedimentos durante meses cálidos y al aporte de CO_2 desde aguas intersticiales ricas en materia orgánica (LIBES 1992).

En perspectiva comparativa, El Hato mostró mayor variabilidad temporal y dependencia de procesos locales que ambientes marinos costeros como el golfo de Cariaco (MÁRQUEZ *et al.* 2024), donde la influencia oceánica y la estratificación vertical juegan un rol dominante. Asimismo, mientras en la Laguna de Términos (México) la AT y TCO_2 siguen un comportamiento conservativo vinculado a la salinidad (MARTÍNEZ-TREJO *et al.* 2021), en El Hato predomina la influencia de la litología cárstica y del metabolismo interno.

Finalmente, la baja capacidad amortiguadora frente a la acidificación ($\Omega_{\text{arag}} < 0,25$ en sequía), junto con los altos valores de $f\text{CO}_2$, evidencian la vulnerabilidad del sistema y sugieren posibles influencias antrópicas. Estos hallazgos subrayan la necesidad de incorporar a los humedales cársticos en los programas de monitoreo de acidificación y cambio climático, dada su relevancia como sumideros de carbono y refugios de biodiversidad.

CONCLUSIONES

La dinámica del sistema carbónico en el humedal El Hato está dominada principalmente por la litología cárstica, la estacionalidad hidrológica y el metabolismo autotrófico. La variabilidad mensual de AT, TCO_2 y pH refleja la lixiviación de carbonatos en época de lluvias y la intensificación fotosintética en sequía, con valores particulares, extremos y poco comunes en otros humedales. Las condiciones mayormente subsaturadas de Ω_{calc} y Ω_{arag} , junto con la estratificación del $f\text{CO}_2$, evidencian una limitada capacidad buffer y una alta vulnerabilidad a la acidificación. En comparación con sistemas marinos y estuarinos, El Hato depende más de procesos locales, lo que resalta la necesidad de incluir a los humedales cársticos en programas de monitoreo y gestión ambiental ante escenarios de cambio climático.

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial al Centro Regional de Investigaciones Ambientales (CRIA) de la Universidad de Oriente (UDO), Núcleo Nueva Esparta, y en particular a su Director, Dr. Julio Rodríguez,

por facilitar los datos necesarios que permitieron el desarrollo de este estudio. Esta investigación se enmarca dentro del trabajo de tesis de la M. Sc. Anais Díaz, titulada “Evaluación espacio-temporal del sistema carbónico en el humedal El Hato, Isla de Margarita, Estado Nueva Esparta, Venezuela”. Asimismo, se reconoce el valioso apoyo proporcionado por el Departamento de Oceanografía del Instituto Oceanográfico de Venezuela, cuyo respaldo fue fundamental durante la fase de ejecución del presente trabajo.

REFERENCIAS

- ASTOR, Y., M. I. SCRAINTON, F. MULLER-KARGER, R. BOHRER & J. GARCIA. 2005. $f\text{CO}_2$ variability at the Cariaco tropical coastal upwelling time series station. *Mar. Chem.* 97: 245-261.
- ASTOR, Y., L. TROCCOLI, R. LORENZONI, R. THUNELL, F. VARELA, F. MULLER-KARGER, G. TAYLOR, M. I. SCRAINTON, E. TAPPA & D. RUEDA. 2013. Interannual variability in sea surface temperature and $f\text{CO}_2$ changes in the Cariaco Basin. *Deep. Sea. Res.* 93: 33-43.
- BRITO, D., J. RIVERO, M. GUEVARA, F. VÁSQUEZ, B. DÍAZ, & J. GIL. 2016. Análisis físico-químico y microbiológico de la Laguna Grande, parroquia La Pica, Maturín-Estado Monagas, Venezuela. *Saber* 28(3): 502-510.
- CÉSPEDES, N. 2017. *Estadística Inferencial*. Ed. Areandina, Fundación Universitaria del Área Andina, Bogotá, Colombia. 114 pp, <https://digitk.areandina.edu.co/handle/areandina/1390>
- CHAPMAN, D. & V. KIMSTACH. 1996. *Selection of Water Quality Variables. Water Quality Assessments: A Guide to the Use of Biota, Sediments and Water in Environment Monitoring*. Chapman Edition, 2nd Edition, E and FN Spon, London, 59-126, <http://dx.doi.org/10.4324/noc0419216001.ch3>.
- CYRONAK, T., A. J. ANDERSSON, C. LANGDON, R. ALBRIGHT, N. R. BATES, K. CALDEIRA, R. CARLTON, J. E. CORREDOR, R. B. DUNBAR, I. ENOCHS, J. EREZ, B. D. EYRE, J.-P. GATTUSO, D. GLEDHILL, H. KAYANNE, D. I. KLINE, D. A. KOWEEK, C. LANTZ, B. LAZAR, D. MANZELLO, A. MCMAHON, M. MELÉNDEZ, H. N. PAGE, I. R. SANTOS, K. G. SCHULZ, E. SHAW, J. SILVERMAN, A. SUZUKI, L. TENEVA, A. WATANABE & S. YAMAMOTO. 2018. Taking the metabolic pulse of the world's coral reefs. *Plos one*. 13(19):872.
- DECARLO, T. M., A. L. COHEN, G. T. F. WONG, F. K. SHIAH, S. J. LENTZ, K. A. DAVIS, K. E. F. SHAMBERGER & P. LOHMANN. 2017: Community production modulates coral reef pH and the sensitivity of ecosystem calcification to ocean acidification, *J. Geophys. Res.- Oceans*. 122: 745-761.
- DÍAZ-ZAMBRANO, S. Y. 2012. *Estudio de la calidad del agua del humedal costero, Laguna de Tacarigua, Edo. Miranda, Venezuela*. Trab. Grad. Lic. Química, Universidad Central de Venezuela Distrito Capital, Venezuela, 162 pp, Chrome-extension://efaidnbmninnibpcapjpcglclefindmkaj/http://saber.ucv.ve/bitstream/10872/15669/1/Teg%20Sandra%20Diaz.pdf.
- DICKSON, A. 1990. Termodinámica de la disociación del ácido bórico en agua de mar sintética de 273,15 a 318,15 K. *Deep-Sea Research*. 37: 755-766
- FEELEY, R., C. L. SABINE, J. M. HERNANDEZ-AYON, D. IANSON & B. HALES. 2008. Evidence for upwelling of corrosive acidified water on to the Continental Shelf. *Science*. 1490-1491.
- GARBAGNATI, M., P. GONZÁLEZ, R. ANTÓN & M. MALLEA 2005. Características físico-químicas, capacidad buffer y establecimiento de la línea base ambiental del Río Grande, San Luis, Argentina. *Ecol. Austral*. 15:59-71.
- GORDON-COLÓN, E., E. ZOPPI DE ROA, S. RAMOS, L. DELGADO, J. BERTI & E. MONTIEL. 2021. Humedales de la península de Paria (Estado Sucre, Venezuela): Físicoquímica de las aguas y composición de la vegetación. *Acta Biol. Venez.* 41(2): 207-263.

- HERNÁNDEZ, D. & J. OCANTO 2010. *Caracterización fisicoquímica, bacteriológica, pigmentos fotosintéticos y sedimentológicas de la laguna el Hato sector La Isleta, Isla de Margarita, estado Nueva Esparta*. Trab. Grad. Lic. Acuicultura, Universidad de Oriente, Boca de Río, Venezuela, 178pp.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC).2023. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report (AR6). Disponible en <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/> (Revisado junio 2024)
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA).2023. Global Energy Review: CO₂ Emissions in 2022. IEA. Disponible en <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-co2-emissions-in-2022> (Revisado junio 2024)
- KOEVE, W. & A. OSCHLIES. 2012. Potential impact of DOM accumulation of $f\text{CO}_2$ and carbonate ion computations in ocean acidification experiments. *Bio geosc* .9: 3787-3798.
- LIBES, S. M. 1992. *An introduction to marine Biogeochemistry*. (Ed) John Wiley & Sons, New York, USA. 734 pp.
- MÁRQUEZ, A. 2015. *Dinámica de nutrientes y del sistema carbónico en la depresión oriental de la cuenca de Cariaco, Venezuela*. Trab. Grad. Dr. Ciencias Marinas, Universidad de Oriente, Cumaná, Venezuela. 192 pp.
- MÁRQUEZ, A., J. ROMERO, L. TROCCOLI-GHINAGLIA, W. SENIOR, A. LEMUS & Á. GONZÁLEZ. 2024. Variación del sistema carbónico en una zona costera del Caribe dedicada al cultivo de mitilidos: Caso golfo de Cariaco. *Acta Oceanogr. Pac*.6 (1): 65-82.
- MARTÍNEZ-TREJO, J. A., J. G. CARDOSO-MOHEDANO, J. A. SÁNCHEZ-CABEZA, J. M. HERNÁNDEZ-AYÓN, A. C. RUIZ-FERNÁNDEZ, M. A. GÓMEZ-PONCE & R. A. MARTÍNEZ-GALARZA. 2021. *Estudio del sistema de carbonatos en la laguna de Términos, Campeche*. En: Memorias del Simposio de Carbono en México. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Monterrey, Nuevo León.
- MEHRBACH, C., C. CURBERSON, J. HAWLEY & T. PYTKOWICZ. 1973. Measurement of the apparent dissociation constants of carbonic acid in seawater at atmospheric pressure. *Limnol. Oceanogr*. 18: 897-907.
- MILLERO, F.J. 1995. The thermodynamics of the carbonic acid system in the oceans. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 59: 661-667.
- MITSCH, W. J., B. BERNAL & A. M. NAHLIK. 2022. Wetlands, carbon, and climate change: A global perspective. *Nature Geoscience*, 15(7): 492–501, <https://doi.org/10.1038/s41561-022-00989-0>
- MOYA, B. V., A. E. HERNÁNDEZ & H. ELIZALDE BORRELL. 2005. Los humedales ante el cambio climático. *Investigaciones Geográficas* (37):127-132. <https://doi.org/10.14198/INGEO2005.37.07>
- NORIEGA, C., M. ARAUJO, N. LEFÈVRE, M. FLORES-MONTES, F. GASPAR & D. VELEDA. 2015. Spatial and temporal variability of CO₂ fluxes in tropical estuarine systems near areas of high population density in Brazil. *Reg. Environ. Change* 15: 619-630. Doi: 10.1007/s10113-014-0671-3.
- PÉREZ, I. 2017. *Dinámica del carbono inorgánico y grado de saturación del CaCO₃ en el estuario del río Guadalete*. Trab. Grad. en Ciencias del mar, Universidad de Cádiz, Ciudad, España. 30 pp.
- RIEBESSELL, U., V.J. FABRY, L. HANSSON. & J.P. GATTUSO. 2010. *Guide to best practices for 185 ocean acidification research and data reporting*. IN: Riebesell *et al.* (Eds). EUR24328 IN: Publication Office of the European Union, 260 pp

- RODRÍGUEZ, J., D. LÓPEZ, A. MÁRCANO, J. LÓPEZ, A. GUILARTE & J. BARRETO. 2008. Composición macroflorística de la laguna El Hato en el monumento natural laguna de Las Marites, isla de Margarita. (Num. Congreso) *Congreso Científico de la Universidad de Oriente*, 7 pp.
- SARMIENTO, J. & N. GRUBER. 2006. *Ocean biogeochemical dynamics*. Princeton, Woodstock: Princeton University Press, 503 pp.
- STUMM, W. & J. J. MORGAN 1981. *Aquatic Chemistry*, Second Edition. Wiley (Ed), New York, USA, 180 pp.
- YANG, B., Z. ZHANG, Z. CUI, Z. XIE, B. CHEN, H. ZHENG, B. LIAO, J. ZHOU & B. XIAO. 2023. Multiple Factors Driving Carbonate System in Subtropical Coral Community Environments along Dapeng Peninsula, South China Sea. *Atmosphere*.14: 688, <https://doi.org/10.3390/atmos14040688>.

Recibido: Agosto 2025

Aceptado: Noviembre 2025