

Bahía de San Quintín: laboratorio natural para el estudio del ciclo marino del nitrógeno

San Quintin Bay: natural laboratory for the study of the marine nitrogen cycle

Cristian Hakspiel Segura*

Universidad Autónoma de Baja California, México

chakspiel@uabc.edu.mx

 <https://orcid.org/0000-0003-0664-5494>

Víctor F. Camacho Ibar

Universidad Autónoma de Baja California, México

vcamacho@uabc.edu.mx

 <https://orcid.org/0000-0003-2424-1979>

Guillermo A. Samperio Ramos

Universidad Autónoma de Baja California, México

guillermo.samperio@uabc.edu.mx

 <https://orcid.org/0000-0003-3493-076X>

Recepción: 21 de mayo de 2024

Aprobación: 24 de octubre de 2024



RESUMEN

Se explican las rutas biogeoquímicas clave para el balance del nitrógeno en la Bahía de San Quintín, Baja California. Para ello, se describen los principales factores que influyen en la actividad tanto de procesos reconocidos como de las rutas de remoción emergentes, propuestas o aceptadas en ambientes marinos recientemente. Además, se examina cómo la actividad ostrícola influye en el ingreso y remoción de nitrógeno en los sedimentos. Esta revisión destaca a la Bahía de San Quintín como un “laboratorio natural” para el estudio del ciclo del nitrógeno y como centinela frente a la variabilidad ambiental y climática. El nitrógeno es uno de los principales promotores de la productividad primaria en los ecosistemas marinos.

PALABRAS CLAVE: pastos marinos, ostricultura, fijación de nitrógeno, desnitrificación, oxidación anaeróbica del amonio.

ABSTRACT

This article explores the key biogeochemical pathways for the balance of this element in San Quintin Bay, Baja California. To this aim, a description of the main factors influencing the activity of both known processes and emerging, recently proposed, or accepted removal pathways in the marine environment will be provided. In addition, it examines how oyster farming activity in the bay may play a role in nitrogen input and removal sediments. Our review highlights San Quintin Bay as a “natural laboratory” for the study of nitrogen cycle and as a sentinel for environmental and climate variability. Nitrogen is one of the main drivers of primary productivity in marine ecosystems.

KEYWORDS: eelgrass, oyster farming, nitrogen fixation, denitrification, anaerobic ammonium oxidation.

INTRODUCCIÓN

La Bahía de San Quintín (BSQ) es una laguna costera del Pacífico nororiental mexicano, dentro del municipio de San Quintín, en el estado de Baja California. Debido a sus características geomorfológicas y a la influencia del sistema de la Corriente de California, este ecosistema es uno de los más sobresalientes de la región en cuanto a su complejidad ecológica, productividad y prestación de servicios ecosistémicos, tales como el suministro de alimentos a través de la pesca y la ostricultura, ambientales (mantenimiento de fotosíntesis y ciclos de nutrientes) y socioculturales (recreación, esparcimiento y generación de conocimiento científico) (Aguirre-Muñoz *et al.*, 2001; Cuellar-Martínez *et al.*, 2019; Keyes *et al.*, 2021).

*AUTOR PARA CORRESPONDENCIA

chakspiel@uabc.edu.mx

El limitado impacto ambiental que ejercen los asentamientos urbanos cercanos sobre la laguna, reflejado en los parámetros de calidad del agua, favorece el desarrollo de actividades económicas productivas como el cultivo semintensivo de bivalvos. La actividad ostrícola se lleva a cabo en el brazo oeste de la laguna, conocida como Bahía Falsa. Allí el agua marina tiene un tiempo de recambio (periodo que tarda cierto volumen de agua en ser reemplazado) cercano a los 4 días, comparado con el brazo este denominado Bahía San Quintín con un tiempo de recambio de alrededor de 14 días. Una mayor renovación disminuye el riesgo potencial de que las actividades humanas que allí tienen lugar alteren la calidad del agua y desencadenen eventos de eutrofización por el incremento en el aporte de nutrientes inorgánicos (Melaku-Canu *et al.*, 2016; Aveytua-Alcazar *et al.*, 2020).

Dado el significativo acervo de publicaciones científicas y de literatura gris generado en instituciones educativas y centros de investigación de Baja California, la laguna de BSQ se ha consolidado como uno de los ecosistemas marinos más estudiados y mejor comprendidos de la región. A pesar de ello, sigue siendo incipiente el entendimiento de las interacciones biológicas, químicas, y geológicas (usualmente conocidas como *biogeoquímicas*), así como las físicas, que definen el comportamiento del nitrógeno, uno de los principales elementos que controlan la productividad biológica del Pacífico mexicano (Evans *et al.*, 2023).

De acuerdo con este contexto, se pretenden explorar los componentes dominantes del ciclo del N en el contexto de la laguna de BSQ, así como describir algunos de los hallazgos recientes sobre la incidencia de procesos reconocidos y emergentes en la biogeoquímica de este elemento en el ambiente sedimentario. Estas rutas metabólicas o reacciones se diferencian entre sí, básicamente, en que la ocurrencia de estas últimas en el medio marino no ha sido propuesta, probada o aceptada de manera generalizada, por lo que se consideran atributos emergentes que deben situarse bajo nuevos paradigmas. En segundo lugar, con base en la importancia del N como un actor en la problemática de la polución y el cambio climático, se busca proponer a la laguna de BSQ como un “laboratorio natural” para el estudio del ciclo marino del nitrógeno y como un ecosistema centinela para analizar la variabilidad ambiental de la región. En este sentido, para lograrlo, se hace una reflexión sobre las investigaciones que se llevan a cabo actualmente en BSQ que aportan una de las primeras evidencias de los procesos novedosos de remoción de N en ecosistemas costeros en el mundo.

1. CONTEXTO AMBIENTAL Y ECOLÓGICO DE LA BAHÍA DE SAN QUINTÍN

El paisaje de este lugar ha sido modelado desde hace más de 180 000 años por el surgimiento de volcanes, hoy en día extintos, de los cuales quedan aún las evidencias de sus conos, así como de la acumulación de sus minerales ígneos (que se originan del material en fusión del interior de la tierra) que forman parte del suelo y de los sedimentos de la laguna (CONANP, 2023). Por encontrarse en una zona semiárida, donde la precipitación de lluvia es escasa y la evaporación es alta, el aporte fluvial a esta laguna semicerrada de 42 km² de superficie se le considera poco importante o ausente, por lo que su agua suele ser más salada que la del océano (Hernández-Ayón *et al.*, 2004; Ribas-Ribas *et al.*, 2011).

La principal entrada de nutrientes inorgánicos (como nitrógeno, fósforo y silicio) al sistema ocurre con el flujo de agua oceánica a través de su única entrada, la boca de la laguna; sin embargo, las características de este aporte fluctúan estacionalmente. Entre abril y junio, cuando el viento del noroeste sopla con más fuerza y persistencia, las aguas frente a la costa que alimentan la laguna suelen ser más frías y ricas en estos nutrientes como resultado del afloramiento de agua profunda, un fenómeno conocido como “surgencia costera” (Camacho-Ibar *et al.*, 2003). Una señal de que ocurre este proceso oceanográfico local es una mayor cantidad de niebla que viene del mar y cubre la costa como resultado del enfriamiento de la masa de aire.

Los principales productores primarios dentro de la laguna son las algas, microalgas y pastos marinos. Estos últimos son representados únicamente por la especie *Zostera marina*, cuyas praderas abarcan cerca del 43% (~18 km²) de la extensión de la laguna (Krause *et al.*, 2021). El sistema acuático es somero (profundidad máxima: 15 m; promedio: 2 m) y está afectado diariamente por el vaivén de las mareas que exponen hasta un 40% de su superficie

durante las mareas más bajas del año. La laguna alberga hábitats de alta complejidad ecológica y productividad que han sido aprovechados para el desarrollo de actividades económicas como la pesca de subsistencia y el cultivo de ostiones. En la zona de marismas que abarca las áreas circundantes a la laguna que están sujetas a la inundación periódica por las mareas crece un tipo de vegetación semiacuática a terrestre, conformada principalmente por plantas como *Salicornia virginica* y pastos como *Spartina foliosa*. Estas plantas halófitas, que toleran condiciones de alta salinidad, favorecen la retención del sedimento y actúan como filtro biológico frente a potenciales excesos de nutrientes y contaminantes (figura 1) (Granillo *et al.*, 2012).

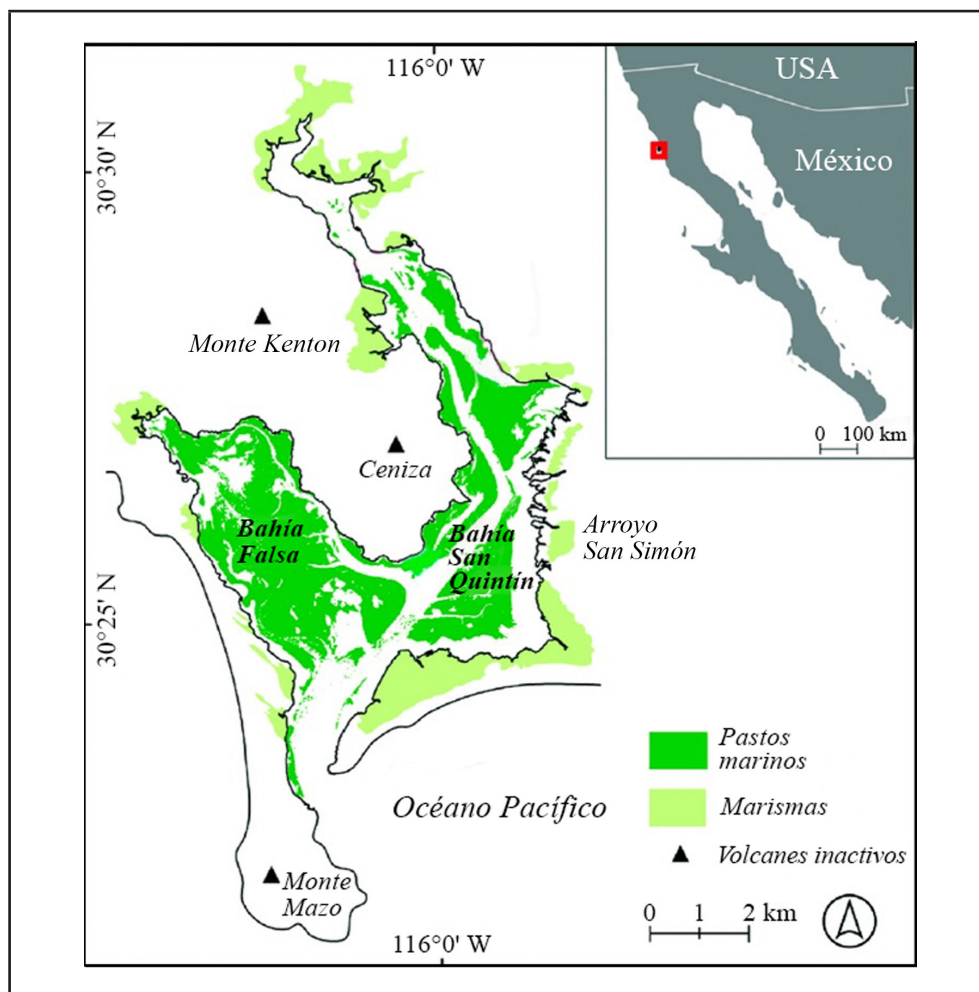


FIGURA 1
Mapa de Bahía de San Quintín

Fuente: Krause *et al.*, 2021: 3.

Nota: en color se muestra la distribución espacial de las áreas con cobertura de pastos marinos y marismas.

Esta laguna costera es considerada como una zona vulnerable a la destrucción de hábitats y la pérdida de biodiversidad debido a la sobrepesca, la introducción de especies invasoras, la polución y la extracción de roca volcánica en áreas aledañas. No obstante, no parece haber indicios recientes de que la calidad ambiental haya decaído sustancialmente a través de los años en la BSQ, por lo que se mantienen en algunas áreas de la laguna condiciones aún prístinas (Jorgensen *et al.*, 2007; Cuellar-Martinez *et al.*, 2019).

Desde 2008, BSQ es considerada por su riqueza y diversidad de especies como un humedal de relevancia internacional de acuerdo con la Convención Ramsar (1971). Asimismo, desde 1999, la bahía forma parte de una de las 272 áreas de importancia para la conservación de las aves (AICA), que la posiciona como un punto estratégico de

la ruta migratoria de aves playeras del Pacífico, en el cual se congregan temporalmente más de 35 000 individuos durante el invierno (CONABIO, 1999; Granillo *et al.*, 2012).

2. EL SEDIMENTO Y LOS CICLOS DE NUTRIENTES

En las últimas dos décadas se ha especulado que un incremento poblacional de San Quintín, así como el crecimiento y consolidación de actividades socioeconómicas, podría impactar en la conservación de la laguna. Sin embargo, se ha observado que, a pesar de estos riesgos potenciales, el sistema acuático mantiene una considerable productividad, riqueza y diversidad biológica. Diferentes investigaciones, llevadas a cabo durante las últimas dos décadas han sugerido que tanto la dinámica física del mar como la topografía del área y los procesos biogeoquímicos del agua y del sedimento han resguardado el ecosistema frente a perturbaciones ambientales moderadas (Keyes *et al.*, 2021; Rodríguez, 2022).

Para el que no está familiarizado con el término *sedimento*, este compartimento del ecosistema está constituido por los depósitos de partículas (sólidas y coloidales) que se han acumulado en el fondo de los sistemas acuáticos. El sedimento ofrece sustrato y nutrientes para el establecimiento de plantas acuáticas, algas, invertebrados y pequeños vertebrados. Sin embargo, también es el ambiente idóneo para la colonización por parte de millones de microbios (*e. g.*, microalgas, bacterias, hongos y virus) que por sus características fisiológicas son capaces de desarrollarse incluso en microambientes de índole extremo. Algunas de estas condiciones en sedimentos van desde la ausencia o mínimos niveles de oxígeno disuelto, producto de la intensa respiración aeróbica de la materia orgánica, hasta el pH muy bajo (ácido), consecuencia del exceso de dióxido de carbono y de otras sustancias producidas durante la respiración anaeróbica. Un ejemplo del caso anterior sería el efecto de las bacterias que reducen microbiológicamente el sulfato a ácido sulfhídrico (Burdige, 2011). Es por esto último que muchos de estos sedimentos, cuando son perturbados, liberan ese olor característico a “huevo podrido”.

Para entender la trascendencia biogeoquímica de los sedimentos es indispensable precisar que los ciclos de nutrientes que ocurren allí implican transferencias continuas de los elementos químicos de importancia biológica (por ejemplo carbono, nitrógeno, fósforo, azufre, etcétera), desde el entorno físico a los seres vivos y de vuelta al medioambiente. Estos ciclos de manera natural están interconectados entre sí. La concepción de ciclo nos lleva a pensar en una tendencia al estado en equilibrio del sistema, es decir, a un balance entre los flujos de entrada y los flujos de salida. Sin embargo, no siempre este balance es alcanzado y eventualmente estos flujos pueden estar desacoplados espacial o temporalmente o han sido alterados a escala local y regional como respuesta a forzamientos antropogénicos (Fortune *et al.*, 2023).

El sedimento, por su parte, funge como un almacén transitorio que recibe materia orgánica y libera nutrientes al agua suprayacente promoviendo los patrones de su oferta y demanda. Así, las interacciones entre el sedimento y el agua en ambientes costeros poco profundos, como en BSQ, llegan a generar un efecto relevante sobre la calidad del agua, la producción primaria, la dinámica de las redes tróficas y el cambio climático (Vincent *et al.*, 2021).

3. EL NITRÓGENO EN LOS SEDIMENTOS SOMEROS

El nitrógeno (N), aunque es extremadamente abundante en el aire que respiramos y como gas disuelto en el agua de mar, suele encontrarse empobrecido como nutriente (nitrato, nitrito y amonio) en las aguas superficiales marinas, que llega a convertirse en un factor limitante para el crecimiento de los productores primarios (Moore *et al.*, 2013). El imprescindible requerimiento de N como nutriente se debe a su cuarto lugar en abundancia dentro de los elementos que componen la materia orgánica, por lo que es un componente estructural de biomoléculas esenciales como los aminoácidos (unidades que forman las proteínas), los pigmentos fotosintéticos (moléculas para captar y proteger de la energía luminosa) y los ácidos nucleicos (moléculas para el almacenamiento de la información genética y su expresión en proteínas funcionales), entre otras.

De manera similar al suelo de un jardín, a un campo agrícola o a un bosque, los sedimentos acuáticos se comportan como fuentes de nutrientes nitrogenados o como sumideros al removerlos en forma de gases (N_2 y óxido nitroso, N_2O) hacia la atmósfera. Así como el sedimento nutre la vida marina, también recibe de vuelta sustancias y partículas orgánicas inertes de la superficie que se depositan al fondo, las cuales serán recicladas en nutrientes inorgánicos por microorganismos descomponedores y subsecuentemente, removidas bajo condiciones deficientes de oxígeno a N_2 y N_2O , que cierran así el ciclo (Damashek y Francis, 2018).

Cuando el hábitat acuático recibe excesivas cantidades de N u otro nutriente, por ejemplo a través de descarga de aguas residuales de origen urbano, industrial o agrícola, se produce un incremento en el suministro de materia orgánica al ecosistema, proceso conocido como *eutrofización*. Este generalmente causa deterioro de las condiciones ambientales por la desmesurada estimulación del crecimiento de organismos fotosintéticos y por la consecuente descomposición de la materia orgánica generada, lo cual agotaría el oxígeno, tanto en el sedimento superficial como en la columna de agua. En consecuencia, además de estimular el reciclamiento e hipoxia, esta alteración ambiental retroalimenta procesos de remoción de N dentro del sedimento, de los cuales hablaremos más adelante, que pueden paliar el enriquecimiento agravado por la eutrofización en el sistema (Díaz *et al.*, 2019).

4. PRADERAS DE PASTOS MARINOS A LA CAPTURA DE NUTRIENTES NITROGENADOS

Para la laguna de BSQ, así como para cualquier otro ecosistema costero, la abundancia, diversidad y actividad de los productores primarios determina los flujos de nutrientes a lo largo de la red trófica y a su vez retroalimenta algunas de las rutas de transformación del N que hacen parte de su ciclo. La mayor contribución de los pastos marinos a la actividad fotosintética puede inferirse a simple vista cuando se observan sus densas y exuberantes praderas que predominan en el fondo de la laguna (Ward *et al.*, 2003). Sin embargo, las macroalgas marinas, como la lechuga de mar (*Ulva* spp.) y el pelillo (*Gracilaria* spp.), llegan a ser estacionalmente muy abundantes en la zona intermareal y submareal y proliferan cuando la laguna es influenciada por el ingreso de agua de la surgencia costera (Zertuche-González *et al.*, 2009).

De acuerdo con Sandoval-Gil *et al.* (2016, 2019), los pastos marinos de BSQ son plantas altamente eficientes en la adquisición de nutrientes en el agua y el sedimento a través de sus hojas y raíces respectivamente, tanto en forma de nitrato como de amonio. El nitrato suele ser la forma inorgánica mayoritaria en la columna de agua de ambientes marinos bien oxigenados. Sin embargo, el amonio, que procede de la excreción de seres vivos y la descomposición de la materia orgánica, predomina dentro del sedimento sobre el nitrato. Esta capacidad de incorporar y asimilar formas nitrogenadas por parte de los pastos marinos es comparable con la función de un filtro de agua, la cual atenúa el enriquecimiento excesivo de nutrientes causado por la dinámica natural durante el periodo de surgencia y mezcla por el viento, o derivado de la actividad humana (descargas de aguas agrícolas y residuales). Por ejemplo, la captación de nitrato de los pastos marinos de BSQ ($4.2 \text{ mmol N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; Sandoval-Gil *et al.*, 2019) representaría hasta el 64% del aporte oceánico a la laguna durante eventos intensos de surgencia costera, mientras que el flujo adicional se repartiría entre la captación por macroalgas y fitoplancton (no cuantificada aún) y la eliminación de N ($\sim 5\%$) mediante procesos sedimentarios (Samperio-Ramos *et al.*, 2024a; 2026).

5. FUENTES Y SUMIDEROS DE NITRÓGENO EN SEDIMENTOS DE LA BAHÍA DE SAN QUINTÍN

Nuestras experiencias en BSQ nos enseñan que los principales aportes externos de N, en términos de magnitud y estimulación a los productores primarios, están determinados por diferentes mecanismos de transporte horizontal de agua oceánica enriquecida principalmente en nitrato (figura 2). Estos flujos de agua marina al interior del sistema se asocian principalmente a las corrientes que se producen por la subida y la bajada de la marea y por los vientos, y en menor proporción al agua que ingresa a través de la boca de la laguna para reponer el volumen de agua evaporada en su interior. Este último aporte oceánico de N, llamado también *advección residual*,

constituye menos del 1% ($\sim 0.05 \text{ mmol N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) del ingreso total de este elemento al sistema, en donde el aporte neto es dominado mayoritariamente (88-93%; $2\text{-}3.5 \text{ mmol N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) por la mezcla por mareas (Camacho-Ibar *et al.*, 2003; Aveytua-Alcazar *et al.*, 2020). Estos flujos suelen ser más intensos durante la temporada de surgencias costeras (abril-junio) que ocurren frente a la laguna. A pesar de esto, sus contribuciones al balance de N dependen de la frecuencia e intensidad de la surgencia que a su vez fluctúa estacionalmente y año con año por la variabilidad climática (Hernández-Ayón *et al.*, 2004).

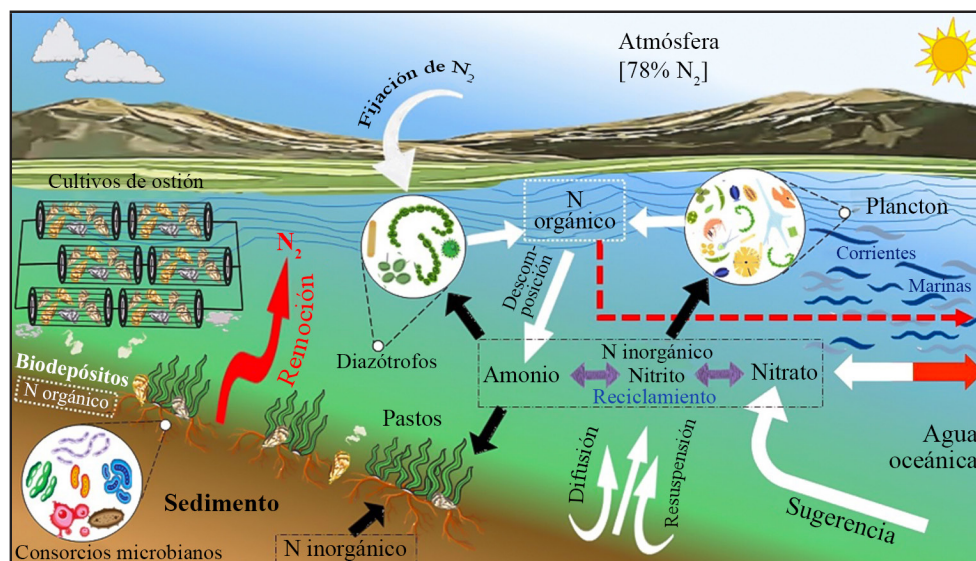


FIGURA 2

Modelo conceptual de rutas reconocidas del ciclo del N en Bahía de San Quintín

Fuente: elaboración propia.

Nota: flechas blancas y rojas corresponden a los aportes y pérdidas de N respectivamente; flechas negras y violeta indican la captación biológica y reacciones no asimilatorias internas del N respectivamente.

El aporte de N asociado a la precipitación, la escorrentía y la infiltración de agua subterránea que podría incidir en la laguna se considera despreciable en el balance parcial (Camacho *et al.*, 2003). Por otra parte, la depositación atmosférica seca de N, aunque es un componente crucial del ciclo, es un aporte que no ha sido caracterizado en esta región en cuanto a su composición de N reactivo (por ejemplo amoniaco, NH_3 , y óxidos de nitrógeno, NO_x) y su flujo (figura 3). Este aporte impacta a los ecosistemas marinos a través de gases, polvos y aerosoles que son transportados por el patrón de los vientos desde las zonas áridas y las ciudades del continente y la península hasta las aguas costeras y oceánicas donde entran en disolución. Por ejemplo, un estudio en la Bahía de La Paz, costa suroriental de la península de Baja California, estimó flujos significativos de depositación de N reactivo (0.14 y $0.74 \text{ mmol N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) en la fracción de gases más aerosoles (Hakspiel-Segura, 2014), por lo que considerar este aporte en BSQ, así como el efecto de la dirección e intensidad de los vientos y brisas marinas, permitiría una comprensión integral de algunos procesos biológicos y productivos del ecosistema.

A pesar del desconocimiento sobre estos flujos, recientemente a través de incubaciones experimentales de sedimentos de la laguna hemos documentado un aporte alterno de este elemento en los sedimentos por actividad biológica denominada “fijación biológica de N₂” (FBN). En este proceso, un grupo restringido de microorganismos procariontes (sin membrana nuclear definida), conocidos como *diazotrofos*, convierten el nitrógeno molecular (N_2), una forma no biodisponible que constituye cerca del 78% de los gases disueltos en el agua, en amoniaco, una molécula biológicamente reactiva, empleada para la construcción de biomoléculas. La FBN en los sedimentos de BSQ, evaluada mediante el método de ensayo de reducción de acetileno (ARA por su acrónimo en inglés) y el uso de sustancias inhibidoras, indica que bacterias heterotróficas sulfato reductoras juegan un papel preponderante

en esta actividad tanto en sedimentos cubiertos de pastos marinos y en sus raíces (rizosfera), como en aquellos sin vegetación, que representa hasta el 8% ($\sim 0.30 \text{ mmol N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) (figura 3) del aporte de N inorgánico proveniente del océano durante una condición intermedia de surgencia (Aldrich *et al.*, 2024). Todavía desconocemos la magnitud de la FBN en la columna de agua. Sin embargo, presumimos que su aporte es efectuado primordialmente a través de cianobacterias unicelulares del linaje UCYN-A que viven como endosimbiontes (nitroplastos) en microalgas primnesiofitas, con base en una investigación frente a la península de Baja California en la región del Sistema Sureño de la Corriente de California ($23.0 \text{ nmol N l}^{-1} \text{ d}^{-1}$; Turk-Kubo *et al.*, 2021).

Otra ruta más en el ciclo del N que contribuye a los flujos de N hacia la columna de agua ocurre en la zona carente de oxígeno (zona anaeróbica) de los sedimentos es la llamada reducción *desasimilatoria* del nitrato a amonio (DNRA por su acrónimo en inglés). Este proceso también lo llevan a cabo los procariontes y sucede en dos etapas: en la primera, el nitrato se reduce a nitrito en la membrana periplásmica; en la segunda, ocurre la reducción respiratoria de nitrito a amonio en el citoplasma. Un estudio reciente de nuestro grupo de trabajo indica que en BSQ, la DNRA aporta entre un 7 y 22% del flujo neto de amonio desde el sedimento hacia la columna de agua que alcanza hasta $\sim 8 \text{ mmol N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Este aporte contrasta con un flujo sustancialmente más bajo de nitrito ($0.7\text{-}1.1 \text{ mmol N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) (Solís-Tuberquia, 2023). De acuerdo con estos valores, el flujo desde los sedimentos, resultado del reciclamiento y otros procesos como la DNRA, constituyen una ruta dominante de N a la columna de agua que moviliza de ~ 7 y 14 veces la magnitud de los aportes y los mecanismos de remoción de N respectivamente ponderados hasta el momento (figura 3). Esto, en parte, deja entrever el desconocimiento y lo distante que estamos al balance real de este elemento, así como al potencial productivo y a la capacidad de carga del ecosistema.

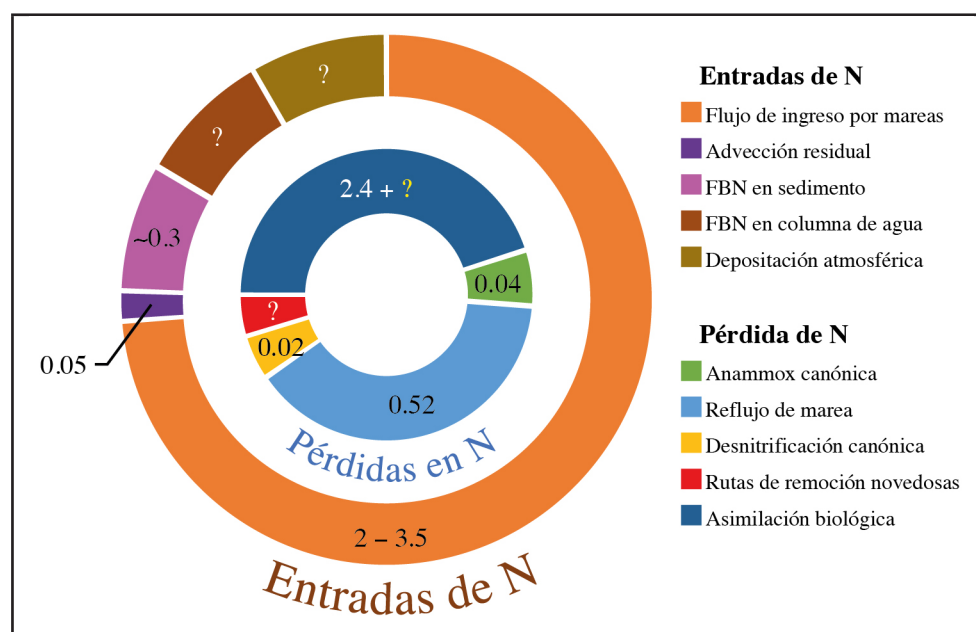


FIGURA 3

Contribución relativa de procesos reconocidos y emergentes a las fuentes y rutas de remoción de N en laguna Bahía de San Quintín

Fuente: elaboración propia.

Nota: círculo externo e interno corresponden a la contribución de los flujos de las rutas de entrada y pérdida de N respectivamente.

Unidades de flujos en $\text{mmol N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

Por su parte, la remoción de N como N_2 , y en menor proporción como N_2O , ocurre a través de diversos y complejos procesos microbianos que por tradición han sido atribuidos a la desnitrificación y a la oxidación anaeróbica de amonio (*anammox* por su acrónimo en inglés). El primero es un proceso de procariontes principalmente

heterótrofos (propio de los organismos que no producen su propio alimento) que requieren el nitrato para oxidar la materia orgánica, de manera análoga a como lo haría el oxígeno en las mitocondrias de nuestras células para la obtención de energía; el segundo, en cambio, lo realizan quimioautótrofos (como las plantas, pero sin usar la luz solar como fuente de energía) y se caracteriza por oxidar el amonio acoplado al nitrito como aceptor de electrones para formar el gas N_2 (Chen *et al.*, 2021).

La magnitud de estos dos procesos sumados ($\sim 0.07 \text{ mmol N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) muestra valores equiparables entre el área relativamente prístina de la laguna (brazo oriental de BSQ) y el área con impacto potencial de la actividad ostrícola (Bahía Falsa), lo cual muestra en promedio un aporte de *anammox* entre el 50 y 65% a la remoción total de N por rutas reconocidas (Solís-Tuberquia, 2023). Como una aproximación gruesa, si se extrapolara este valor promedio al área de BSQ se estarían removiendo cerca de 19 toneladas de N al año, lo que no debe interpretarse como algo perjudicial, sino más bien como una manera en la que naturalmente el sedimento contribuye a la homeostasis y resiliencia del ecosistema al enriquecimiento natural o de origen antropogénico.

5. 1. Nuevos participantes en la remoción de nitrógeno

Gracias a los recientes hallazgos en sedimentos de diferentes sitios del litoral mexicano, incluyendo los de BSQ (Ríos del Toro *et al.*, 2018a, 2018b; Avendaño *et al.*, 2024), se han vislumbrado procesos inéditos de remoción de N respecto a las rutas reconocidas que ya se mencionaron. Las evidencias experimentales y geoquímicas sugieren que estas recién descubiertas rutas microbianas también realizan una oxidación anaeróbica del amonio a N_2 . Sin embargo, esta ocurre acoplado a una reducción de otras sustancias, diferentes al nitrito, que pueden variar desde el sulfato (segundo anión más abundante en el agua de mar), algunos metales muy enriquecidos en los sedimentos costeros de esta región como el manganeso (Mn) y el hierro (Fe), hasta una gran variedad de moléculas orgánicas naturales con alta actividad de oxidación-reducción como las sustancias húmicas y las quinonas. Estas últimas, por ejemplo, que son originadas por diversos procesos bioquímicos y abióticos se acumulan en los sedimentos y posteriormente durante la oxidación anaeróbica de amonio se reducen a compuestos fenólicos.

Varios de estos procesos emergentes del ciclo del N, aún no plenamente cuantificados a nivel global, ya comienzan a conocerse por sus nombres llamativos. En algunos casos, se nombran combinando el elemento químico que actúa como aceptor de electrones con el término *ammox*, que alude a la oxidación anaerobia del amonio. Así surgen términos como *Sulfammox*, *Mnammx* y *Feammox*, en los que el amonio se oxida en ausencia de oxígeno mientras se reduce sulfato, manganeso o hierro, respectivamente. Entre estos procesos, *Feammox* ha cobrado especial relevancia en ambientes costeros y lagunas someras ricas en hierro reactivo y materia orgánica. Estudios recientes realizados en BSQ han demostrado que este proceso microbiano puede explicar más del 60 % de la remoción anaerobia de amonio en los sedimentos, que supera incluso a procesos considerados “clásicos” del ciclo del nitrógeno, como la desnitrificación y el *anammox* convencional (Samperio-Ramos *et al.*, 2026). Estos hallazgos ponen de manifiesto que la eliminación del nitrógeno no siempre sigue las rutas canónicas descritas en los libros de texto, sino que puede ocurrir mediante vías alternativas estrechamente acopladas al ciclo del hierro y moduladas por las condiciones geoquímicas locales del ecosistema.

6. LA OSTRICULTURA Y SU IMPACTO POTENCIAL EN EL CICLO DEL NITRÓGENO

En la actualidad, la ostricultura es la actividad socioeconómica de mayor repercusión en la laguna, la cual tuvo sus orígenes a finales de la década de los setentas con el emprendimiento de las primeras granjas de cultivo de ostión japonés (*Crassostrea gigas*) y más adelante del ostión Kumamoto (*C. sikamea*). Ambas especies, originarias de Asia, fueron introducidas exitosamente para la acuicultura en Norteamérica gracias a su tolerancia a un amplio rango de condiciones ambientales, su rápido crecimiento y a una no detectable rivalidad con las especies locales.

En la actualidad, la ostricultura opera a lo largo de aproximadamente 730 ha en Bahía Falsa a través de permisos y concesiones que se han otorgado hasta por 20 años. Esta área cuenta con cerca de 15 empresas ostrícolas reconocidas por el Programa Mexicano de Sanidad de Moluscos Bivalvos y la FDA (Food and Drugs Administration), que han acreditado la alta calidad del producto, lo que ha facilitado su afluencia comercial a mercados de Estados Unidos, donde se vende la mayor parte de la producción. También se comercializa a localidades cercanas como Tijuana y Ensenada, aunque ya se distribuye a otras regiones del territorio nacional como Guadalajara, Monterrey, Puebla y Ciudad de México.

Dentro de las áreas de cultivo de ostión, las semillas sembradas de este molusco se encuentran dispuestas dentro de estructuras sumergidas para su crecimiento (en canastas o sartas), por lo tanto ya en esta etapa no requieren de mayores atenciones. Solo los dejan crecer y eventualmente remueven el excesivo crecimiento de macroalgas. Estos moluscos se alimentan de microorganismos y partículas que filtran del agua, por lo que no tienen grandes inconvenientes en esperar a que su alimento llegue a sus branquias. Por otro lado, los desechos de estos organismos, en forma de heces fecales y pseudoheces (partículas no digeridas, embebidas en mucus y desechadas con el agua filtrada a través del sifón exhalante) constituyen biodepositos que se asientan en la superficie del sedimento, además de aportar una fuente de alimento para las poblaciones heterotróficas microbianas (Samperio-Ramos *et al.*, 2024b).

Actualmente, desconocemos el impacto real que la actividad ostrícola trae a los ciclos de nutrientes y por consiguiente al equilibrio ecológico, lo que limita la posibilidad de incrementar o expandir su producción en la laguna. Si bien hay varias incertidumbres sobre el efecto de los biodepositos en el sedimento y el balance del N, hemos recabado un buen acervo de evidencias experimentales sobre la asociación positiva que existe entre los procesos de remoción novedosos y la rizosfera de las áreas cubiertas por los pastos marinos. Recientemente, Samperio-Ramos *et al.* (2024a) detectaron un incremento de hasta 62% en la remoción de N por *Feammox* más *Mnammo*x en la rizosfera en comparación con sedimentos sin vegetación de zonas aledañas. Este hábitat vegetado, además de proveer exudados orgánicos, juega un papel relevante en la estimulación de la abundancia absoluta de bacterias desasimilatorias reductoras de metales, además de que favorece la acumulación de óxidos de Fe(III) y Mn(IV) necesarios para su actividad.

Otras de las preguntas que tenemos todavía por responder es ¿por qué ocurre la FBN en los sedimentos cuando este nutriente se encuentra biológicamente disponible en grandes cantidades? Estudios en otros sistemas acuáticos nos han dado pistas de que gran parte de los flujos de remoción y adición de N deben estar conectados con la naturaleza de la materia orgánica (si es de origen terrestre o marino, si es de fácil degradación, rica en carbohidratos o proteínas, etc.), así como con la disponibilidad de otros sustratos que permiten la ocurrencia de estos procesos microbianos. Probar esta hipótesis tiene implicaciones relevantes no solo para la ciencia sino también en diferentes esferas socioeconómicas. Suponemos que la ostricultura podría ser la fuente alterna de materia orgánica que retroalimenta los flujos de N en el sedimento y conocer su efecto ayudará a ponderar qué “capacidad de carga” presenta la laguna de BSQ respecto a la actividad ostrícola.

PROSPECTIVA

Sabemos que el aprovechamiento de los recursos hidrobiológicos que provee BSQ es vulnerable a contingencias ambientales. Por esta razón, es relevante seguir monitoreando y realizando estudios experimentales que reproduzcan las alteraciones potenciales al ciclo del N, sobre todo aquellas desencadenadas por eventos climáticos extremos y de origen antropogénico. Además, la generación de conocimiento sobre la retroalimentación entre los procesos microbianos, los productores primarios y el medioambiente es fundamental para comprender y aprovechar aquellos servicios ecosistémicos relacionados tanto con el potencial de retener como de eliminar el exceso de N. Así, durante los pulsos naturales y anómalos de nutrientes se logrará predecir el aporte del sedimento a la mitigación de impactos en los componentes más sensibles.

A partir de la comunicación de resultados científicos al público en general, es posible fomentar una educación ambiental a la comunidad que garantice un manejo racional de los recursos. Difundir y animar a la comunidad

el uso del término de “laboratorio natural” en BSQ es una alternativa creativa y un recurso viable que permite integrar ciencia, economía y una conciencia ambiental responsable. Este tipo de iniciativas sirve como ejemplo para otros ecosistemas costeros mexicanos que similarmente sobresalen por su productividad, biodiversidad y resiliencia ante el cambio climático e impacto antropogénico.

CONCLUSIONES

Este artículo describe las rutas biogeoquímicas preponderantes del ciclo del N que influyen en la productividad de BSQ. De manera general, se plantea que persisten varias rutas de este ciclo que aún no han podido ser cuantificadas y que determinan el balance entre las fuentes y sumideros de este elemento, como la captación biológica por el fitoplancton y macroalgas, la FBN en la columna de agua, la remineralización y la deposición atmosférica. Asimismo, se reportan procesos emergentes, como el *Feammox* y el *Sulfammox*, a los que se les evaluó por primera vez en el mundo su contribución potencial a la remoción del N inorgánico mediante investigaciones en los sedimentos de este y otros ecosistemas del litoral mexicano. A través de la difusión del conocimiento ya adquirido sobre el ciclo biogeoquímico del N y de la continuidad de las investigaciones en curso y futuras, promovemos a esta laguna de repercusión socioeconómica y ecológica como un laboratorio natural para el ciclo marino de este elemento y como un ecosistema centinela para analizar la variabilidad ambiental y climática de la región.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) por el apoyo al proyecto de Ciencia de Frontera 2019 (clave 682328) “Ciclo del nitrógeno en sedimentos marinos: procesos canónicos y ‘nuevos’ actores evaluados en una laguna costera influenciada por el afloramiento con acuicultura de ostras”, y por la beca de Estancia Posdoctoral por México 2022 otorgada a C. H. S. Asimismo, agradecemos a la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) por proporcionar la infraestructura, las instalaciones y el apoyo logístico a través del Laboratorio de Geociencias Ambientales del Instituto de Investigaciones Oceanológicas (IIO-UABC), lo que hizo posible el desarrollo de las investigaciones. Finalmente, agradecemos a los árbitros que revisaron anónimamente este artículo, ya que con sus observaciones contribuyeron a realizar mejoras sustanciales en su estructura.

REFERENCIAS

- Aguirre-Muñoz, A., Buddemeier, R. W., Camacho-Ibar, V. F., Carriquiry, J. D., Ibarra-Obando, S. E., Massey, B. W., Smith, S. V., & Wulff, F. (2001). Sustainability of coastal resource use in San Quintín, Mexico. *AMBIO*, 30(3), 142-149. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-30.3.142>
- Aldrich, A., Hakspiel-Segura, C., Samperio-Ramos, G. A., Delgadillo Hinojosa, F., Camacho Ibar, V. F., & Falcon, L. (2024). Sulphate-reducing bacteria dominate the benthic biological nitrogen fixation in an upwelling-influenced coastal lagoon [Poster Number 17]. *ASLO 2024 Meeting. 2-7 June 2024. Madison-Wisconsin, USA. Adapting to a Changing World*. <https://aslo.secure-platform.com/2024/solicitations/14/sessiongallery/1319/application/8449>
- Avendaño, K. A., Ponce-Jahen, S. J., Valenzuela, E. I., Pajares, S., Samperio-Ramos, G., Camacho-Ibar, V. F., & Cervantes, F. J. (2024). Nitrogen loss in coastal sediments driven by anaerobic ammonium oxidation coupled to microbial reduction of Mn(IV)-oxide. *Science of the Total Environment*, 903, 171368. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171368>

- Aveytua-Alcazar, L., Melaku Canu, D., Camacho-Ibar, V. F., & Solidoro, C. (2020). Changes in upwelling regimes in a mediterranean-type lagoon: A model application. *Ecological Modelling*, 418, 108908. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2019.108908>
- Burdige, D. J. (2011). Estuarine and coastal sediments –coupled biogeochemical cycling. In R. Laane & J. J. Middelburg (Eds.), *Treatise on estuarine and coastal science (vol. 5)* (pp. 279-316). Elsevier. <https://fs.wp.odu.edu/dburdige/wp-content/uploads/sites/1285/2016/04/2012-TOECS.pdf>
- Camacho-Ibar, V. F., Carriquiry, J. D., & Smith, S. V. (2003). Non-conservative P and N fluxes and net ecosystem production in San Quintin Bay, Mexico. *Estuaries*, 26, 1220-1237. <https://doi.org/10.1007/BF02803626>
- Chen, J.-J., Erler, D. V., Wells, N. S., Huang, J., Welsh, D. T., & Eyre, B. D. (2021). Denitrification, anammox, and dissimilatory nitrate reduction to ammonium across a mosaic of estuarine benthic habitats. *Limnology and Oceanography*, 66, 1281-1297. <https://doi.org/10.1002/lno.11681>
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). (1999). *Áreas importantes para la conservación de las aves en México. Área de San Quintín*. <http://conabioweb.conabio.gob.mx/aicas/doctos/NO-13.html>
- CONANP (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas). (2023). *Estudio previo justificativo para el establecimiento del área natural protegida Parque Nacional San Quintín, Baja California, México*. <https://www.conanp.gob.mx/pdf/separata/EPJ-PN-SanQuintin.pdf>
- Cuellar-Martinez, T., Ruiz-Fernández, A. C., Sánchez-Cabeza, J.-A. Pérez-Bernal, L.-H., & Sandoval-Gil, J. M. (2019). Relevance of carbon burial and storage in two contrasting blue carbon ecosystems of a north-east Pacific coastal lagoon. *Science of the Total Environment*, 675, 581-593. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.388>
- Damashek, J., & Francis, C. A. (2018). Microbial nitrogen cycling in estuaries: from genes to ecosystem processes. *Estuaries and Coasts*, 41, 626-660. <https://doi.org/10.1007/s12237-017-0306-2>
- Díaz, R. J., Rosenberg, R., & Sturdivant, K. (2019). Hypoxia in estuaries and semi-enclosed seas. In D. Laffoley & J. M. Baxter (Eds.), *Ocean deoxygenation: everyone's problem. Causes, impacts, consequences and solutions* (pp. 32-46). International Union for Conservation of Nature and Natural Resources. <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/02.5%20DEOX.pdf>
- Evans, N., Tichota, J., Ruef, W., Moffett, J., & Devol, A. (2023). Rapid expansion of fixed nitrogen deficit in the eastern Pacific Ocean revealed by 50-year time series. *Global Biogeochemical Cycles*, 37, e2022GB007575. <https://doi.org/10.1029/2022GB007575>
- Fortune, J., Butler, E. C. V., & Gibb, K. (2023). Estuarine benthic habitats provide an important ecosystem service regulating the nitrogen cycle. *Marine Environmental Research*, 190, 106121. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2023.106121>
- Granillo, M. I., Lazo de la Vega, A., Martínez-Ríos, Peynador, C., & Gómez-León, D. E. (2012). Diagnóstico y restauración de los humedales Ramsar de Baja California. En *Componente II: Proceso de Planificación para la Conservación de Sitios (PCS) para los humedales Ramsar de Baja California (segunda edición)*. Secretaría de Protección al Ambiente. Gobierno del Estado de Baja California, Pro Esteros, A.C., Centro Mexicano de Estudios para la Conservación, A.C. <https://proesteros.org/wp-content/uploads/2017/05/Componente2.pdf>
- Hakspiel-Segura, C. (2014). *Rutas y procesos fisiológicos del ciclo del nitrógeno en Cuenca Alfonso, Golfo de California* (tesis de doctorado en Ciencias Marinas). CICIMAR-IPN.
- Hernández-Ayón, J. M., Galindo-Bect, M. S., Camacho-Ibar, V., García-Esquivel, Z., González-Gómez, M. A., & Ley-Lou, F. (2004). Dinámica de los nutrientes en el brazo oeste de Bahía San Quintín, Baja California, México, durante y después de El Niño 1997/1998. *Ciencias Marinas*, 30, 119-132. <https://doi.org/10.7773/cm.v30i1.115>

- Jorgensen, P., Ibarra-Obando, S. E., & Carriquiry, J. D. (2007). Top-down and bottom-up stabilizing mechanisms in eelgrass meadows differentially affected by coastal upwelling. *Marine Ecology Progress Series*, 333, 81-93. <https://doi.org/10.3354/meps333081>
- Keyes, A. A., McLaughlin, J. P., Barner, A. K., & Dee, L. E. (2021). An ecological network approach to predict ecosystem service vulnerability to species losses. *Nature Communications*, 12, 1586. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21824-x>
- Krause, J. R., Hinojosa-Corona, A., Gray, A. B., & Burke Watson, E. (2021). Emerging sensor platforms allow for seagrass extent mapping in a turbid estuary and from the meadow to ecosystem scale. *Remote Sensing*, 13, 3681. <https://doi.org/10.3390/rs13183681>
- Melaku-Canu, D., Aveytua-Alcazar, L., Camacho-Ibar, V. F., Querin, S., & Solidoro, C. (2016). Hydrodynamic properties of San Quintin Bay, Baja California: merging models and observations. *Marine Pollution Bulletin*, 108(1-2), 203-214. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.04.030>
- Moore, C. M., Mills, M. M., Arrigo, K. R., Berman-Frank, I., Bopp, L., Boyd, P. W., Galbraith, E. D., Geider, R. J., Guieu, C.,... & Ulloa O. (2013). Processes and patterns of oceanic nutrient limitation. *Nature Geoscience*, 6(9), 701-710. <https://doi.org/10.1038/ngeo1765>
- Ribas-Ribas, M., Hernández-Ayón, J. M., Camacho-Ibar, V. F., Cabello-Pasini, A., Mejía-Trejo, A., Durazo, R., Galindo-Bect S., Souza, A. J., Forja J. M., & Siqueiros-Valencia, A. (2011). Effects of upwelling, tides and biological processes on the inorganic carbon system of a coastal lagoon in Baja California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 95, 367-376. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2011.09.017>
- Ríos del Toro, E. E., Valenzuela, E. I., López-Lozano, N. E., Cortés-Martínez, M. G., Sánchez-Rodríguez, M. A., Calvario-Martínez, O., Sánchez-Carrillo, S., & Cervantes, F. J. (2018a). Anaerobic ammonium oxidation linked to sulfate and ferric iron reduction fuels nitrogen loss in marine sediments. *Biodegradation*, 29, 429-442. <https://doi.org/10.1007/s10532-018-9839-8>
- Ríos del Toro, E. E., Valenzuela, E. I., Ramírez, J. E., López-Lozano, N. E., & Cervantes, F. J. (2018b). Anaerobic ammonium oxidation linked to microbial reduction of natural organic matter in marine sediments. *Environmental Science & Technology Letters*, 5, 571-577. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.8b00330>
- Rodríguez, V. R. (2022). San Quintín Bay, Mexico: The daily mission to protect its volcanoes and coast. *Earth Journalism Network*. <https://earthjournalism.net/stories/san-quintin-bay-mexico-the-daily-mission-to-protect-its-volcanoes-and-coast>
- Samperio-Ramos, G. A., Hernández-Sánchez, O., Camacho-Ibar, V. F., Pajares, S., Gutiérrez, A., Sandoval-Gil, J. M., Reyes, M., De Gyves, S., Balint, S., Oczkowski, A., Ponce-Jahen, S. J., & Cervantes F. J. (2024a). Ammonium loss microbiologically mediated by Fe(III) and Mn(IV) reduction along a coastal lagoon system. *Chemosphere*, 349, 140933. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140933>
- Samperio-Ramos, G. A., Vidal-Nieves, C., García-Esquivel, Z., Herzka, S. Z., Sandoval-Gil, J. M., & Camacho-Ibar, V. F. (2024b). Environmental influence on feeding and biodeposition rates of pacific oysters (*Crassostrea gigas*) throughout its culture cycle in a coastal lagoon with upwelling influence. *Estuaries and Coasts*, 47, 1282-1298. <https://doi.org/10.1007/s12237-024-01357-4>
- Samperio-Ramos, G. A., Hernández-Sánchez, O., Velásquez-Aristizábal, J. A., Camacho-Ibar, V. F., Pajares, S., Gutiérrez, A., Aldrich, A., & Cervantes, F. J. (2026). Regulation of ammonium loss under contrasting upwelling conditions: Sensitivity of Feammox to environmental drivers. *Environmental Science: Processes & Impacts*. Advance article. <https://doi.org/10.1039/D5EM00257E>
- Sandoval-Gil, J. M., Alexandre, A., & Santos, R. (2016). Nitrogen uptake and internal recycling in *Zostera marina* exposed to oyster farming: eelgrass potential as a natural biofilter. *Estuaries and Coasts*, 39, 1694-1708. <https://doi.org/10.1007/s12237-016-0102-4>

- Sandoval-Gil, J. M., Ávila-López, M. C., Camacho-Ibar, V. F., Hernández-Ayón, J. M., Zertuche-González, J. A., & Cabello-Pasini, A. (2019). Regulation of nitrate uptake by the seagrass *Zostera marina* during upwelling. *Estuaries and Coasts*, 42, 731-742. <https://doi.org/10.1007/s12237-019-00523-3>
- Solís-Tuberquia, W. (2023). *Efecto de la ostricultura en los procesos sedimentarios de reducción desasimilatoria de nitrato en una laguna costera: uso de la técnica de emparejamiento isotópico revisada (R IPT-DNRA) en un sistema de flujo continuo* (tesis de maestría en Oceanografía Costera). Universidad Autónoma Baja California.
- Turk-Kubo, K. A., Mills, M. M., Arrigo, K. R., Van Dijken, G., Henke, B. A., Stewart, B., Wilson, S. T., & Zehr J. P. (2021). UCYN-A/haptophyte symbioses dominate N₂ fixation in the Southern California Current System. *ISME Communications*, 1, 42. <https://doi.org/10.1038/s43705-021-00039-7>
- Vincent, S. G. T., Jennerjahn, T. C., & Ramasamy, K. (2021). Biogeochemical cycling of nutrients (C, N, P, S, and Fe) and implications on greenhouse gas emissions. In S. G. T. Vincent, T. Jennerjahn & K. Ramasamy (Eds.), *Microbial Communities in Coastal Sediments: Structure and Functions* (pp. 119-145). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815165-5.00004-2>
- Ward, D. H., Morton, A., Tibbitts, T. L., Douglas, D., C., & Carrera-González, E. (2003). Long-term change in eelgrass distribution at Bahía San Quintín, Baja California, Mexico, using satellite imagery. *Estuaries*, 26, 1529-1539. <https://doi.org/10.1007/BF02803661>
- Zertuche-González, J., Camacho-Ibar, V. F., Pacheco-Ruiz, I., Cabello-Pasini, A., Galindo-Bect, L. A., Guzmán-Calderón, J. M., Macías-Carranza, V., & Espinoza-Avalos, J. (2009). The role of *Ulva* spp. as a temporary nutrient sink in a coastal lagoon with oyster cultivation and upwelling influence. *The Journal of Applied Phycology*, 21, 729-736. <https://doi.org/10.1007/s10811-009-9408-y>

CC BY-NC-ND



Disponible en: <https://cienciaergosum.uaemex.mx/article/view/23270>

Cómo citar el artículo:

Hakspiel Segura, C., Camacho Ibar, V. F. y Samperio Ramos, G. A. (2025). Bahía de San Quintín: laboratorio natural para el estudio del ciclo marino del nitrógeno. *CIENCIA ergo-sum*, 32. <https://doi.org/10.30878/ces.v32n0a41>

DOI: <https://doi.org/10.30878/ces.v32n0a41>



Licencia Creative Commons Atribución-No-Comercial-SinDerivar 4.0 Internacional.

Declaración de autoría (CRediT):

Cristian Hakspiel Segura: conceptualización, investigación, análisis formal, visualización, redacción-revisión y edición.

Víctor F. Camacho Ibar: curación de datos, supervisión, validación, redacción-borrador original.

Guillermo A. Samperio Ramos: supervisión, validación, redacción-borrador original.